Laís Campos Teixeira de Carvalho-Gonçalves
Organizadora

INTRODUÇÃO À TECNOLOGIA SUCROALCOOLEIRA

Editora UFPB

INTRODUÇÃO À TECNOLOGIA SUCROALCOOLEIRA

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

Reitor VALDINEY VELOSO GOUVEIA
Vice-Reitora LIANA FILGUEIRA ALBUQUERQUE
Pró-Reitor PRPG GUILHERME ATAÍDE DIAS

EDITORA UFPB

Diretor Natanael Antônio dos Santos
Gestão de Editoração Sâmella Arruda
Gestão de Sistemas Ana Gabriella Carvalho

Conselho editorial
Adailson Pereira de Souza (Ciências Agrárias)
Eliana Vasconcelos da Silva Esvael (Linguística, Letras e Artes)
Fabiana Sena da Silva (Interdisciplinar)
Gisele Rocha Côrtes (Ciências Sociais Aplicadas)
Ilda Antonieta Salata Toscano (Ciências Exatas e da Terra)
Luana Rodrigues de Almeida (Ciências da Saúde)
Maria de Lourdes Barreto Gomes (Engenharias)
Maria Patrícia Lopes Goldfarb (Ciências Humanas)
Maria Regina Vasconcelos Barbosa (Ciências Biológicas)

Conselho científico
Maria Aurora Cuevas-Cerveró (Universidad Complutense Madrid/ES)
José Miguel de Abreu (UC/PT)
Joan Manuel Rodriguez Diaz (Universidade Técnica de Manabí/EC)
José Manuel Peixoto Caldas (USP/SP)
Letícia Palazzi Perez (Unesp/Marília/SP)
Anete Roese (PUC Minas/MG)
Rosângela Rodrigues Borges (UNIFAL/MG)
Silvana Aparecida Borsetti Gregorio Vidotti (Unesp/Marília/SP)
Leilah Santiago Bufrem (UFPR/PR)
Marta Maria Leone Lima (UNEB/BA)
Lia Machado Fiuza Fialho (UECE/CE)
Valdonilson Barbosa dos Santos (UFCG/PB)

Editora filiada à:
Associação Brasileira
das Editoras Universitárias

Laís Campos Teixeira de Carvalho-Gonçalves
Organizadora

INTRODUÇÃO À TECNOLOGIA SUCROALCOOLEIRA

João Pessoa
Editora UFPB
2021

Direitos autorais 2021 – Editora UFPB
Efetuado o Depósito Legal na Biblioteca Nacional, conforme a Lei nº 10.994, de 14 de dezembro de 2004.
TODOS OS DIREITOS RESERVADOS À EDITORA DA UFPB
É proibida a reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio.
A violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610/1998) é crime estabelecido no artigo 184 do Código Penal.
O conteúdo desta publicação é de inteira responsabilidade do autor.

Design Editorial Editora UFPB

Projeto gráfico Michele Holanda
Diagramação Mônica Câmara
Rildo Coelho

Biblioteca Central da Universidade Federal da Paraíba

I61 Introdução à tecnologia sucroalcooleira / Laís Campos Teixeira de Carvalho-Gonçalves (organizadora). - João Pessoa: Editora UFPB, 2021.
249 p.

Recurso digital (10MB)
Formato: PDF
Requisito do Sistema: Adobe Acrobat Reader

E-book
ISBN 978-65-5942-076-6

1. Tecnologia sucroalcooleira. 2. Cana-de-açúcar – Inovações tecnológicas. 3. Vinhaça. 4. Indústria sucroalcooleira – Produção de energia. 5. Etanol. I. Carvalho-Gonçalves, Laís Campos Teixeira de. II. Título.

UFPB/BC CDU 633.61:681.5

Livro aprovado para publicação através do Edital Nº 01/2020/Editora Universitária/ UFPB - Programa de Publicação de E-books.

EDITORA UFPB
Cidade Universitária, Campus I,
Prédio da editora Universitária, s/n
João Pessoa – PB
CEP 58.051-970
http://www.editora.ufpb.br
E-mail: editora@ufpb.br
Fone: (83) 3216.7147

Sumário

APRESENTAÇÃO **6**
Laís Campos Teixeira de Carvalho-Gonçalves
Márcia Aparecida Cezar

CAPÍTULO I **7**
Márcia Aparecida Cezar

CAPÍTULO II **31**
Angela Lima Menêses de Queiroz
Cláudia Gouveia Rodrigues
Márcia Aparecida Cezar

CAPÍTULO III **64**
Eline Araújo Andrade
Liana Filgueira Albuquerque

CAPÍTULO IV **83**
Anderson Aldelyan Ramalho De Sousa
Danielle Christine Almeida Jaguaribe
Joelma Morais Ferreira

CAPÍTULO V **119**
Danielle Christine Almeida Jaguaribe
Joelma Morais Ferreira

CAPÍTULO VI **154**
Laís Campos Teixeira de Carvalho-Gonçalves
Solange Maria de Vasconcelos

CAPÍTULO VII **194**
Erika Adriana de Santana Gomes
Joelma Morais Ferreira

SOBRE A ORGANIZADORA **249**

SOBRE OS AUTORES **250**

APRESENTAÇÃO

A área sucroalcooleira está inserida no Brasil desde a era colonial com a introdução e adaptação do cultivo da cana-de-açúcar e, consequentemente, produção de açúcar, que representou a primeira grande riqueza agrícola e industrial do país. Mas, foi ao final do século XX que esta indústria alcançou expressão internacional, com o etanol apresentando status de *commodity*.

Isso necessitou uma maior agregação tecnológica ao setor, desde os avanços no melhoramento genético de variedades de cana-de-açúcar e sistematização do plantio e colheita, até a produção dos produtos como açúcar, etanol e bioeletricidade. Além disso, o estudo e a implantação de tecnologias visando a produção do etanol de segunda geração, a produção de biogás e o aproveitamento de outros resíduos do setor para desenvolvimento de produtos com alto valor agregado, tem se destacado cada vez.

Nesta perspectiva, o livro "Introdução à Tecnologia Sucroalcooleira" traz ao leitor conhecimentos atuais acerca de doenças da cana-de-açúcar, aproveitamento de subprodutos, produção de etanol de segunda geração e operações unitárias para produção de açúcar.

Laís Campos Teixeira de Carvalho-Gonçalves

Márcia Aparecida Cezar

CAPÍTULO I

Avanços e perspectivas no manejo de podridões da cana-de-açúcar

»*Márcia Aparecida Cezar*

1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar, *Saccharum officinarum*L., é pertencente à família Poaceae e ao gênero *Saccharum*. As ilhas do Arquipélago da Polinésia, Nova Guiné e a Índia estão entre as regiões mais citadas como possível local de surgimento desta planta (SILVA *et al*., 2015).

O cultivo comercial de cana-de-açúcar e de suas variedades ocorre em mais de 70 países e territórios. O Brasil, Índia e a China são considerados os maiores produtores (NOCELLI, 2017).

No Brasil, representa uma das principais culturas da economia, praticada em todas as regiões brasileiras, sendo o Sudeste a principal região, seguida do Centro-Oeste e Nordeste (IBGE, 2020).

Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (2020) houve um crescimento na produção da cana-de-açúcar em comparação à safra passada, com mais de 642,7 milhões de toneladas colhidas,

representando aumento de 3,6%. A área total colhida de cana-de-açúcar na safra atual foi de 8,44 milhões de hectares. O Estado de São Paulo, maior produtor nacional, teve diminuição de 2,8% em área colhida.

Por outro lado, na região Nordeste, no mesmo período, as condições climáticas mais favoráveis à cultura, potencializaram a produção, refletindo no aumento em todos os estados produtores em comparação a safra anterior, o que representou um acréscimo de 10,6%. Os maiores estados produtores são Alagoas, responsável por 34,58% da produção, seguido de Pernambuco (28,10%) e Paraíba (14,54%). Neste último, o cultivo da cana-de-açúcar constitui-se o maior produto agrícola produzido (IBGE, 2020).Predominantemente, a produção se destina a fabricação de etanol que obteve aumento de 15,9% comparado ao ano anterior, contabilizando 442,7 milhões de litros, além de açúcar com uma produção de 141,1 milhões de toneladas, um incremento de 20% em comparação à safra passada (CONAB, 2020).

Um levantamento de variedades de cana-de-açúcar plantadas na Paraíba, na colheita da safra 2012/2013, demonstrou que, as variedades RB 92 579 e RB 86 7515, corresponderam a mais de 50% das variedades plantadas (ASPLAN, 2014).

Estas variedades são resultantes do Programa Nacional de Melhoramento da Cana-de-açúcar – PLANALSUCAR, criado pelo extinto Instituto do Açúcar e Álcool (IAA), e posteriormente denominado RIDESA – Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroenergético. (DAROS; OLIVEIRA; BARBOSA, 2015).

Além da RIDESA, outras Instituições de pesquisa como o Instituto Agronômico de Campinas (IAC), Centro de Tecnologia Canavieira (CTC)

entre outros, intensificaram os estudos envolvendo o cultivo da cana-de-açúcar, visando um cenário mais produtivo do plantio à colheita.

2. PROBLEMAS FITOSSANITÁRIOS NA CANA-DE-AÇÚCAR

Apesar da grandiosidade do setor sucroenergético brasileiro, fatores como o aumento da produtividade e a expansão do cultivo da cana-de-açúcar pelo território nacional, podem ser afetados pelo aumento de novas pragas e doenças que acometem a cultura, causando prejuízos aos produtores, visto que, a qualidade da cana-de-açúcar pode ser afetada, limitando assim o desempenho do setor.

Dentre as inúmeras pragas que atacam a cultura da cana-de-açúcar, na região Nordeste, particularmente no estado da Paraíba, a broca comum (*Diatraea flavipennella*), cigarrinha dos canaviais (*Mahanarva posticata*), broca Gigante (*Telchinlicus licus*) e a lagarta Elasmo (*Elasmopalpus lignosellus*) são responsáveis por grandes perdas (ASPLAN, 2014)

Segundo Pinto *et al*. (2016), para as variedades plantadas no Brasil, as perdas causadas pela broca comum chegam a 0,42% em açúcar, 0,21% em álcool e 1,14% no peso da cana colhida a cada 1% de Índice de Intensidade de Infestação (III), que é a porcentagem dos entrenós brocados em relação ao total examinado. Portanto, pode-se perder mais de 400 kg de açúcar por hectare em infestações (III) de até 10%.

Os danos causados pela broca comum podem ocorrer de forma direta, como enraizamento aéreo, brotação lateral, perda de peso, quebra e perfuração dos colmos, ou de forma indireta pela penetração de fungos fitopatogênicos, ocasionando podridões no colmo.

Esse processo é denominado de complexo broca- podridão, no qual essa interação da broca com microrganismos invasores intensifica a formação de metabólitos que afetam negativamente a fermentação alcoólica, influenciam a morfologia celular, conversão do açúcar em álcool, reduzindo a eficiência fermentativa e rendimento industrial (FIGUEIREDO; MACIEL; MARQUES, 2008). Ocorre a inversão da sacarose em glicose, diminuindo a pureza do caldo e o peso do açúcar (DEMETRIO; ZONETTI; MUNHOZ, 2016)

Segundo Pinto *et al*.(2016), um controle químico pode ser utilizado para combater esta praga. No entanto, o método mais utilizado no Brasil é o controle biológico a partir da vespinha (*Cotesiaflavipes*), parasitoide larval que se alimenta da broca.

3. DOENÇAS

Além das pragas, a cultura da cana-de-açúcar é afetada mundialmente por mais de uma centena de doenças (MATSUOKA, 2016). Até hoje foram identificadas 216 doenças, sendo que cerca de 58 foram encontradas no Brasil. Dentre estas, pelo menos dez podem ser consideradas de grande importância econômica para a cultura.

Entende-se por doenças em plantas, o resultado da interação entre o patógeno agressivo e hospedeiro suscetível, sob a influência do ambiente favorável. Dentre os patógenos que afetam a cana-de açúcar destacam-se o vírus causador do Mosaico (*Sugarcane mosaic virus*- ScMV); as bactérias causadoras da Escaldadura-das-folhas (*Xanthomonas albilians* Dowson), Estria vermelha (*Pseudomonas rubrilineans* Stapp) e o Raquitismo-da-soqueira (*Leifsonia xyli* subsp. *Xyli*); além dos fungos

responsáveis pelo Carvão (*Sporisorium scitamineum*), Ferrugens Marron (*Puccinia melanocephala* H. & P. Syd) e Alaranjada (*Puccinia kuehnii* E. J. Butler), Podridão abacaxi (*Ceratocystis paradoxa* Moreau), Podridão vermelha (*Colletotrichum falcatum* Went) e *Pokkahboeng* (espécies do *Complexo Fusarium fujikuroi* – FFSC) (TOKESHI; RAGO, 2005; COSTA, 2016).

Embora algumas das doenças sejam bastante conhecidas, ainda são pouco estudadas, como é o caso das podridões vermelha e especialmente as decorrentes de *Pokkah boeng*.

Os fitopatógenos *Colletotrichum falcatum* e espécies de *Fusarium* sp. causam respectivamente a Podridão Vermelha e a *Pokkah boeng* (podridão do colmo) na cana-de-açúcar. Embora apresentem algumas diferenças, ambas as podridões, causam grandes danos na indústria, pois, os colmos e tecidos atacados secam (não havendo caldo para ser extraído), além de que nos tecidos contaminados pode ocorrer a inversão de sacarose (SANTINO; ROSSETO, 2010).

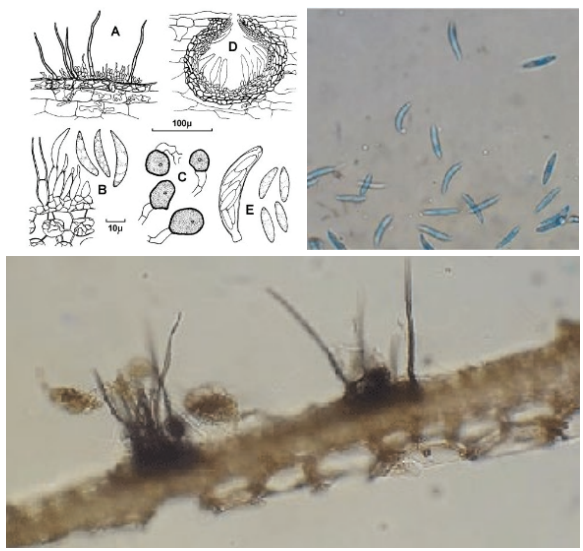
4. PODRIDÕES EM CANA-DE-AÇÚCAR: AGENTES CAUSAIS

4.1 Podridão vermelha

O patógeno *C. falcatum,* possui a fase perfeita correspondente a *Glomerella tucumanensis*. Produz acérvulos sub-epidérmicos eruptivos com setas retas ou tortuosas, pardo-escuras, septadas, abundantes e facilmente visíveis com lupa manual (TOKESHI; RAGO, 2005). Na base das setas estão conidióforos curtos, simples hialinos, com conídios falcados (acanoados) unicelulares, hialinos, granulosos

e envoltos em matriz gelatinosa constituída de polissacarídeos e proteínas solúveis em água que dá ao conjunto tom levemente rosado (Figura 1). Essa matriz, provavelmente, protege os conídios da dissecação, aumentando a eficiência de germinação e penetração no tecido hospedeiro (MENEZES, 2006).

Figura 1 –*C. falcatum*. (A e F) seção vertical do acérvulo; (B e G) conidióforos e conídios; (C) apressório; (D) seção vertical de peritécio, (E) asco e ascósporos



Fonte: CAB (2020) e NECHET; RAMOS; VIEIRA (2016)

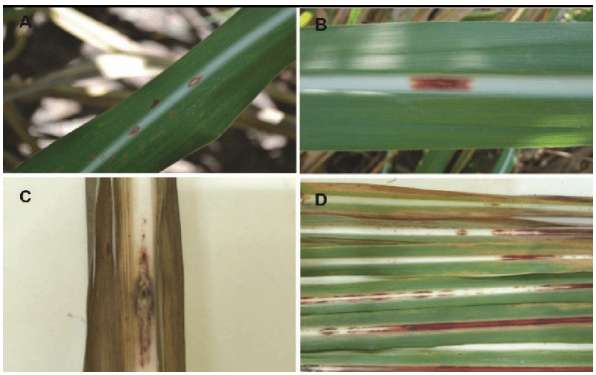
Os agentes naturais, chuva e ventos, são os principais disseminadores da doença, pois a esporulação em acérvulos do *C. falcatum*, necessita da ação da água ou orvalho para liberar os seus

conídios da mucilagem que os prende, e carregá-los até a região das gemas no colmo, onde se dá a penetração (SANGUINO, 2009). O vento é o agente disseminador para longas distâncias. Os sintomas podem se manifestar de duas formas na cana-de-açúcar, sobre as folhas (Figura 2) e no interior dos colmos.

Embora nas folhas não ocasionem podridão, podem ser fonte de inóculo para a infecção em outras partes da planta (NECHET;RAMOS; VIEIRA, 2016).

Em variedades mais suscetíveis, essa podridão pode causar seca de grande parte ou de todo o colmo (MATSUOKA, 2016). O grande prejuízo ocorre nas indústrias, pois, quando os tecidos são afetados, há inversão de sacarose e, em tecidos ou colmos secos, claramente não há caldo para ser obtido.

Figura 2 –Sintomas da podridão vermelha em folhas de cana-de açúcar. (A) Lesões Iniciais de coloração bege com halo vermelho; (B) Lesão mais velha de coloração vermelho-amarronzada; (C)Lesão mais velha de coloração escura; (D) Diferentes níveis de severidade da doença



Fonte: NECHET; RAMOS; VIEIRA (2016)

4.2 Podridão de Fusarium *(Pokkah boeng)*

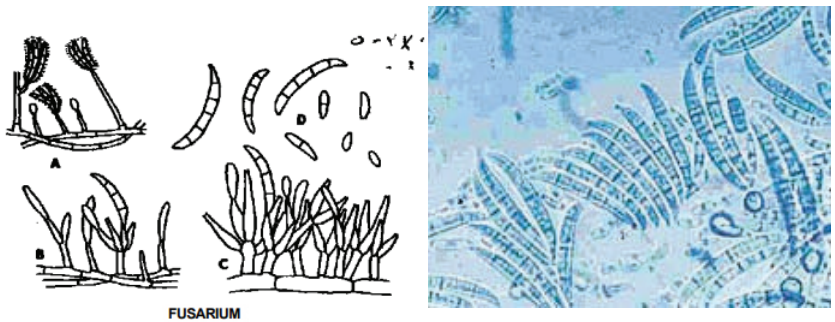
A podridão de Fusarium, referida antigamente ao fungo *F. moniliforme,* corresponde na fase assexuada, a *Gibberella fujikuroi*, cujo patógeno produz grandes números de microconídios, poucos macroconídios e raramente produz clamidósporos. Os microconídios são formados em cadeia e os macroconídios em esporodóquios (TOKESHI; RAGO, 2005). Além de um micélio extenso e cotonoso em cultura, muitas vezes com algum tom de rosa, roxo, ou amarelo no meio do micélio; conidióforos variáveis, delgados e simples, ou

robustos, curtos, ramificado de forma irregular ou com uma fibra de frascos, sozinho ou agrupado em esporodóquio (BARNETT; HUNTER, 1998) (Figura 3). Apresenta disseminação via material propagativo, e capacidade de sobrevivência em tecidos meristemáticos por longos períodos.

Hilton *et al*. (2017) alegam que o agente causal de *Pokkah boeng* ainda é indefinido e disputado entre pesquisadores. No entanto, o sistema de classificação e nomenclatura de *Fusarium* passou por sua transformação e ainda não chegou-se a um consenso sobre qual a forma específica apropriada para a doença *Pokkah boeng*.

Ainda são observados os nomes obsoletos "*F. moniliforme* var. *subglutinans*" ou "*F. moniliforme*", sendo empregados para o agente causador de *Pokkah boeng* ou podridão de colmo. Este fato pode ser explicado pela identificação de fungos se basear em caracteres morfológicos e não pela utilização de estudos moleculares. (COSTA, 2016).

Figura 3 –Estruturas do fungo *Fusarium*(A) hifas com conidióforos simples; (B) vários conidióforos; (C) um esporodóquio solto formado por conidióforos ramificados; (D e E) conídios



Fonte: BARNETT; HUNTER (1998) e ELMER (1991)

A *Pokkah boeng*é um tipo de podridão que tem como agente etiológico diversas espécies do complexo *Fusarium fujikuroi* (Fusarium fujikuroi species complex - FFSC), como *F. sacchari*, *F. proliferatum*e *F. verticillioides* (COSTA, 2016). Segundo a autora, sintomas da doença podem ser eventualmente observados em plantações de cana no país, através da deformação na parte aérea, podridão do colmo e murcha. Os sintomas se evidenciam com descoloração e enrugamento das folhas, próximo à região apical, evoluindo para a podridão no topo da planta com posterior quebra de dominância apical e emissão de brotações laterais. O colmo apresenta lesões denominadas “corte de faca” exibindo em seu interior coloração avermelhada com crescimento do patógeno (Figura 4).

Figura 4 –Sintomas característicos da doença de *Pokkah boeng* em cana-de-açúcar. Riscas vermelhas e clorose (A) Podridão (B) Corte de faca e parte superior deformada (C)

Fonte: HILTON *et al*. (2017)

A sintomatologia pode ser observada em colmos que apresentam perfurações, típicas do ataque da broca. Próximo aos orifícios de entrada da broca da cana, os tecidos afetados sofrem inversão de sacarose, apresentam coloração vermelho-escura, quase negra, recobrindo alguns milímetros dos tecidos da cavidade ou se estendendo a maiores profundidades do entrenó, no caso de variedades suscetíveis (TOKESHI; RAGO, 2005). Através dos feixes vasculares, podem acometer vários entrenós abaixo e acima do orifício causado pela broca da cana.

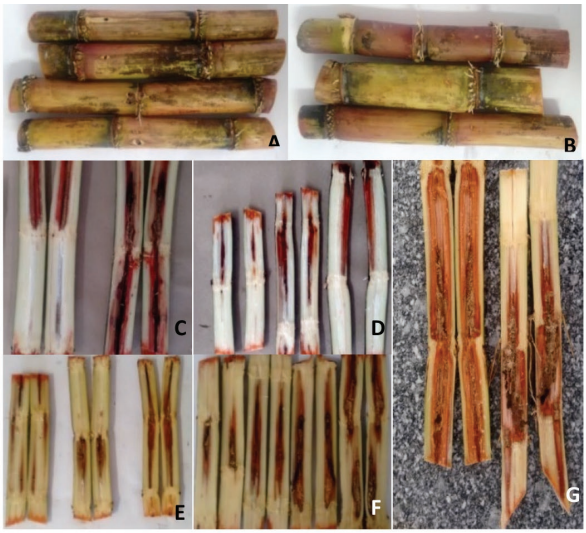
Comumente ocorre a observação de sintomas internos de podridão em colmos de cana-de-açúcar principalmente associados ao ataque da broca da cana (Figura 5).

Apesar da sintomatologia ser bastante utilizada na diagnose de doenças de plantas, não é possível diferenciar quais doenças e respectivos patógenos ocorrem se baseando somente nesta ferramenta, como é o caso das podridões, sobretudo de *Pokkah boeng*.

Para que medidas de manejo e controle sejam elaboradas e aplicadas é necessário a identificação adequada dos seus agentes causais. Recentemente houve um aumento no número de trabalhos no Brasil com vistas a identificação correta dos fungos causadores de podridões por meio de características morfológicas além de técnicas mais avançadas como o sequenciamento genético.

Os atributos morfológicos de *Fusarium* sp. foram avaliados por Freitas (2017) em cinco variedades de cana-de-açúcarplantadas na Paraíba que apresentavam perfurações da broca comum e sintomas de podridão, porém não foi possível verificar quais espécies ocorreram com maior incidência.

Figura 5 –Colmos de cana-de-açúcar com (A) e sem sintomas de perfuração de broca (B), e com podridões RB-86 7515 (C), RB-86 3129 (D), RB-93 1003 (E), RB-00 2754 (F) e RB-92 579 (G)



Fonte: FREITAS (2017)

Com base em análises filogenéticas dos genes EF-1α e Rpb2, teste de patogenicidade, cruzamentos e morfologia dos patógenos, Costa (2016) avaliou a diversidade de espécies de *Fusarium* associadas à doença *Pokkah boeng* em 39 amostras de cana-de-açúcar coletadas em diferentes regiões produtoras do Brasil e identificou três diferentes agentes etiológicos, que pertencem ao complexo de espécies *Fusarium fujikuroi* (FFSC), *F. proliferatum*(dois isolados), *F. sacchari* (27 isolados) predominante em estados da região Nordeste e uma nova

linhagem de *Fusarium* sp. (dez isolados). Além da cana-de-açúcar, essas espécies causaram podridão em colmo de milho, sorgo e milheto.

É complexa também a detecção e correta diagnose da podridão vermelha da cana-de-açúcar originalmente causada por *C. falcatum*, como observado por Silva *et al*. (2019) que através de análise dos atributos morfológicos e moleculares por similaridade de sequência das regiões ITS e LSU de 25 isolados provenientes de cana-de-açúcar com sintomas de podridão vermelha verificaram a ocorrência das três espécies *F. subglutinans, F. proliferatume F. verticillioides*, pertencentes do complexo *Fusarium fujikuroi.* De acordo com os autores, além de *C. falcatum,* espécies do complexo *F. fujikuroi* estão associados a lesões de podridão vermelha em canaviais brasileiros, evidenciando assim, a utilização de ferramentas moleculares na diagnose

Além de *C. falcatum* outra espécie de *Colletotrichum* associadas à podridão vermelha da cana-de-açúcar pode estar associada. A análise do crescimento micelial, feita por Marins *et al*. (2019) verificou que o isolado pertence ao complexo gloeosporioides, enquanto a caracterização molecular utilizando sequências do gene gliceraldeído-3 fosfato desidrogenase (GAPDH) agrupou preliminarmente o isolado obtido com *Colletotrichum siamense*.

Apesar desses trabalhos recentes proporem a identificação mais precisa dos patógenos causadores de podridões em cana-de-açúcar, Costa (2016) relata a carência de literatura descritiva no Brasil para as espécies de *Fusarium* patogênicas a cana-de-açúcar.

Patógenos como *Fusarium* e *Colletotrichum*, causadores das podridões em cana-de-açúcar,são classificados como necrotróficos, ou seja, destroem os tecidos vegetais por meio da ação de toxinas ou

enzimas que promovem a lise e morte da célula hospedeira, permitindo o acesso a nutrientes e o crescimento do patógeno (AGRIOS, 2005). Geralmente, têm capacidade de sobreviver por longos períodos nesse ambiente por meio da formação de estruturas de resistência, as quais garantem condições ideais na ausência da planta hospedeira. Na cana-de-açúcar, ocasiona podridões do colmo, reduzem o teor de açúcar devido à inversão da sacarose armazenada na planta, e, como consequência ocasiona a contaminação do caldo, prejudicando assim a qualidade dos produtos (DINARDO-MIRANDA, 2008).

5. MANEJO DE PODRIDÕES EM CANA-DE-AÇÚCAR

Quanto a forma de controle das podridões da cana-de-açúcar, Matsuoka (2016) afirma que devem ser por meio do uso de variedades resistentes e o controle da broca-da-cana-de-açúcar. De acordo com Tokeshi; Rago (2005), como a maioria das variedades de cana-de-açúcar é portadora desse patógeno, sem expressar sintomas, o controle é feito, quase que exclusivamente, com variedades tolerantes. Entretanto, esse fato pode contribuir na disseminação e permanência do patógeno em campos de produção que ainda não utilizem variedades com algum grau de resistência ou esta ainda não seja disponível no mercado.

A constatação desse patógeno nas cinco variedades amplamente cultivadas na Paraíba apontam a necessidade de pesquisas envolvendo o melhoramento genético e desenvolvimento de variedades capazes de tolerar a doença, uma vez que pode acarretar sérios prejuízos ao produtor e consequentemente à indústria.

São frequentes os relatos de perdas de 50% a 70 % de sacarose em colmos atacados simultaneamente pelo fungo e pela broca-da-cana (SANTIAGO; ROSSETTO, 2010).

Além do controle genético, são utilizados fungicidas no tratamento dos toletes, obtendo resultados eficientes, para a eliminação dos esporos superficiais e proteção dos toletes na fase inicial de germinação (TOKESHI; RAGO, 2005).

Porém, atualmente somente um produto é registrado para *Colletotrichum falcatum* em cana-de-açúcar (MAPA, 2020), contudo rotineiramente são utilizados produtos indicados para outros patógenos, o que consequentemente pode levar a resistência do patógeno ao produto, como pode ocorrer no caso de espécies de *Fusarium*sp. que na maioria das vezes ocorre em infecção simultânea, no complexo broca-podridões.

Além disso, ressalta-se que essa prática utilizada de forma irracional promove efeitos devastadores no ambiente e na saúde, como a contaminação de alimentos, do solo, da água e dos animais; a intoxicação dos agricultores; a resistência de patógenos, de pragas e plantas invasoras a certos princípios ativos dos agrotóxicos (MORANDI; BETTIOL, 2009).

A podridão envolvendo espécies de *Fusarium* sp. pode estar sendo manejada equivocadamente com o uso de fungicidas não recomendados para a cana-de-açúcar, o que pode resultar futuramente em resistência do patógeno ao produto e permanência no ambiente, haja vista sua ocorrência em todas as variedades avaliadas por Freitas (2017).

Desta forma, pesquisas que envolvam práticas alternativas como a utilização de microrganismos antagonistas, utilizados no controle biológico são de suma importância, pois não contaminam o ambiente tampouco o aplicador e devem ser estimuladas.

Mundialmente, o controle biológico é utilizado no manejo de pragas de diversas culturas de interesse agronômico. No Brasil, amplamente se verifica a utilização do fungo entomatogênico *Metarhizium anisopliae* no controle biológico de percevejos das pastagens, da cigarrinha da cana-de-açúcar, *Mahanarvaposticata*, da broca da cana-de-açúcar, *Diatraea saccharalis*, e carrapatos de impacto na pecuária, como *Rhipicephalus (Boophilus) microplus* (ORLANDELLI; PAMPHILLE, 2011).

Nos estados do Nordeste, *M. anisopliae* é empregado com grande sucesso no controle da cigarrinha em cana-de-açúcar, correspondendo a um dos mais bem-sucedidos programas de controle biológico na América Latina (ALVES; LOPES, 2008). No Estado da Paraíba a produção desse agente de biocontrole é feita pela Associação dos Plantadores de Cana (ASPLAN-PB) a qual orienta os produtores na utilização de *M. anisopliae* no manejo da cigarrinha em cultivos de cana-de-açúcar.

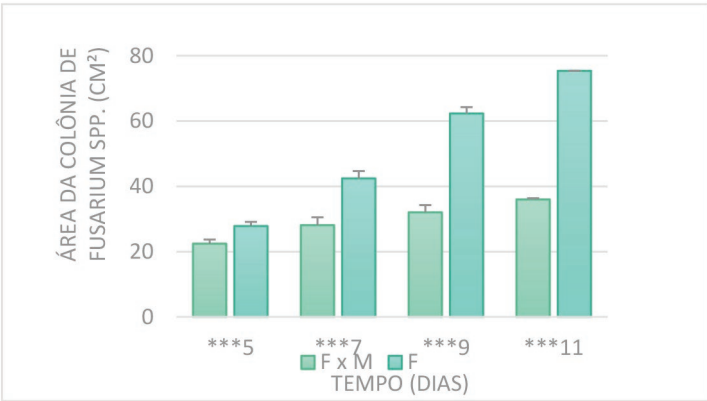
Mundialmente a capacidade antagônica de diferentes espécies de *Metarhizium* sp.vem demonstrando resultados promissores a fitopatógenos de diversas culturas agrícolas como em feijoeiro no controle de *Fusarium solani,* causador de podridão radicular (SASAN; BIDOCHKA, 2013); em trigo as espécies *M. brunneum, M. robertsii*e *M. flavoviridae* proporcionaram efeito antagônico a *Fusarium culmorum*(KEYSER *et al*., 2014); e na bananeira foi verificada a atividade

antagônica de *M. anisopliae* a *F. oxysporum* f. sp. *cubense* (PICARDAL *etal*., 2019).

No Brasil são escassos os estudos que utilizam *Metarhizium* sp. no controle de doenças, contudo, em cana-de-açúcar, surgem como um expectativa de controle dos patógenos causadores de podridões.

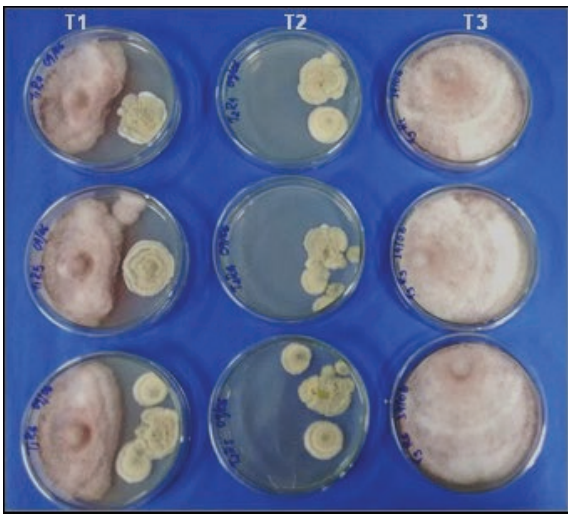
Diferentes isolados de *Metarhizium* sp. inibiram o crescimento de *F. moniliforme* e *C. falcatum*, sendo que a espécie *M. robertsii*, proporcionou até 54% de inibição para ambos os fitopatógenos (SIQUEIRA, 2016). Igualmente, Oliveira *et al*., (2017), obtiveram a redução do crescimento de *Fusarium* sp. na presença de *M.anisopliae* com 52,2 % de inibição (Figuras 6 e 7).

Figura 6 – Efeito antagônico do *Metarhizium anisopliae* contra o *Fusarium* sp. (FxM em verde claro) e o seu respectivo controle (F em verde escuro). Teste T: *p<0,05, **p<0,01, ***p<0,001



Fonte: OLIVEIRA *et al*. (2017)

Figura 7 –Pareamento e inibição de *Fusarium* sp. por *Metarhizium anisopliae* (T1) *M. anisopliae* x *Fusarium* sp.*;* (T2) *M. anisopliae* e(T3) *Fusarium* sp.



Fonte: OLIVEIRA *et al*. (2017)

Diante das informações apresentadas acerca das diferentes espécies de fungos fitopatogênicos que causam podridões e prejuízos em cana-de-açúcar e, consequentemente, problemas no mercado sucroenergético, ressalta-se a viabilidade técnica da utilização do controle biológico, principalmente em regiões canavieiras que não dispõem de variedades resistentes, como é o caso da Paraíba entre outras. Além disso, *M. anisopliae* prontamente produzido e utilizado em canaviais, no controle de pragas, ampliará seu uso e potencial biocontrole em podridões da cana-de-açúcar.

Além da utilização de antagonistas no controle biológico das podridões da cana-de-açúcar, a utilização de mudas sadias, a adoção de vistorias periódicas e a eliminação de plantas doentes são fundamentais para a redução dos prejuízos.

6. REFERÊNCIAS

AGRIOS, G. N. **Plant Pathology**. Ed. 5, Elsevier, 2005, San Diego.

ALVES, S.B.; LOPES, R.B. **Controle microbiano de pragas na América Latina.** Piracicaba: FEALQ, 2008. 414p.

ASSOCIAÇÃO DE PLANTADORES DE CANA DA PARAÍBA – ASPLAN. Técnicas agrícolas sustentáveis para o cultivo da cana-de-açúcar. (**Manual de Orientação**). João Pessoa, PB, 2014.

BARNETT, H. L.; HUNTER, B. B. **Illustrated genera of imperfect fungi.** 4th ed. St. Paul, Minn.: APS Press, 1998.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar. V. 6 – Safra 2019/20, n. 4, quarto levantamento, Brasília, 2020. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar. Acesso em: 20 de abril de 2020.

CENTRE FOR AGRICULTURE AND BIOSCIENCE INTERNATIONAL – CABI. Invasive Species Compendium. Wallingford, UK: CAB International. Disponível em: https://www.cabi.org/isc>.Acesso em 28 de abril de 2020.

COSTA, M. M. **Espécies de *Fusarium* associadas a Pokkah boeng da cana-de-açúcar no Brasil**. Dissertação de Mestrado, Lavras, MG, Universidade Federal de Lavras, 71p, 2016.

DAROS, E.; OLIVEIRA, G. A. de; BARBOSA, G. V. de. (Org.). **45 anos de variedades RB de cana-de-açúcar: 25 anos de Ridesa.** Curitiba: Ed. Graciosa, 2015.

DEMETRIO, P.A.; ZONETTI, P.C.; MUNHOZ, R.E.F. Avaliação de clones de cana-de-açúcar promissores RBs quanto à resistência à broca-da-cana (*diatraeasaccharalis*) na região noroeste do Paraná. **CESUMAR**, Maringá, 2008, v. 10, n.1, p. 13-16.

DINARDO-MIRANDA, L. L.; Pragas. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, G. A. (Eds.). **Cana-de-açúcar**, Campinas: Instituto Agronômico, cap. 17, p. 349-404, 2008.

ELMER, W. H. The economically important diseases of asparagus in the U.S. **American Phytopathological Society** APS. 2001. Disponível em:http://www.apsnet.org/publications/apsnetfeatures/Pages/DiseasesofAsparagus.aspx>. Acesso em: 08 março de 2020.

FIGUEIREDO, I. C.; MACIEL, B. F.; MARQUES, M. O. A qualidade da cana-de-açúcar como matéria-prima para produção de álcool. **Nucleus**, edição especial, Ituverava, 2008. p. 82-92.

FREITAS, W. H. H. S. **Ocorrência de podridões em variedades de cana-de-açúcar cultivadas na Paraíba – PB**, Joao Pessoa, PB, Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal da Paraíba, 37 p., 2017.

HILTON, A.; ZHANG, H.; YU, W.; SHIM, W. Identification and characterization of pathogenic and endophytic fungal species associated with pokkah boeng disease ofs ugarcane. **The PlantPathologyJournal**, Coréia, v.33, n.3, p. 238-248 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Produção agrícola municipal**. https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1618#resultado. Brasília, Acesso em: 24 de abril de 2020.

KEYSER, C. A.; THORUP-KRISTENSEN, K.; MEYLING, N.V. *Metarhizium* seed treatment mediates fungal dispersal. **FungalEcology,** London, v. 11, p. 122-133, 2014.

MARINS, E. F. C.; SILVA, M. J. S.; ABREU, L. A.; SILVA, G. C. S.; COSTA, J. F. O.; FEIJÓ, F. M.; ASSUNÇÃO, I. P. ; LIMA, G. S. A. *Colletotrichum gloeosporioides* sensu lato associada à podridão vermelha da cana-de-açúcar no estado de Alagoas. In.:

CONGRESSO BRASILEIRO DE FITOPATOLOGIA, **Anais do 51º Congresso de Fitopatologia**, Recife, , p. 506, 2019.

MATSUOKA, S. Manejo de doenças e medidas de controle. In: SANTOS, F.; BORÉM, A. (Eds.). **Cana-de-açúcar: do plantio à colheita.** Viçosa, MG: Ed. UFV, 2016. cap. 5, p. 108-138.

MENEZES, M. Aspectos biológicos e taxonômicos de espécies do gênero C*olletotrichum.* **Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agronômica**, Recife, vol. 3, p.170-179, 2006.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO - MAPA. **Agrofit,** Disponível em: <http://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit_cons/principal_agrofit_cons>. Acesso em 20 abril de 2020.

MORANDI, M. A. B.; BETTIOL, W. Biocontrole de doenças de plantas: uso e perspectivas, Jaguariúna: Embrapa Meio ambiente, 2009, 341 p.

NECHET, K. de L.; RAMOS, N. P.; VIEIRA, B. de A. H. Identificação de doenças fúngicas foliares emergentes em cana-de-açúcar. **Comunicado Técnico**, EMBRAPA. Jaguariúna, São Paulo, 2016. Disponível em: < https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/154634/1/2016CT04.pdf>. Acesso em: 15 de abril de 2020.

NOCELLI, R. C. F.; ZAMBON, V.; SILVA, O. G. M. da; MORINI, M. S. de C. Histórico da cana-de-açúcar no Brasil: contribuições e importância econômica. In: FONTANETTI, C. S.; BUENO, O. C. (Org.). **Cana-de-açúcar e seus impactos: uma visão acadêmica**. Bauru, SP: Ed. Canal 6, 2017. cap. 1, p. 13-30.

OLIVEIRA, O. F.; SILVA, R. B.; PONTIERI, M. H.; CEZAR, M. A. Antagonismo "in vitro" de *Metarhizium anisopliae* ao fitopatógeno *Fusarium* spp. em cana-de-açúcar. In.: CONGRESSO INTERNACIONAL DA DIVERSIDADE DO SEMIÁRIDO. **Anais do II Congresso Internacional da Diversidade do Semiárido.** Campina Grande, v. 1. 2017.

ORLANDELLI, R. C., PAMPHILE, J. A. Fungo entomopatogênico *Metarhizium anisopliae* como agente de controle biológico de insetos pragas. **SaBios: Revista Saúde e Biologia**, Ampo Mourão, v.6, n.2, p.79-82, 2011.

PICARDAL, J. P.; TUNDAG, E. D. L.; PICARDAL, M. T.; GOC-ONG, G. B. Antagonistic activity of metarhizium anisopliae (metschnikoff) against phytopathogenic fusarium oxysporum f. sp. cubense (schlecht.) as a biologicalcontrol. CNU JournalofHigherEducation V.13, p 25-33, 2019.

PINTO, A. S.; LOPES, V. L.; LIMA, A. A. Manejo de pragas. In: SANTOS, F.; BORÉM, A. (Eds.). **Cana-de-açúcar: do plantio à colheita.** Viçosa, MG: Ed. UFV, 2016. cap. 4, p. 94-107.

SANGUINO, A. As principais doenças da cana-de-açúcar: Curso Tópico da Cultura de Cana IAC. ASAS – Álvaro Sanguino Assessoria, Planejamento e Consultoria Ltda, Piracicaba, SP. [2009?]. Disponível em:http://www.infobibos.com/cursocana/alunos/aulas/Aula9/Aula_9.pdf >. Acesso em: 20 de abril de 2020.

SANTIAGO, A. D.; ROSSETTO, R. **Doenças fúngicas**. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_79_22122
006154841.html. Acessoem: 15 de abril de 2020.

SASAN, R. K.; BIDOCHKA, M. J. Antagonismo f the endophytic insect pathogenic fungus *Metarhizium robertsii* against the bean plant pathogen *Fusarium solani* f. sp. *phaseoli*. **Canadian Journal of Plant Pathology,** Otawa, v.35, n. 3, p. 288-293, 2013.

SILVA, F. C.; ANTONIOLLI, A.; FREITAS,P. L. Avaliação da produtividade agrícola da cana-planta e cana-soca sob diferentes espaçamentos entre plantas para produção de açúcar e etanol - Campinas : Embrapa Informática Agropecuária, 2015. 86 p.: il. - (Boletim de pesquisa e desenvolvimento / Embrapa Informática Agropecuária, ISSN 1677-9266; 40).

SILVA, M. G.; MENEZES, R. C.; CARRER FILHO, R.; STUTZ, M. C.; DIANESE, E. C.; CUNHA, M. G. Espécies do complexo *Fusarium fujikuroi* causando podridão vermelha da cana-de-açúcar In.: CONGRESSO BRASILEIRO DE FITOPATOLOGIA, **Anais do 51º Congresso de Fitopatologia**, Recife, p. 451, 2019.

SIQUEIRA, A. C. O. **Uso de *Metarhizium* spp. Na produção de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar e seus efeitos na planta, empragas e**

doenças. Dissertação de Mestrado, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – ESALQ, Piracicaba, 94p, 2016.

TOKESHI, H.; RAGO, A. Doenças da cana-de-açúcar. In: KIMATI, H.; AMORIM, L.; REZENDE, J. A. M.; BERGAMIN FILHO, A.; CAMARGO, L. E. A. (Eds) **Manual de Fitopatologia.** 4.ed. v. 2, São Paulo, SP: Ed. Agronômica Ceres Ltda., 2005. cap. 21, p.185-196.

CAPÍTULO II

Aproveitamento integral da cana-de-açúcar por diversos setores industriais

»*Angela Lima Menêses de Queiroz*
»*Cláudia Gouveia Rodrigues*
»*Márcia Aparecida Cezar*

1. INTRODUÇÃO

O agronegócio brasileiro produz uma quantidade substancial de subprodutos sob a forma de bolo, farelo, polpa, bagaço, ossos, tripas, penas, entre outros, o que representa perdas econômicas no processo de produção, já que muitas vezes não são aproveitados de maneira adequada, podendo gerar renda extra ao produtor.

Nesse contexto, destacamos as indústrias de etanol e açúcar, que de acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), o Brasil deve produzir 642,7 mil toneladas de cana-de-açúcar na safra 2019/2020.

O principal subproduto da indústria sucroalcooleira é o bagaço, um material fibroso resultante do processo de moagem da cana-de-açúcar, para obtenção do caldo, com uma produção estimada em 164 milhões de toneladas por ano. Uma parte do bagaço é usada para a co-geração de energia nas indústrias de etanol e açúcar para uso próprio, enquanto o restante pode ser transformado em um produto secundário de alta densidade e fonte de energia que poderia aumentar significativamente o total rendimento energético e rentabilidade dessas usinas (RODIER *et al*., 2019; YADAV *et al*., 2020).

Juntamente com o bagaço, a palha da cana-de-açúcar destaca-se entre os diferentes tipos de biomassas lignocelulósicas com grande potencial para geração de calor, eletricidade e produção de etanol celulósico (SANTOS *et al*., 2012). Ao produzir açúcar e álcool, são gerados, para cada tonelada de cana-de-açúcar, 280 kg de bagaço e 280 kg de palha (CRUZ, 2008).

Outros subprodutos gerados pela indústria sucroalcooleira, podem ser aproveitados de forma eficaz. Destacamos entre eles:

- Cinzas: resultantes da queima do bagaço de cana-de-açúcar, em virtude da presença preponderante de sílica na composição química, apresenta-se como matéria-prima potencial para a produção de cimento composto e/ou de aditivo mineral para pastas, argamassas e concretos (VANDERLEI *et al.,* 2014);

- Leveduras da cana-de-açúcar: provenientes de processos fermentativos, possuem alto valor biológico e fonte de diversos nutrientes, sendo uma excelente fonte proteica.

Podem ser utilizadas como alimentos alternativos na alimentação humana e animal (ARAÚJO *et al.,* 2009);

- Torta de filtro: sua maior parte da torta de filtro é constituída de matéria orgânica, em torno de 85,1%, com composição média de 11% delignina, 34% de hemicelulose e 38% decelulose, além dos minerais: fósforo, nitrogênio como também apresenta alto teor de cálcio; umidade cerca de 70%, que é importante no processo de brotação da cana, pode ser adicionada em plantios realizados em épocas secas, em algumas regiões, e consideráveis quantidades de micronutrientes (BERNADINO *et* al., 2018);

- A vinhaça, que será mencionada no capítulo III, é um resíduo gerado na produção do álcool. A cada litro de álcool produzido são gerados, em média, 12 litros de vinhaça, que apresentam concentrações de potássio diferentes, pois este depende da matéria prima utilizada. A vinhaça é utilizada, principalmente, nas soqueiras, fornecendo todo o potássio e parte do nitrogênio necessários à plantação da cana (ROSSETTO; SANTIAGO, 2018).

Diante dessas informações, neste capítulo serão elucidados como estes subprodutos oriundos das indústrias sucroalcooleiras podem ser aproveitados atualmente, pois apresentam potencial de utilização na fabricação e obtenção de novos produtos, gerando renda extra ao produtor, como também diminuição da poluição ambiental.

2. APROVEITAMENTO DO BAGAÇO

2.1. Obtenção de bio-óleo

A crescente demanda mundial de energia e a redução de reservas de petróleo levou a um enorme esforço de pesquisa e desenvolvimento de tecnologias para geração de combustíveis renováveis nos últimos 40 anos. Recursos renováveis devem atender a importantes requisitos de disponibilidade, preço, transporte, meio ambiente, e impacto social. A biomassa proveniente da agroindústria, a exemplo do bagaço da cana-de-açúcar, atende à maioria desses requisitos e possui um grande potencial para compensar ou substituir petróleo na produção de energia (OSORIO; CHEJNE, 2019).

A produção de combustíveis líquidos a partir de biomassa é um dos meios mais eficientes de conversão energética, pois além de promover uma concentração de energia há ainda vantagens econômicas e operacionais devido às suas condições de armazenamento e transporte e vantagens ecológicas por tratar-se de um combustível renovável, no qual gera prejuízos ambientais se descartados de forma inadequada (RODRIGUES *et al.,* 2011). A fim de agregar valor a esses subprodutos agroindustriais, vários estudos têm sido realizados, explorando a conversão do bagaço da cana de açúcar em produtos úteis como óleo e carvão através do processo de pirólise (GONÇALVES, PEREIRA; VEIT, 2016).

Entre vários processos termoquímicos, a pirólise rápida é o processo mais adequado para a produção de bio-óleo e se destaca

como a mais promissora para a fabricação de líquidos combustíveis (RODRIGUES *et al*., 2011).

O bio-óleo é uma mistura complexa de compostos orgânicos que contém fragmentos moleculares de sua matéria-prima, biomassa, e, normalmente, precisa ser refinado para outros usos (OSORIO; CHEJNE, 2019).

A biomassa lignocelulósica, como resíduos agrícolas (bagaço da cana de açúcar, por exemplo) são constituídos por água, celulose, hemicelulose, lignina e extrativos, bem como alguns minerais como fósforo, potássio, cálcio, magnésio e sódio. Durante a pirólise rápida, alguns desses minerais são conhecidos por catalisar reações secundárias que afetam os rendimentos dos produtos gerados. O uso de catalisadores para o processo é frequentemente empregado para melhorar a qualidade do bio-óleo durante o processo (OSORIO; CHEJNE, 2019).

Geralmente a pirólise é conduzida em temperaturas altas entre 450 e 650 °C e curto tempo. Dependendo das condições operacionais, no processo rápido de pirólise podem ser formados diferentes produtos, como o carvão, produto sólido; o bio-óleo, produto líquido; e os gases não condensáveis, que são formados como produtos gasosos. Além disso, as condições do processo também afetam o rendimento dos produtos gerados, que podem variar em peso de matéria-prima entre 30 % e 70 % para o bio-óleo, 15 e 50 % para o carvão e 15 e 20 % para gás (RODRIGUES *et al.,* 2011).

As condições de temperatura e tempo de residência dos vapores determinam as proporções de cada fase dos produtos da pirólise. Assim, o controle destes parâmetros permite direcionar

o processo de acordo com o produto final que se deseja obter (RODRIGUES *et al*., 2011).

O bio-óleo produzido a partir do processo de pirólise pode ser usado para a geração de calor e energia e como combustível de transporte. Essa tecnologia é viável industrialmente e possui um baixo custo (GAUTAM; CHAURASIA, 2020).

Assim a pirólise rápida é alvo de várias pesquisas no mundo para a produção de bio-óleos que possam enriquecer a oferta de energia. Contudo, o bio-óleo apresenta propriedades heterogêneas, como por exemplo o teor de umidade, viscosidade, teor de oxigênio, carbono, em função das características da biomassa e das condições dos processos de pirólise (RODRIGUES *et al*., 2011).

2.2. Obtenção de carvão ativado

O aproveitamento do bagaço da cana-de-açúcar gerado na agroindústria sucroalcooleira pode, em diversos aspectos, contribuir para a manutenção do meio ambiente, seja através da utilização de uma matéria-prima gerada em abundância nas usinas, mas também sobretudo na obtenção de agentes adsorventes industriais como o carvão ativado (CA). Sua importância é devida ao seu poder adsortivo, que pode ser empregado em vários processos, como o tratamento de águas, desodorização, purificação de gases, filtros de proteção e suporte catalítico, entre outros (SOARES, 2014).

O CA é um material carbonáceo com uma elevada área superficial específica e porosidade bastante desenvolvida, conferindo a capacidade de adsorver moléculas tanto em fase líquida quanto

gasosa (MACEDO, 2005). Segundo Soares (2014) para garantir sua viabilidade e melhorar a sustentabilidade do processo de obtenção pode se utilizar agentes precursores alternativos que possuem um elevado teor de carbono em sua composição, além de serem matérias-primas abundantes, baratas, facilmente ativadas e apresentarem baixa degradação por envelhecimento (MORENO-CASTILLA; RIVERA-UTRILLA, 2001, apud ABREU, 2013). Destacam-se os agentes precursores oriundos de cascas de coco, grãos de café, babaçu, madeira, carvões minerais, bagaço de cana-de-açúcar, entre outros. Dentre estes, o bagaço tem sido sugerido, devido a sua composição química composta por celulose, hemicelulose e lignina, sendo esta última a principal responsável pela formação de carvão em processos pirolíticos (LOHMANN, 2001, *apud* SOARES, 2014).

Pode-se encontrar o CA comercial em forma de grãos ou pulverizado. Embora existam muitos tipos de adsorventes já testados em tratamento de fase aquosa, os carvões dos tipos granular e em pó são ainda os mais utilizados (DIAS *et al*., 2007).

O carvão obtido de cana-de-açúcar e ativado com cloreto de zinco demonstrou ser um potencial adsorvente alternativo para o tratamento de efluentes contendo íons cádmio (Cd^{2+}) e cobre(Cu^{2+}) (ABREU *et. al*., 2015). Segundo os autores, o CA produzido a partir de bagaço demonstrou que sua capacidade de adsorção é similar aoCA comercial granular se tratando da adsorção do Cd^{2+}. Em relação ao Cu^{2+}, a quantidade adsorvida pelo CA de bagaço no equilíbrio foi superior à adsorvida pelo comercial. Pastilhas de carvão de bagaço de cana-de-açúcar ativadas com ácido fosfórico (H_3PO_4) podem ser utilizadas na clarificação do caldo de cana-de-açúcar (ANDRADE, 2016).

Como visto, além dessas aplicações podem ser utilizados em diversas áreas, como alimentícia, farmacêutica, química, petrolífera, nuclear, tratamento de água e do ar atmosférico, constituindo assim um material de bastante interesse econômico (MUSSATTO; ROBERTO, 2004 apud COUTO, 2009).

2.3. Nutrição animal

O alto custo na alimentação animal, aliado a escassez de alimentos volumosos em períodos de estiagem, principalmente em regiões semiáridas, contribuem com as perdas na agropecuária.

Uma alternativa bastante viável é o fornecimento da biomassa oriunda da colheita e moagem da cana-de-açúcar provenientes das usinas produtoras de açúcar e etanol. Estima-se que 10 % da produção nacional de cana-de-açúcar seja destinada diretamente para a alimentação animal. A fração de açúcares solúveis da cana contribui com a maior parte da energia obtida neste alimento, entretanto, enquanto os açúcares são rapidamente fermentados no rúmen, os carboidratos estruturais são utilizados lentamente (LANDELL *et al*., 2002).

A utilização desta gramínea na alimentação de ruminantes, especialmente em animais em fase de baixa produção, é uma prática interessante, considerando sua disponibilidade no período crítico de escassez de alimento, que pode coincidir com o período de safra da cana, como ocorre na região Nordeste do Brasil (CARVALHO *et al*., 2006). Desta forma, reduz ou substitui a utilização de volumosos

conservados, como silagens e fenos, que por seus custos elevados de produção, muitas vezes, não está ao alcance de pequenos produtores.

O alto teor de fibra presente no bagaço e a natureza dessa fibra constitui em um alimento de baixo valor energético (CARVALHO *et al*., 2005). Mesmo assim, pode ser incluído na alimentação de ruminantes, principalmente para correção da deficiência em fibras, naqueles animais que se alimentam com reduzidos teores delas (BRANDÃO *et al*., 2003).

Com base na análise de vários trabalhos que avaliaram a composição química do bagaço de cana-de-açúcar in natura, Soares e colaboradores (2015) compilaram os dados e obtiveram os seguintes resultados em média: 65,6% da matéria seca; 1,9% baixo valor proteico; extrato etéreo média de 1%, cinzas em torno de 1,66%, entretanto, 80,25%, de fibra em detergente neutro (FDN), 52,60% de fibra em detergente ácido (FDA), hemicelulose, celulose e lignina com média de 25,40%, 37,92%, 11,0% respectivamente.

Apesar do bagaço constituir-se como uma excelente alternativa de alimento volumoso, a alta concentração de fibras na sua composição, além da baixa digestibilidade, impedem a degradação microbiana no rúmen, tornando os nutrientes menos disponíveis. Para corrigir e até melhorar essa disponibilidade são sugeridos diversos tratamentos físicos e químicos (CARVALHO *et al*., 2006; PIRES *et al*., 2006).

Como tratamento físico podemos citar a utilização de altas temperaturas e vapor sob pressão, podendo ser realizado na própria usina. Após o tratamento, o bagaço é denominado de auto hidrolisado. Já o tratamento químico pode utilizar produtos químicos como o

hidróxido de sódio (NaOH), óxido de cálcio (CaO), uréia, amônia, entre outros (SOARES *et al*., 2016).

A partir dessas informações, o bagaço de cana-de-açúcar, amplamente encontrado no setor sucroenergético, tem a capacidade de atuar na alimentação animal, garantindo aos produtores pecuaristas uma solução prática e econômica no fornecimento de alimentos. Além disso, esse tipo de utilização contribui com o seu aproveitamento e destinação final, beneficiando o meio ambiente como um todo.

2.4. Bioplástico

A sociedade está caminhando para uma economia circular baseada em bio, ou seja, utilização de materiais biológicos e biodegradáveis para fabricação de diversos produtos, tendo como foco principal a utilização apropriada e sustentável de recursos renováveis (TELLES *et al*., 2011).

A economia de base biológica requer uma utilização sustentável dos recursos para a produção de uma variedade de produtos, incluindo celulose, papel, produtos químicos, biocombustível e bioplásticos. Os plásticos convencionais são produzidos, principalmente, a partir de matérias-primas provenientes do petróleo, um recurso natural não renovável.

Assim, inserido no contexto atual de preocupaçãocrescente com o meio ambiente, tem-se o bioplástico, um material produzido a partir de matéria-prima renovável e que, quando descartado em condições que favorecem o processo da sua decomposição, integra-

se mais rápido à natureza do que os plásticos convencionais (TELLES *et al*., 2011).

Os bioplásticos são considerados altamente significativos para aumentar a sustentabilidade, que é definida como um equilíbrio entre fatores econômicos, ambientais e aspectos sociais, podendo ser aplicada a diferentes domínios (YADAV *et al*., 2020).

Eles podem ser produzidos a partir de recursos renováveis, como o milho, a cana de açúcar e os resíduos de óleos e gorduras. Embora obioplástico seja caracterizado por ser produzido a partir de um recurso renovável, estes não são, necessariamente, biodegradáveis (BRODIN *et al*., 2017).

Atualmente, vários tipos de bioplásticos são produzidos industrialmente, competindo em desempenho e preço com o plástico convencional. Contudo, também existe um grande interesse em utilizar culturas não alimentares, como os materiais lignocelulósicos, que têm um potencial para substituir plásticos e materiais, tradicionalmente baseados em recursos fósseis. Isto é importante, pois o desenvolvimento de materiais renováveis e de base biológica de alto desempenho é um fator para o crescimento sustentável da indústria (BRODIN *et al*., 2017).

Os materiais lignocelulósicos fornecem matérias-primas para produção de fibras celulósicas, nanofibras, lignina e biopolímeros, com uma gama de aplicações industriais, como, por exemplo, os produtos de papel, biocompósitos, modificadores reológicos, aditivos alimentares, biocombustível e produção de bioenergia. Além disso, os bioplásticos têm atraído grande atenção como potencial substituição de produtos plásticos convencionais (BRODIN *et al*., 2017).

No que se refere a estudos científicos, um exemplo nessa área é o polímero polihidroxibutirato (PHB), que pode ser fabricado a partir do bagaço da cana-de-açúcar. Este polímero é obtido por meio da ação de bactérias que se alimentam do bagaço e formam o polímero no interior celular. O PHB pode ser usado na fabricação de vasos, colheres e sacolas plásticas, entre outros objetos (TELLES *et al*., 2011).

Outro grupo de poliésteres é opoli-hidroxialcanoato (PHA) que se revelam uma excelente solução devido à sua biodegradabilidade, propriedades termoplástica e mecânica. Os PHAs podem ser produzidos por numerosas bactérias, cepas que utilizam fontes renováveis, sob certas condições desfavoráveis como excesso de carbono e limitação de nitrogênio, oxigênio ou fósforo para reprodução. As propriedades desejadas podem ser alcançadas através da escolha do substrato, cepas bacterianas e condições de fermentação (YADAV *et al*., 2020).

Os recursos renováveis têm se tornado cada vez mais importantes para a indústria de transformação, à medida que as reservas de petróleo diminuem e a indústria sustentável se torna uma preocupação (YU, 2007). A utilização de várias matérias-primas naturais e renováveis, tais como óleo de mamona, cana-de-açúcar, beterraba, ácido lático, milho e proteína de soja, têm sido testadas na produção de bioplásticos. Um estudo que proporcionou resultados satisfatórios foi o que explorou a produção do PHB, a partir da cana-de-açúcar (TELLES *et al*., 2011).

O interesse em desenvolver produtos de base biológica e ambiental aumentou nos últimos tempos devido às preocupações

ambientais crescentes e por contribuir para a redução do impacto ambiental dos combustíveis fósseis e, assim, desenvolver a bioeconomia do futuro (BRODIN *et al*., 2017). O sucesso da economia de base biológica depende de vários aspectos, incluindo aumento de produtividade, eficiência na reciclagem, investimentos em inovação, desenvolvimento de tecnologia, acesso ao capital, políticas estáveis de apoio e oportunidades de mercado (BRODIN *et al*., 2017).

2.5. Película biológica

A sacarose da cana-de-açúcar vem sendo estudada ao longo dos anos por suas propriedades terapêuticas ressaltadas na bibliografia especializada e na crença popular, como sendo um produto de baixo custo e da fácil aquisição, com utilização eficaz em tratamento de feridas em humanos e animais. A sacarose da cana-de-açúcar quando aplicada diretamente em feridas cutâneas estimula a cicatrização e o efeito bactericida (MONTEIRO, 2011).

A busca por tratamentos alternativos de feridas cutâneas tem sido intensificada. Nesse âmbito, destaca-se a tecnologia de produção de membranas, que tem se desenvolvido nos últimos anos em diversos nichos industriais com diversas aplicações como os setores farmacêuticos, alimentícios, tratamento de resíduos, químicos, entre outros. Um diferencial da tecnologia de membranas é o fato delas não apresentarem citotoxicidade, sendo uma excelente alternativa no emprego como matéria-prima alternativa na produção de novos materiais, particularmente aqueles que poderão ser empregados na área médica (SOUZA *et al*., 2015).

Dentre as películas biológicas, destaca-se a película do biopolímero de cana-de-açúcar. Esse biomaterial é uma película de origem vegetal, extraída da cana-de-açúcar, que é composta por microfibras de hemicelulose e obtida por meio de processamento biológico. Suas principais propriedades terapêuticas são as funções anti-inflamatória, cicatrizante, sedativa, hipotensora, antibiótica e antisséptica, fornecendo ao microambiente uma reparação tecidual rápida e adequada com uma qualidade estética e funcional (MONTEIRO, 2011; SOUZA *etal.,* 2016).

Desenvolvida no Brasil, a película Veloderm® de origem vegetal (cana-de-açúcar) é composta por microfibras de hemicelulose, obtida por meio de processo biotecnológico com o uso de culturas de microrganismos: *Acetobacterxylinun*, *Saccharomyces cerevisiae* e *S. pombe* (DOMINGUES MÖRSCHBÄCHER, *et al.,* 2011; SOUZA *et al*., 2015). Deste modo, sugere-se que a película por se tratar de um filme translúcido, pode ser visualizada diariamente na recuperação das feridas sem que haja a sua remoção, evitando assim, abrasões na pele.

Sua aplicação em feridas cutâneas foi estudada nos últimos anos em animais e humanos. Tanto em animais quanto em humanos, os ensaios clínicos concluíram que o uso dessas películas foram eficazes e proporcionaram a completa cicatrização do local, com destaque para o tempo de cicatrização menor que às feridas de igual porte que foram tratadas com terapêutica convencional à base de limpeza e produtos cicatrizantes (MONTEIRO, 2011; DOMINGUES MÖRSCHBÄCHER, *et al.,* 2011; SOUZA *etal*., 2016). Diante das informações sobre a utilização desta película em pacientes hospitalizados é perceptível sua contribuição na redução do tempo de

permanência destes em ambiente hospitalar. Isso pode ser atribuído, principalmente, a rapidez do processo de cicatrização e regeneração do tecido. Como pode ser observado, o aproveitamento de resíduos da cana-de-açúcar pode atuar em diferentes setores como a área médica, por meio da obtenção de películas biológicas.

2.6. Asfalto

A maior parte do transporte de cargas e de passageiros no Brasil está concentrada nas rodovias. Atualmente, sua participação está estimada em mais de 60% e, devido a esse número, é necessário que sua manutenção seja eficaz, o que exige a implementação de técnicas econômicas eficientes na sua elaboração (CNT, 2018).

Nas últimas décadas, houve um acréscimo expressivo do fluxo de veículos, além disso, o porte e a capacidade dos caminhões aumentaram, elevando assim, a demanda por essa infraestrutura. Devido a isso, é necessário investir ainda mais em pavimentos resistentes e de qualidade para que o setor de transporte rodoviário melhore seu desempenho (CNT, 2019).

Importante componente dos pavimentos, o asfalto, tem função essencial para garantir rodovias em bom estado de conservação, já que ele é utilizado em mais de 99% dos trechos pavimentados no país (CNT, 2019). Os pavimentos são estruturas de múltiplas camadas, sendo o revestimento asfáltico formado por uma mistura de agregados e ligantes asfálticos, que recebem diretamente as cargas do tráfego e distribui para as demais camadas (NASCIMENTO; SOUSA, 2018).

O Stone Matrix Asphalt (SMA) surgiu na Alemanha e tem sido utilizado na Europa bem como na América do Norte. Desde 1960, o SMA foi desenvolvido na Alemanha e usado na Europa há mais de vinte anos para fornecer melhor resistência ao sulco e ao desgaste do pneu com pregos (İSKENDER, 2013). Alguns autores relatam que a utilização do SMA se dá em vias de tráfego intenso, pesado, pistas de aeroportos, pátio de portos e vias urbanas, devido à alta resistência e durabilidade, auxiliando na aderência em pista molhada, na diminuição efetiva do spray ou borrifo de água, na redução da reflexão de luzes de faróis em noites chuvosas e na redução de ruídos nas áreas lindeiras à via. Devido a estas características, este tipo de asfalto é uma excelente alternativa para elevar o desempenho dos pavimentos (CASTRO; LEAL, 2012).

A composição da mistura asfáltica do tipo SMA se dá por agregado graúdo, agregado miúdo, fíler e fibra de celulose, sendo que esta última proporciona à mistura uma maior resistência ao envelhecimento, pelo seu maior envolvimento com o ligante asfáltico e a prevenção do escorrimento, evitando assim a exsudação do material (NASCIMENTO; SOUSA, 2018).

Normalmente, uma fibra sintética alemã é usada como aditivo estabilizante na mistura do SMA. No entanto, a fibra sintética alemã importada é muito cara e, para superar esse problema, outras fontes de fibra, que são de baixo custo e ecológicas, foram introduzidas. Atualmente, a fibra natural é amplamente utilizada para substituir a fibra sintética nas misturas (ARSHAD *et al*., 2016).

O bagaço é uma fibra vegetal natural constituída principalmente por celulose, que é um polímero de glicose com

módulo de elasticidade relativamente alto, frequentemente encontrado como componente fibrilar de muitos compósitos (madeira, palha de cana-de-açúcar e bagaço), em associação com lignina e hemicelulose (ARSHAD *et al*., 2016).

A análise do uso da fibra do bagaço de cana-de-açúcar em mistura asfáltica do tipo SMA foi realizada no Estado de Sergipe por Santana *et al*. (2018), adotando-se o valor médio da faixa sugerida, ou seja, 0,4% de fibra do bagaço de cana-de-açúcar. Os autores verificaram que o uso de fibras do bagaço da cana-de-açúcar em substituição às fibras convencionais de celulose é promissor em misturas asfálticas do tipo SMA e seu emprego deve ser incentivado. Além disso, salientam a necessidade de outras misturas asfálticas serem testadas empregando-se a fibra alternativa analisada.

Castro e Leal (2012) afirmam que a utilização do bagaço de cana-de-açúcar contribui para a preservação do meio ambiente e seu uso pode reduzir o custo de produção do revestimento asfáltico, além de poder ser uma alternativa viável à sua substituição da fibra de celulose, permitindo características mecânicas semelhantes.

De acordo com a Alcardes (2016), o bagaço da cana-de-açúcar constitui-se em um dos mais importantes subprodutos para a indústria sucroalcooleira, pela proporção em que é produzido e devido a sua composição. Portanto, a utilização de fibra de bagaço de cana na mistura SMA é considerada uma nova alternativa da indústria de construção, por produzir estradas com maior durabilidade do pavimento e com custo mínimo.

3. APROVEITAMENTO DE CINZAS

Com a elevada demanda de consumo e crescimento populacional, torna-se cada vez mais necessário a extração/produção de matérias-primas da natureza. Sua extração/produção necessita de grande quantidade de energia para serem geradas, o que causa a emissão de gases nocivos ao meio ambiente. Como consequência desse consumo, há o aumento na geração de resíduos, acarretando a necessidade de áreas cada vez maiores para a disposição final dos mesmos, ressaltando que tal disposição deve atender diversas legislações vigentes (LOPES *et al*., 2014).

Resíduos agroindustriais, como casca de arroz, folhas e bagaço de cana-de-açúcar, folhas de bambu, espiga de milho, folhas de bananeira, entre outros, são comumente usados como combustível para geração de eletricidade e sua calcinação produz cinzas, que, finamente moídas, podem ser usadas como substituto parcial do cimento, uma vez que podem aumentar as propriedades físicas e mecânicas desses materiais (ANDREÃO *et al*., 2019; RODIER *et al*., 2019).

Durante a extração do caldo da cana-de-açúcar é gerada grande quantidade de bagaço (aproximadamente 30%), biomassa de grande importância como fonte energética. Cerca de 95 % de todo o bagaço produzido no Brasil são queimados em caldeiras para geração de vapor, principalmente para a própria indústria sucroalcooleira, gerando, como resíduo, a cinza de bagaço (PAULA *et al*., 2009). A utilização de cinza de bagaço de cana-de-açúcar como material suplementar ao cimento visa minimizar a retirada de calcário da natureza, reduzir a emissão de gás carbônico, preservar reservatórios

naturais, o que acarreta na redução dos impactos ambientais causados pela indústria do cimento (LOPES *et al*., 2014).

O uso da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) como material de substituição parcial do cimento e/ou argamassa, apresenta uma excelente opção para a destinação deste resíduo, cuja tendência de produção é aumentar a cada ano, em decorrência da ampliação do setor de produção sucroalcooleiro (PAULA *et al*., 2009).

Com a reciclagem de resíduos, existe a diminuição da necessidade de extração de matérias-primas, do consumo de energia, dos custos de transporte e do volume de aterros, gerando então uma redução do impacto ambiental causado pela construção civil (LOPES *et al*., 2014).

A extração de materiais em rios (areias) vem sendo reprovada por diversos setores da sociedade em função dos desequilíbrios ambientais e sociais resultantes dessas atividades, além da preocupação com a escassez destes recursos devido à sua constante e crescente extração. Com isso, a redução do consumo de recursos naturais, associado ao aquecimento observado no setor da construção civil, nos mostra a necessidade de pesquisas que visem à busca de materiais alternativos, principalmente àqueles descartados na natureza, a fim de minimizar os impactos negativos resultantes desses processos, como podemos citar: remoção da vegetação às margens dos leitos, erosão e assoreamento, alteração da qualidade das águas superficiais e do nível do lençol freático, alteração da qualidade do ar, do solo e sonora, perda de espécies terrestres e aquáticas, proliferação de vetores, dentre outras (VANDERLEI *et al*., 2014).

Neste contexto, reforça-se a necessidade da elaboração de pesquisas que visem a utilização de materiais alternativos (resíduos), na produção de argamassas e concretos, o que contribuirá com a diminuição da extração deste recurso da natureza (VANDERLEI *et al*., 2014).

4. APROVEITAMENTO DAS LEVEDURAS

O setor sucroalcooleiro no Brasil é considerado um dos mais importantes e representativos da cultura agrícola brasileira (ROCHA; PANDOLFI, 2019), e, dentre os subprodutos gerados, podemos destacar a biomassa microbiana ou levedura de cana (LOPES *etal.,* 2015).

Esse subproduto é gerado através da etapa de sangria, onde é realizado o esgotamento de cerca de 20 % do fermento, após a etapa de centrifugação. Essa etapa se faz necessária, uma vez que o excesso de fermento, além de não contribuir para o aumento de produção de álcool, ainda contribui para o aumento do consumo de insumos, ineficiência no tratamento de fermento e de aumento de processos infecciosos pela maior oferta de aminoácidos (BLUMER, 2002).

A levedura de cana ou biomassa úmida possui em sua composição carboidratos, lipídeos e uma grande quantidade de aminoácidos, o que classifica esse subproduto como uma fonte proteica de alto valor biológico e alta digestibilidade (87 %), quando comparado com o ovo de galinha (96 %). As leveduras também se destacam pela grande quantidade de vitaminas do complexo B, principalmente tiamina (B1), riboflavina (B2), niacina (B3) e ácido pantotênico (B5). Apresentam ainda uma quantidade razoável de

ergosterol, o que as tornam uma excelente fonte de vitamina D e minerais como zinco, ferro, cálcio e magnésio (ARAÚJO *et. al.,* 2009; SOARES; MONASSA, 2014; MEDRI; PEREIRA; LEONHARDT, 2018). Essa composição química e seu valor nutritivo podem variar, pois é resultante dos insumos e das condições técnicas utilizadas no processo (BLUMER, 2002; LOPES *etal*, 2015).

Além do seu alto poder biológico, a levedura de cana pode ser considerada uma fonte proteica promissora por diversos fatores como o rápido crescimento do microrganismo; a possibilidade de diferentes substratos, como resíduos, contribuindo com a preservação do meio ambiente; as condições climáticas não influenciam na produtividade; o processo de produção pode ser contínuo; substitui a proteína vegetal de alto custo e não possui características patogênicas (ARAÚJO *etal*., 2009; YAMADA *et al.,* 2010; PINTO; LOPES; CARVALHO FILHO, 2013).

Levando em consideração o alto valor nutricional da levedura de cana proveniente de processos fermentativos, estudos vêm sendo realizados ao longo dos anos com o intuito de construir referências para melhor aproveitamento desse subproduto em alimentos alternativos e processos biotecnológicos para serem usados na alimentação humana e animal (ARAÚJO *et al.,* 2009).

4.1 Na alimentação animal

O custo elevado dos suplementos proteicos vegetais, a grande quantidade de leveduras produzidas em processos fermentativos e o alto valor biológico dessas leveduras, têm despertado nos últimos anos, grande interesse pelo aproveitamento de alimentos

não convencionais no Brasil, destacando as fontes de proteínas unicelulares como fungos, bactérias e algas na alimentação de animais (ARAÚJO *etal.,* 2009; SOARES; MONASSA, 2014).

A utilização de leveduras nas dietas dos animais resulta em interações benéficas entre a microflora, o intestino e o sistema imunológico. Aliado a esses benefícios, nos últimos anos, estudos apresentam as leveduras também como potenciais substitutos do uso de antibióticos e quimioterápicos, em rações. Por ser uma boa fonte de vitaminas do complexo B, ela auxilia no alívio do estresse natural das criações devido a atividades diárias, tais como vacinações, desmames e transporte (HISANO, 2018; ARAÚJO *etal.,* 2009).

Outro atrativo no seu uso em rações, é o fato de reduzir os custos de produção e melhorar a palatabilidade devido a presença de ácido glutâmico na sua composição (ARAÚJO *et al.,* 2009; FREITAS *et al.,* 2013).

O extrato de levedura seco obtido após centrifugação e secagem apresenta resultados positivos em substituição em rações animais. Em rações formuladas para peixes houve melhoria na digestibilidade das rações (HISANO, 2008).

Para frangos de corte, a substituição da proteína vegetal na ração, geralmente oriunda da soja, por levedura seca proveniente de processos fermentativos, obteve resultados positivos em relação ao custo de produção e aproveitamento energético, não acarretando em perdas de rendimento das criações (FREITAS *et al*., 2013; LOPES *et al.,* 2015).

Em relação às rações destinadas a nutrição de bovinos, a utilização de leveduras resulta em respostas positivas quanto ao

aumento da produção de leite e no ganho de peso das criações (ARAÚJO *et al*., 2009).

4.2 Na alimentação humana

Estudos ao longo dos últimos anos apontam o potencial do uso da levedura e derivados provenientes de processos fermentativos na alimentação humana, contribuindo para agregar valor nutricional na indústria alimentícia.

O uso da levedura seca de forma íntegra em processamento de alimentos é geralmente limitado, uma vez que suas características sensoriais não são atraentes. Entretanto, as leveduras provenientes dos processos fermentativos são mais atrativas para uso em formulações destinadas a alimentação humana, devido ao processo autólise, sofrido durante a fermentação, sendo o concentrado proteico e a levedura seca, os principais produtos obtidos (BLUMER, 2002; YAMADA *et al*., 2010).

Atualmente a levedura vem sendo utilizada na produção de salames, na produção de enzimas, de complementos nutritivos, de vitaminas, de ácidos nucléicos, de nucleotídeos, de lipídios e na função de flavorizante e realçador de sabor em substituição do glutamato monossódico ou em combinação com o caldo de carne, devido à riqueza em ácido glutâmico que ela possui. No processamento cárneo, o uso do extrato de levedura é visto como uma alternativa para redução do sódio nos produtos, na medida que um produto pode ser melhorado pelo uso do extrato de levedura em substituição do sódio, sem perder o sabor do sal característico do realçador de

sabor (YAMADA *et al.,* 2010; PINTO; LOPES; CARVALHO FILHO, 2013; SOARES; MONASSA, 2014).

5. APROVEITAMENTO DA TORTA DE FILTRO

Nas indústrias existem sempre desafios relacionados ao descarte dos resíduos gerados nos seus processos de produção, por gerar problemas quando estes são descartados no ambiente, afetando os recursos naturais. Atualmente tornou-se uma vantagem econômica utilizar esses resíduos, pois estes podem gerar benefícios significativos tanto para o produtor quanto ao meio ambiente (MARCELINO, 2012).

Diversos materiais são obtidos a partir da produção de açúcar e álcool em uma indústria sucroalcooleira. Entretanto, os estudos relacionados à composição e seus possíveis usos em lavouras possibilitou sua utilização na forma de adubos organo-minerais e fertirrigantes, proporcionando relevante economia na adubação de canaviais, além de redução da poluição ambiental que estes recursos podem causar (ROSSETTO; SANTIAGO, 2018).

Um desses resíduos gerados na indústria sucroalcooleira é a torta de filtro, que representava um problema, e passou a fazer parte da adubação de plantio dos canaviais, pois nela há também parte dos resíduos minerais e palha provenientes da colheita e moagem da cana. A análise do material revelou uma concentração de fósforo que se tornou atrativa para o uso como adubo. Hoje é integralmente utilizada, enriquecida com outros produtos e está na operação de plantio das empresas (MARCELINO, 2012).

A torta de filtro é um importante resíduo da indústria sucroalcooleira, proveniente da filtração do caldo extraído das moendas no filtro rotativo. Antigamente, era um resíduo obtido apenas na produção do açúcar, mas, atualmente, as novas unidades alcooleiras introduziram o filtro rotativo e, assim, também obtém o resíduo torta de filtro (ROSSETTO; SANTIAGO, 2018).

Ela se trata de um resíduo composto da mistura de bagaço moído e lodo da decantação, e é um excelente produto orgânico para a recuperação de solos esgotados ou de baixa fertilidade. Com 75 % de umidade, em média, a torta de filtro também apresenta altos teores de matéria orgânica e fósforo (principal componente na adubação), além de ser rica em nitrogênio e cálcio e possuir teores consideráveis de potássio, magnésio e outros micronutrientes (MARCELINO, 2012).

De acordo com Bernadino*et al*. (2018), a torta de filtro possui um efeito positivo no melhoramento das propriedades físicas do solo, atribuídas à sua maior retenção de água, ocasionada pela adição da matéria orgânica no solo.

A concentração da torta de filtro é constituída de cerca de 1,2 a 1,8% de fósforo, que juntamente com o teor de umidade, é importante para garantir a brotação da cana em plantios feitos em épocas de inverno nas Região Sul e Sudeste. A torta também apresenta alto teor de cálcio e consideráveis quantidades de micronutrientes (ROSSETTO; SANTIAGO, 2018).

Aproximadamente 50 % do fósforo da torta pode ser considerado prontamente disponível. O restante será mineralizado mais lentamente. A adubação acrescida de fósforo é muito importante na qualidade da cana-de-açúcar, pois sua presença no caldo da

cana exerce papel essencial no processo de clarificação. Caldos que apresentam baixos teores de fósforo exibem dificuldade no processo de floculação, se tornando um ponto negativo durante o processo. Caldo turvo e de coloração intensa implica na produção de açúcar de pior qualidade e, portanto, de menor valor comercial (MARCELINO, 2012).

Segundo Bernadino*et al*. (2018) os principais benefícios do uso da torta de filtro são:

a. auxiliar na retenção de água;

b. reduzida perda dos nutrientes por lixiviação, permitindo que eles que estejam disponíveis com a mineralização da matéria orgânica;

c. durante a mineralização da torta, os microrganismos produzem substâncias quelantes e complexantes que podem reduzir a fixação do fósforo no solo e também podem produzir substâncias promotoras de crescimento radicular;

d. quando utilizada logo após sua produção na indústria, nos sulcos de plantio, o teor de água da torta é elevado, sendo importante para a brotação das gemas de cana. Também o calor desprendido durante a decomposição da torta no fundo do sulco pode favorecer a brotação, principalmente em plantios realizados no inverno.

A elaboração da compostagem da torta de filtro adicionando gesso, cinzas de caldeiras e palhada, tem agregado valor à torta de filtro, melhorando sua concentração em nutrientes e reduzindo sua umidade, o que pode ser vantajoso para o transporte a distâncias maiores e desvantajoso para plantios em épocas de estiagem (ARROZ, 2018).

Portanto, a disponibilidade e o alto teor de matéria orgânica da torta de filtro mostram sua potencialidade no aproveitamento de diversas maneiras, e suas diversas possibilidades de aplicação (BERNADINO *et al*., 2018).

6. REFERÊNCIAS

ABREU, M. B.; ANDRADE, J. R.; TURBIANI, F. R. B.; GIMENES, M. L.; FERNANDES-MACHADO, N. R. C.; SEIXAS, F. L. Aplicação de carvão ativado de bagaço de cana-de-açúcar na adsorção de Cd(II) e Cu(II). In.: **Anais do XXXVII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados** – **ENEMP**, p. 1318-1327.São Paulo: Blucher,2015.

ANDRADE, K. A. A. C. **Clarificação do caldo de cana por meio de carvões ativados feitos a partir do bagaço da cana-de-açúcar submetidos a tratamentos superciais físicos e químicos.**2016.49 p. Trabalho de Conclusão de Curso.Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016.

ANDREÃO, P. V.; SULEIMAN, A. R.; CORDEIRO, G. C.; NEHDI, M. L. Sustainable use of sugarcane bagasse ash in cement-based materials. **Green Materials,** v. 7, p. 61-70, 2019.

ALCARDES, A. R. **Cana-de-açúcar**. Brasília, DF, 2012. Disponível em: www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-deacucar/ arvore/ CONTAG01_108_22122006154841.html. Acesso em: 7 abr. 2020.

ARAÚJO, L. F. *et al*. Enriquecimento protéico de alimentos por levedura em fermentação semissólida: alternativa na alimentação animal. **Tecnologia & Ciência Agropecuária,** João Pessoa, v. 3, p. 47-53, 2009.

ARSHAD, A. K.; MANSOR, S.; SHAFIE, E.; HASHIM, W. Performance Of Stone Mastic Asphalt Mix Using Selected Fibres. **JurnalTeknologi**, p. 99-103, 2016.

BERNARDINO, C. A. R.; MAHLER, C. F.; VELOSO, M. C. C.; ROMEIRO, G. A.; SCHROEDER, P. Torta de Filtro, Resíduo da Indústria Sucroalcooleira - Uma Avaliação por Pirólise Lenta. **Revista Virtual de Química**, v. 10, p. 551- 573, 2018.

BLUMER, S. A. G. **Enriquecimento com ferro em levedura *Saccharomyces cerevisiae***. 2002. Tese (Doutorado em Ciências e Tecnologia de Alimentos). 66p. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

BRANDÃO, T. L.; ANDRADE, M.; VERAS, A. S. C.; MELO, A. A. S.; ANDRADE, D. K. B. Níveis de bagaço de cana e uréia como substituto ao farelo de soja em dietas para bovinos leiteiros em crescimento. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 32, p.760-767. 2003.

BRODIN, M.; VALLEJOS, M.; OPEDAL, M. T.; AREA, M. C.; CHINGA-CARRASCO, G. Lignocellulosics as sustainableresources for productionofbioplastics - A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 162, p. 646-664, 2017.

CARVALHO, G. G. P.; PIRES, A. J. V.; VELOSO, C. M.; MAGALHÃES, A. F.; FREIRE, M. A. L.; SILVA, F. F.; SILVA, R. R.; CARVALHO, B. M. A. Valor nutritivo do bagaço de cana-de-açúcar amonizado com quatro doses de uréia. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, n.1, p.125-132, 2006.

CARVALHO, M. C., FERREIRA, M. A.; CAVALCANTI, C. V. A.; LIMA, L. E.; SILVA, F. M.; MIRANDA, K. F.; VÉRAS, A. S. C.; MARCILIO DE AZEVEDO, M.; VIEIRA, C. F. Associação do bagaço de cana-de-açúcar, palma forrageira e uréia com diferentes suplementos em dietas para novilhas da raça holandesa. **Acta Scientiarum. Animal Science**, v. 27, p. 247-252. 2005.

Boletim Estatístico 2017. Confederação nacional dos transportes, serviço nacional, serviço social do transporte, serviço nacional de aprendizagem do

transporte, Brasília-DF, 2017.
Disponível em: http://www.cnt.org.br. Acesso em: mar. 2020.

COUTO, G. M. **Utilização da serragem de *Eucalyptus* sp. na preparação de carvões ativados**. 2009. 115 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira). Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

CRUZ, S.H. Bagaço e palha da cana são fontes de celulose para gerar álcool. **Visão Agrícola**, n.8, p. 13-14, 2008.

DIAS, J. M.; ALVIM-FERRAZ, M. C. M.; ALMEIDA, M. F.; RIVERA-UTRILLA, J.; SÁNCHES-POLO, M. Waste materials for activated carbon preparation and its usein aqueous-phase treatment: A review. **Journal of Environmental Management**, v. 85, p. 833–846. 2007.

FREITAS, E. R. et. al. Substituição do farelo de soja pelo farelo de coco em rações contendo farelo da castanha de caju para frangos de corte. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 40, p. 1006-1013, 2011.

GAUTAM, N.; CHAURASIA, A. Study on kinetics and bio-oil production from rice husk, rice straw, bamboo, sugarcane bagasse and neem bark in a fixed-bed pyrolysis process. **Energy**, v. 190, p. 434-447, 2020.

GONÇALVES, G.; PEREIRA, N.; VEIT, M. Production of bio-oil and activated carbon from sugarcane bagasse and molasses. **Biomass and Bioenergy**, p. 178-186, 2016.

HISANO, H.*et al*. Digestibilidade aparente de rações contendo levedura íntegra, levedura autolisada e parede celular pela tilápia do Nilo. **Boletim do Instituto de Pesca**, v. 34, p. 281-287, 2018.

İSKENDER, E. Rutting evaluation of stone mastic asphalt for basalt and basalt–limestone aggregate combinations. **Composites: Part B**, v. 54, p. 255-264, 2013.

LEAL, C. L. D.; CASTRO, P. F. Construção de um Trecho Experimental em SMA usando bagaço de cana-de-açúcar como aditivo. **Vértices**, v. 14, p. 71-84, 2012.

LOPES, B. C. S; BRITTO, A. F. S. de; SARMENTO, A. P.; DELALIBERA, R. G. Análise da viabilidade da utilização da cinza de bagaço de cana-de-açúcar como

substituição parcial do cimento portland. **REEC – Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 9, p. 32-40, 2014.

LOPES, C. C. *et al*. Energia metabolizável da levedura de cana-de-açúcar submetida a diferentes temperaturas e tempos de secagem para frangos de corte e poedeiras. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 67, p. 1711-1720, 2015.

LOPES, Daiane Rodrigues *et al*. Associação de membrana biológica de hemicelulose com pomada de estimulação da epitelização: Relato de caso. **Revista Brasileira de Queimaduras**, v. 15, p. 283-286, 2016.

MACEDO, J. S. **Aproveitamento dos resíduos do beneficiamento de fibras de coco na obtenção de um eco-material: carbono ativado mesoporoso.**2005. 73 p.Dissertação (Mestrado em Química).Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2005.

MARCELINO, D. A**. Atributos químicos do solo adubado com torta de filtro e fósforo mineral em diferentes proporções**. 2012. 40p. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade do Oeste Paulista, Presidente Prudente, 2012

MEDRI, V.; PEREIRA, G. V.; LEONHARDT, J. H. Crescimento de tilápia do nilo (*Oreochromisniloticus*) alimentada com diferentes níveis de leveduras alcooleira, alocada em tanque-rede. **Boletim do Instituto de Pesca**, v. 25, p. 51-59, 2018.

MONTEIRO, V. L. C. Cana-de-açúcar no tratamento de feridas cutâneas por segunda ou terceira intenção. **Medicina veterinária** (UFRPE), v. 1, p. 1-8, 2011.

MÖRSCHBÄCHER, P. *et al*. Uso de membrana biológica de hemicelulose (Veloderm®) e pomada de calêndula (Calendulaofficinalis) como adjuvante na cicatrização músculocutânea em um cão. **Veterinária e Zootecnia**, v. 18, p. 366-370, 2011.

NASCIMENTO, C. C. B., SOUSA, J.R.**Estudo do desempenho de uma mistura asfáltica SMA com adição de bagaço de cana-de-açúcar**. 2018. 79p. Trabalho de conclusão do curso(Graduação em Engenharia de Transportes). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Goiânia, 2018.

OSÓRIO, J.; CHEJNE, F. Bio-Oil Production in Fluidized Bed Reactor at Pilot Plant from Sugarcane Bagasse by Catalytic Fast Pyrolysis. **Waste Biomass Valor**, p. 187-195, 2019.

PAULA, M. O. de; TINÔCO, I. de F. F.; RODRIGUES, C. de S.; SILVA, E. N. da; SOUZA, C. de F. Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, p. 353-357, 2009.

PINTO, L. C.; LOPES, M. V.; CARVALHO FILHO, C. D. Aproveitamento de levedura de cervejaria, como ingrediente nutritivo na dieta alimentar humana. **Higiene alimentar**, p. 103-109, 2013.

PIRES, A. J. V.; REIS, R. A.; CARVALHO, G. G. P.; SIQUEIRA, G. R.; BERNARDE, T. F.; Bagaço de cana-de-açúcar tratado com hidróxido de sódio. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 35, p. 953-957, 2006.

ROCHA, R. L.; PANDOLFI, M. A. C. Geração de resíduos no setor sucroalcooleiro. **Revista Interface Tecnológica**, v. 16, p. 384-392, 2019.

RODIER, L.; VILLAR-COCIÑA, E.; BALLESTEROS, J. M.; SAVASTANO JUNIOR, H. Potential use ofsugarcane bagasse and bamboo leafashes for elaboration of green comentitious materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 231, p. 54-61, 2019.

RODRIGUES, T.; ROUSSET, P.; VALE, A.; BROUST, F. Bioóleo: uma alternativa para valorização energética da biomassa. **Revista Brasileira de Energia**, p. 39-56, 2011.

ROSSETTO, R., SANTIAGO, A.D. Adubação - Resíduos alternativos. **Árvore do conhecimento: Cana-de-açúcar**.Agência Embrapa de Informação Tecnológica, 2018.
Disponível em:http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore acessado em abril 2020.

SANTOS, F.A.; QUEIRÓZ, J.H.; COLODETTE, J.L.; FERNANDES, S.A.; GUIMARÃES, V.M.; REZENDE, S.T. Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol. **Química Nova**, v.35 n.5 São Paulo, 2012.

SOARES, L. A. **Síntese, ativação e caracterização de carvão obtido a partir do bagaço de cana-de-açúcar e avaliação da capacidade de adsorção.** Dissertação de Mestrado.Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, 71 p. 2014.

SOARES, A.; MONASSA, J. M. O emprego da levedura na indústria FOOD e FEED. **REGRAD-Revista Eletrônica de Graduação do UNIVEM**, v. 7, n. 1, 2014.

SOARES, M. S.; PIRES, A. J. V.; SILVA, L. G.; GUIMARÃES, J. O.; MACHADO, T. C.; FRAZÃO, O. S. Utilização do bagaço de cana-de-açúcar na alimentação de ruminantes. **Revista eletrônica nutritime**, v. 12, p. 3837– 3855, 2015.

SOUZA, E. E. de *et al*. Preparação e caracterização de membranas de celulose regenerada a partir da celulose extraída de resíduos agroindustriais para aplicação em processos de separação. **Química Nova**, p. 202-208, 2015.

SOUZA, D. R. L. *et al*. Associação de membrana biológica de hemicelulose com pomada de estimulação da epitelização: Relato de caso. **Revista Brasileira de Queimaduras**, v. 15, n. 4, p. 283-286, 2016.

TELLES, M. R.; SARAN, L. M.; UNÊDA-TREVISOLLI, S. H. Produção, propriedades e aplicações de bioplástico obtido a partir da cana-de-açúcar. **Ciência & Tecnologia: FATEC-JB**, Jaboticabal, v. 2, n. 1, p. 52-63, 2011.

Transporte rodoviário: impactos da qualidade do asfalto sobre o transporte rodoviário. Confederação nacional dos transportes, serviço nacional, serviço social do transporte, serviço nacional de aprendizagem do transporte. Brasília, DF, 2019. Disponível em: www.cnt.org.br. Acesso em: 26 mar. 2020.

32º Congresso de pesquisa e ensino em transporte da anpet, 32., 2018, Gramado, RS. Análise do uso da fibra do bagaço de cana-de-açúcar em mistura asfáltica do tipo SMA. 2018. 10 p. Tema: Infraestrutura.

VANDERLEI, R. D.; PEINADO, H. S.; NAGANO, M. F.; DAL MOLIN FILHO, R. G. Cinza do bagaço de cana-de-açúcar como agregado em concretos e argamassa. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 8, p. 21-31, 29 out. 2014.

YADAV, B.; PANDEY, A.; KUMAR, L. R.; TYAGI, R. D. Bioconversion of waste (water) /residues to bioplastics- A circular bioeconomy approach. **Bioresource Technology**, v. 298, 2020.

YAMADA, E. A. *et al*. Utilização de extrato de levedura (*Saccharomyces sp.*) de destilaria de álcool em salsicha. **Brazilian Journal of Food Technology.** Campinas, v. 13, p. 197-204, 2010.

YU, J. **Microbial Production of Bioplastics from Renewable Resources**. In: Bioprocessing for Value-Added Products from Renewable Resources. ed. Elsevier, 2007, p. 585 - 610.

CAPÍTULO III

A vinhaça e suas principais aplicações

»*Eline Araújo Andrade*
»*Liana Filgueira Albuquerque*

1. INTRODUÇÃO

As produções de álcool e de cachaça no Brasil são importantes segmentos nacionais na economia do país, produzindo bilhões de litros por safra e empregando centenas de milhares de brasileiros (CONAB, 2018; CONAB, 2019).

Esses produtos são gerados a partir da fermentação e da destilação do caldo da cana-de-açúcar fermentado. Na destilação são separados os produtos desejados do que não é desejado, considerado efluente do processo e denominado vinhaça ou vinhoto, nesse caso.

A vinhaça é um efluente extremamente impactante para o meio ambiente por possuir alto teor de matéria orgânica, mau cheiro, alta acidez e alta temperatura, conforme pode ser visualizado na Tabela 1.

Tabela 1 – Principais parâmetros da vinhaça a partir da fermentação do caldo da cana-de-açúcar

Parâmetros	Valores
pH	3,7 – 4,6
Temperatura (ºC)	80 – 100
Densidade (g mL^{-1})	1,143
DBO[1] (mg L^{-1})	6 000 – 16 500
DQO[2] (mg L^{-1})	15 000 – 33 000
SólidosTotais (mg L^{-1})	23 700
SólidosVoláteis (mg L^{-1})	20 000
Sólidosfixos (mg L^{-1})	3 700
Potássio (mg K_2O L^{-1})	1 200 – 2 100
Nitrogênio (mg L^{-1})	150 – 700
Fósforo (mg P_2O L^{-1})	10 – 210
Cálcio (mg CaO L^{-1})	130 – 1 540
Magnésio (mg MgO L^{-1})	200 – 490
Sulfato (mg SO_4^{2-} L^{-1})	600 – 760
Carbono (mg C L^{-1})	5 700 – 13 400
Relação C/N	19,7 – 21,07
Matériaorgânica (mg L^{-1})	19 500
Subst. redutoras (mg L^{-1})	7 900

Fonte: Camargo *et al*. (2009); Prada, Guekezian e Suárez-Iha (1997) *apud* Silveira (2016).

[1]Demanda Bioquímica de Oxigênio; [2]Demanda Química de Oxigênio

Além disso, a vinhaça possui elevado volume gerado por processo. Para produzir 1L de álcool, cachaça ou aguardente é liberado um volume de 8 a 15L de vinhaça e para cada 1000 t de cana processada são gerados 360.000L de vinhaça (FERREIRA, 2009; OLIVEIRA, 2019; SZYMANSKI; BALBINOT; NAGEL, 2010).

As características química e físico-química da vinhaça implicam em tratamentos difíceis e de alto custo. Então, o que fazer com esse efluente tão complexo?

Até a década de 1970, não havia nenhum tipo de tratamento ou reaproveitamento da vinhaça. Ela era lançada diretamente nos corpos d'água, reduzindo o oxigênio dissolvido (OD) e o pH do meio (PIRES, 2008). Contudo, após a implantação do Programa Nacional do Álcool (Proálcool), em 1975 (PROÁLCOOL, 2012), houve um aumento significativo na geração desse efluente levando o Ministério do Interior a publicar a Portaria nº 323/1978 "proibindo terminantemente o lançamento direto e indireto de vinhaça em qualquer coleção hídrica pelas destilarias". A solução mais viável encontrada foi o reuso da vinhaça na fertirrigação da cana-de-açúcar que, também, contribuiu para a redução da adubação química, aumento da produtividade da cultura, aumento do número de cortes da cana, mas, também, foram observadas: redução no teor de sacarose, atraso na maturação e acúmulo de cinzas e amido no caldo (GRANATO; SILVA, 2002; ORLANDO FILHO, 1983; SANTANA; GLÓRIA, 1985; SOARES; ROSSELL, 2007).

2. FERTIRRIGAÇÃO DA VINHAÇA

A fertirrigação pode ser realizada de várias formas, as mais comuns são: sulco de infiltração, caminhão-tanque, aspersão convencional e aspersão com canhão hidráulico. A escolha do melhor método vai depender do relevo do campo, das condições da área, do volume de efluente, entre outros fatores (EMBRAPA, 2016). O volume irrigado pode variar de 40 a 1000 m^3 ha^{-1} em função da cultura e da característica do solo, porém é importante ter o cuidado com volume de vinhaça em excesso, pois pode acarretar em aumento da salinidade do solo (SANTOS *et al*., 1981).

Para ser feita a dosagem mais adequada no solo é possível utilizar a Equação 1 para calcular a dosagem. Essa equação leva em consideração o teor de potássio contido na vinhaça e no solo (CETESB, 2015),

- $V = [(0,05 \times CTC - Ks) \times 3744 + 185] / Kvi$ (1)

Onde:

- V: Volume de vinhaça por área (m^3 ha^{-1});
- Ks: concentração de potássio no solo ($cmolc\ dm^{-3}$) (deve ser determinada à profundidade de 0 a 0,80 m);
- CTC: Capacidade de Troca Catiônica ($cmolc\ dm^{-3}$);

- Fator 3744: constante para transformar os resultados da análise de fertilidade, expressos em cmolc dm^{-3} ou meq $100cm^{-3}$ em kg ha^{-1} de potássio a 0,80 metros de profundidade;

- Fator 185: massa (kg ha^{-1}) de potássio extraído pela cultura por corte;

- Kvi: concentração de potássio na vinhaça (kg K_2O m^{-3}).

Podem acontecer, também, outras modificações no solo a partir da fertirrigação, como: elevação do pH, aumento da disponibilidade de alguns nutrientes, aumento da capacidade de retenção de água, melhoria da estrutura física do solo, aumento da população microbiana, imobilização de certos nutrientes, aumento da disponibilidade de alguns íons, aumento da capacidade de troca catiônica (CTC) e melhoria da porosidade total (ORLANDO FILHO, 1983; SANTANA; GLÓRIA, 1985).

Apesar de a vinhaça possuir um pH baixo (3,7 a 4,6), depois de, aproximadamente, 10 dias de irrigação, é observado aumento do pH do solo para valores iguais ou superiores a 7,0. Isso pode ocorrer se houver formação de amônia a partir de uma degradação anaeróbica de compostos nitrogenados. Mas, a causa mais comum do aumento do pH do solo é ocasionada devido à decomposição aeróbica da matéria orgânica, principalmente dos ácidos orgânicos que, também, indica a desaceleração do processo de degradação. Com o aumento

do pH pode ocorrer a precipitação de íons que estavam anteriormente solubilizados no meio, principalmente os micronutrientes, reduzindo sua disponibilidade para a planta. Contudo, se houver a precipitação do Al^{3+} haverá, também, a redução da toxicidade do solo (ALCARDE, 1992; BARROS *et al*., 2010; CANELLAS, 2003; NOVAIS *et al*., 2007; MOREIRA; BRAGA; FRIES, 2009; PRADO; FERNANDES, 2000; ROSSETTO, 1987; SALOMON, 2007; SILVA e RIBEIRO, 1998).

Outra contribuição da vinhaça com relação aos seus nutrientes é a presença de silício (Si) que tem a capacidade de aumentar a tolerância da cana-de-açúcar às doenças, consequentemente, aumentando a produtividade dessa cultura (BRASSIOLI; PRADO; FERNANDES, 2009; GOMES; MORAES; NERI, 2009).

Contudo, é importante salientar que, comumente, a vinhaça é levada ao campo in natura, sem nenhum tratamento prévio, podendo acarretar em impactos ambientais, como uma possível contaminação do solo e/ou do lençol freático (se houver no local), proliferação de vetores, como insetos, e mau odor no entorno da fertirrigação (ELIA NETO, 2016; SILVA, 2009).

3. BIOGÁS A PARTIR DA VINHAÇA

Outra alternativa de aproveitamento da vinhaça que tem sido bastante estudada, atualmente, é a produção de biogás, para ser utilizado como fonte de energia, e biofertilizante com reduzida carga orgânica (LAMONICA, 2006 *apud* SZYMANSKI; BALBINOT; NAGEL, 2010).

A produção de biogás a partir da vinhaça agrega valor a esse efluente e contribui para uma produção de álcool e cachaça ambientalmente sustentável, em vários aspectos, reduzindo as emissões de gases geradores do efeito estufa (GEE), além dos benefícios econômicos e sociais. (FERREIRA, 2016; SZYMANSKI; BALBINOT; SCHIRMER, 2010).

Projetos visando o reaproveitamento de resíduos para a produção de biogás têm aumentado muito nos últimos tempos. A previsão é que essa área cresça em 40% até 2030 (GAUDARDE, 2020; SZYMANSKI; BALBINOT; SCHIRMER, 2010). Sendo importante, também, ressaltar a relevância que o tema das energias renováveis tem ganhado ao longo dos anos, incidindo, especialmente, sobre o reaproveitamento da vinhaça e contribuindo com a nova visão econômica-sustentável do mercado sucroalcooleiro: investimento e comercialização da energia elétrica a partir dos seus resíduos. Inclusive, levando as empresas desse setor ao patamar de indústrias sucroenergéticas.

Contudo, o biogás não é um produto puro, ele é uma mistura de gases gerados quando ocorre a decomposição anaeróbica de substâncias orgânicas, e.g. vinhaça, tendo como principal componente o metano, que atua como combustível. A composição dessa mistura varia de acordo com vários fatores, como: característica do substrato orgânico a ser decomposto; tipo e condições de funcionamento do biodigestor; pressão e temperatura durante o processo de fermentação, entre outros. Uma composição típica do biogás pode se apresentar da seguinte forma: 60% de metano (CH_4), 35% de dióxido de carbono (CO_2) e 5% de uma mistura de hidrogênio (H_2), nitrogênio (N_2), amônia (NH_3), ácido sulfídrico (H_2S), monóxido de carbono

(CO), aminas voláteis e oxigênio (O_2). Dependendo do processo de biodigestão e da origem do substrato orgânico, o teor de metano pode variar de 50 a 70%.

O poder calorífico inferior do biogás situa-se entre 5.000 e 7.000 kcal m^{-3}, podendo chegar a 12.000 kcal m^{-3} quando possui pureza em torno de 95% de metano, obtida após tratamento. Os processos para purificar o biogás podem ser através de absorção, adsorção, filtração por membrana, separação criogênica ou termoquímica. Após ser purificado, o biogás recebe o nome de biometano e pode substituir o gás natural (CORTEZ *et al.,* 2007; FARIA, 2012; HORNUNG, 2014; MILANEZ *et al*., 2018;WEREKO-BROBBY; HAGEN, 2000;).

No caso da vinhaça, para cada 1 m^3 desse efluente, podem ser produzidosentre 7 e 15 Nm^3 de biogás, que correspondem de 37 a 78 kW de energia térmica ou de 17 a 37 kW de energia elétrica (SALOMON; 2007; SILVIUS; VOGELAAR; CRUZ, 2016). E o custo real para sua produção é de 0,038 US$ m^{-3} e 0,022 US$ m^{-3}, sem considerar o impacto econômico do fertilizante inorgânico reposto e considerando-o, respectivamente (MALUF, 2015).

A Tabela 2 apresenta um comparativo energético entre o bagaço úmido (50% b.u.) da cana-de-açúcar e o biogás (com 65% de CH_4) proveniente da biodigestão da vinhaça.

Tabela 2 – Comparativo energético entre bagaço e biogás por tonelada de cana

Combustível	Quant. prod.	Quant. de energia
Bagaço	250 kg	450.10^3 kcal

Biogás	11,83 Nm^3*	67.10^3 kcal

Fonte: Granato; Silva (2002) (modificada pelo autor)

*Nm^3 (normal metro cúbico) corresponde ao volume do gás nas CNTP.

É possível observar que a quantidade de energia do biogás corresponde a 15% da quantidade de energia do bagaço, historicamente, utilizado na cogeração de energia na indústria sucroalcooleira.

A quantidade de energia (GEB) em kcal d^{-1} pode ser calculada através da Equação 2 (SZYMANSKI; BALBINOT; SCHIRMER, 2010):

- $GEB = PB . PCIB$ (2)

Onde:

- PCIB: Poder calorífico infer. do biogás = 5 100 kcal Nm^{-3};

- PB: Produção de biogás pela biodigestão anaeróbia da vinhaça pode ser calculada através da Equação 3:

- $PB = CO .E . F$ (3)

Onde:

- E: Eficiência de remoção de DQO do processo = 65%;

- F: Fator de conversão de biogás por DQO removida = 0,45 $Nm^3 kg^{-1}$ de DQO removida;

- CO: Vazão de carga orgânica pode ser calculada através da Equação 4:

- $CO = Q . DQO$ (4)

Onde:

- Q: Vazão diária de vinhaça (m^3)

- DQO: Demanda Química de Oxigênio ($kg\ m^{-3}$)

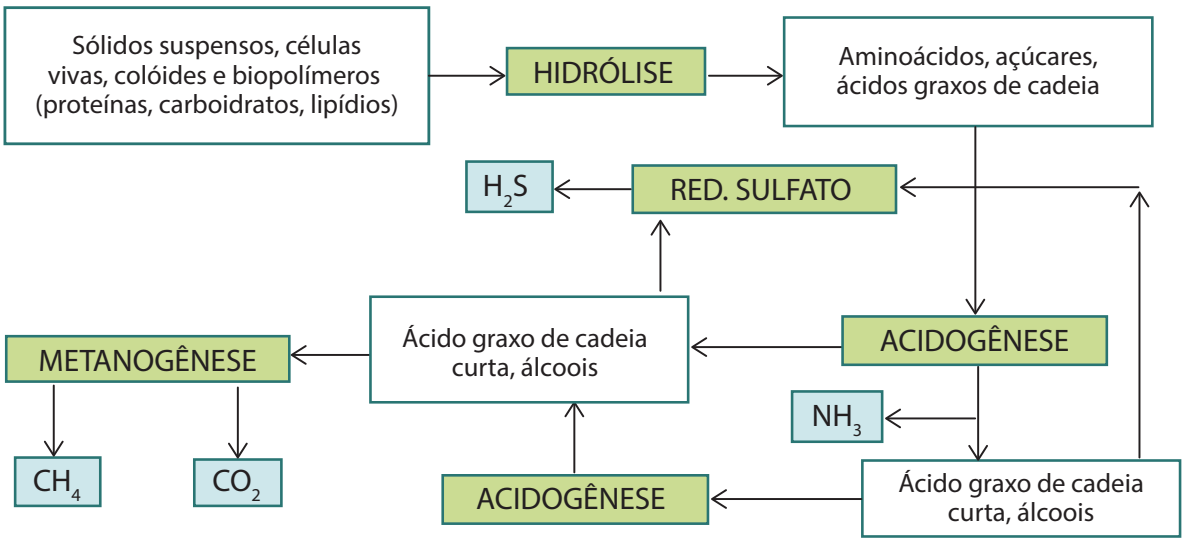
Na indústria sucroalcooleira, o biogás pode ser utilizado como combustível na caldeira, como combustível para os transportes da área agrícola em substituição ao diesel, para obtenção de créditos de carbono, para produzir energia elétrica em turbinas a gás e para ser comercializado após tratamento de purificação (GRANATO, 2003; NOVACANA, 2020; SCARLAT; DALLEMAND; FAHL, 2018; SZYMANSKI; BALBINOT; SCHIRMER, 2010).

O processo de biodigestão anaeróbica, aplicado para obtenção de biogás, é um processo biológico que ocorre através de consórcios de microrganismos capazes de degradar substratos orgânicos, na ausência de oxigênio, em um biodigestor.

As principais reações microbiológicas que ocorrem nesse processo são: hidrólise, acidogênese, acetogênese, e metanogênese, podendo ocorrer, também, a redução de sulfato, se houver presença de enxofre no efluente (SPEECE, 1983).

O processo de produção do biogás, apresentado na Figura 1, se inicia com a hidrólise, onde ocorre a degradação dos carboidratos complexos, lipídios e proteínas (compostos orgânicos de cadeias longas), em suas unidades constitutivas. Em seguida, na acidogênese (ou fermentação), os produtos obtidos na hidrólise são transformados em ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono. Na acetogênese ocorre a oxidação dos produtos, gerados na fase acidogênica, em substrato apropriado para as bactérias metanogênicas. Os produtos gerados pelas bactérias acetogênicas são o hidrogênio, o dióxido de carbono e o acetato. Na acetogênese, as bactérias facultativas que mediam as reações, removem todo o oxigênio residual no biodigestor, adequando o ambiente para que ocorra a metanogênese. Essa é a última etapa da biodigestão anaeróbica. As bactérias metanogênicas só conseguem degradar um número limitado de substratos (ácido acético, hidrogênio, dióxido e monóxido de carbono, ácido fórmico, metanol e metilaminas) transformando esses produtos, com um ou dois átomos, em metano e dióxido de carbono. Os parâmetros importantes que podem influenciar na biodigestão são: temperatura, pH, carência de nutrientes, toxicidade, tempo de retenção e presença de oxigênio (BOND; TEMPLETON, 2011; SALOMON, 2007).

Figura 1 – Reações anaeróbicas no biodigestor



Fonte: Própria do autor (2020)

Essas reações ocorrem nos biodigestores, que são equipamentos adequados para propiciar a fermentação anaeróbica da biomassa a fim de obter biogás. O mais indicado para a biodigestão da vinhaça é o reator UASB– *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* – reator anaeróbico de fluxo ascendente de alta eficiência (RAFA) que tem as seguintes características: atua bem em efluentes com teor de sólidos de até 2% (próximo ao valor de sólidos totais da vinhaça) e alto teor de DQO; possui baixo tempo de detenção hidráulica; são compactos; tem baixo custo de implantação e operação; tem baixa produção de lodo; tem baixo consumo de energia; tem satisfatória eficiência de remoção de DQO e DBO; é possível realizar uma partida rápida; a estabilização da matéria orgânica ocorre em todas as zonas do reator, leito e camada de lodo (BORGES; SANTOS, 2017; CHERNICHARO, 1997 *apud* SALOMON, 2007; CORTEZ *et al*., 2007; GRANATO, 2003; NASCIMENTO, 1996). As orientações para elaboração de projetos referentes ao reator UASB podem ser encontradas na NBR 12209 (ABNT, 2011).

Outras normas, pertinentes à produção e ao uso de biogás, também podem ser utilizadas, como: NBR 14903 (ABNT, 2014) para determinação da composição do gás natural por cromatografia gasosa; Resolução nº 382 (CONAMA, 2006) para avaliar as emissões atmosféricas da queima do gás natural (Anexo II); Resolução nº 8 (ANP, 2015) sobre a regulamentação do biometano, entre outras (FERREIRA, 2016).

O tema em questão é amplo e multidisciplinar, permitindo o desdobramento em várias áreas, tanto do ponto de vista econômico, como produtivo, ambiental e científico. A seguir estão citadas

sugestões que podem alavancar essa área, que vão desde a avaliação de impactos e redução dos mesmos na fertirrigação até a otimização da produção de biogás com maior teor de metano, possibilitando uma maior produtividade na produção de álcool, aguardente e cachaça com menor impacto ambiental, através da implantação de novas tecnologias, estudos complementares e novas pesquisas. São elas:

- Estudo de leveduras com maior potencial de resistência ao teor alcoólico, capazes de aumentar a eficiência de fermentação do caldo de cana e, consequentemente, gerando menos efluente;
- Estudos e ações que possibilitem uma maior atuação das bactérias metanogênicas para a produção de metano;
- Incremento do biodigestor anaeróbico possibilitando maior reaproveitamento do biogás;
- Sistemas de purificação do biogás, mais eficazes e viáveis para a produção de biometano;
- Avaliação dos impactos ambientais, em longo prazo, causados pela fertirrigação da vinhaça, incluindo contaminação dos corpos d'água no seu entorno.

4. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12209**: Elaboração de Projetos Hidráulico-Sanitários de Estações de Tratamento de Esgotos Sanitários. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

BOND, T.; TEMPLETON, M. R. Historyand future ofdomesticbiogasplants in thedeveloping world. **Energy for SustainableDevelopment**, v.15, n. 4, p. 347-354, 2011.

BORGES, E. A. M. A.; SANTOS, A. S. P. dos. Desenvolvimento da Aplicação dos Reatores Anaeróbios de Manta de Lodo (UASB) no Brasil. **Revista Internacional de Ciências**, v. 07, n. 02, p. 247-264, 2017.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução n° 305, de 12 de junho de 2002**. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Diário Oficial da República. Brasília/DF 17 de Julho de 2002. Disponível em: http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=300. Acesso em: 10/04/2020.

BRASIL. **Lei 6.938, de 31 de agosto de 1981**. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Disponível em:

http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L6938.htm. Acesso em: 10/04/2020.

BRASSIOLI, F. B.; PRADO, R. de M.; FERNANDES, M. F. Avaliação agronômica da escória de siderurgia na cana-de-açúcar durante cinco ciclos de produção. **Bragantia**, v. 68, n.2, Campinas, 2009.

CAMARGO, J. A.; PEREIRA, N.; CABELLO, P. R.; TERAN, F. J. C. **Viabilidade da aplicação do método respirométrico de Bartha para a análise da atividade microbiana de solos sob aplicação de vinhaç**a. Engenharia Ambiental – Espírito Santo do Pinhal, v. 6, n. 2, p. 264-271, 2009.

CONAB – **Companhia Nacional de Abastecimento, 2018**. Disponível em: https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/2327-cana-de-acucar-tem-queda-de-3-6-e-fecha-safra-2017-18-em-633-26-milhoes-de-t. Acesso em: 10/04/2020.

CONAB – **Companhia Nacional de Abastecimento, 2019**. Disponível em: https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/2859-producao-de-etanol-no-brasil-mantem-recorde-e-alcanca-33-58-bilhoes-de-litros. Acesso em: 10/04/2020.

CORTEZ, L. A.B.; SILVA, A.; LUCAS JUNIOR, J. de; JORDAN, R. A.; CASTRO, L. R. Biodigestão de efluentes. In: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. S. (Coord.). **Biomassa para energia**. Campinas: UNICAMP, 2007. cap. 15, p. 493-529.

ELIA NETO, A. **Estado da arte da vinhaça**. *In*: 2º Workshop de Resíduos urbanos e agrícolas: energia, reciclagem de nutrientes e produção de fertilizantes. Slides. 2016.

FARIA, R. A. P. **Avaliação do potencial de geração de biogás e de produção de energia a partir da remoção da carga orgânica de uma estação de tratamento de esgoto – estudode caso**. 2012. 63 f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2012.

FERREIRA, A. F. **Estudo das normas recomendadas e regulamentadoras para uso térmico do biogás**. Trabalho (Conclusão de Curso) – Departamento de Engenharia Agrícola e do Meio Ambiente, Universidade Federal Fluminense, 2016.

FERREIRA, L. F. R. **Biodegradação de vinhaça proveniente do processo industrial de cana-de-açúcar por fungos**. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura, Piracicaba, 2009.

GAUDARDE, G. **Projetos de biogás crescem 40% e setor estima aportes de R$ 50 bi até 2030**. EPBR, 2020. Disponível em: https://epbr.com.br/26330-2/. Acesso em: 28/04/2020.

GOMES, F. B.; MORAES, J. B.; NERI, D. K. P. **Adubação com silício como fator de resistência a Insetos-praga e promotor de produtividade em Cultura de batata inglesa em sistema orgânico**. Ciênc. agrotec., Lavras, v. 33, n. 1, p. 18-23, 2009.

GRANATO, E. F. **Geração de energia através da biodigestão anaeróbia de vinhaça**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2003.

GRANATO, E. F.; SILVA, C. L. **Geração de energia elétrica a partir do resíduo vinhaça**. In: 4º ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 2002, Campinas.

HORNUNG, A. **Transformation of biomass: theory to practice**. Chichester: John Wiley & Sons, 2014. 371 p.

LAMONICA, H. M. **Potencial de geração de excedentes de energia elétrica a partir da biodigestão da vinhaça**. Campinas: Editora Unicamp, 2006. (Palestra proferida no AGRENER).

MALUF, A. B. **Avaliação Termoeconômica da Cogeração no Setor Sucroenergético com o Emprego de Bagaço, Palha, Biogás de Vinhaça Concentrada e Geração na Entressafra**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015.

MILANEZ, A. Y.; GUIMARÃES, D. D.; MAIA, G. B. da S.; SOUZA, J. A. P. de; LEMOS, M. L. F. **Biogás de resíduos agroindustriais: panorama e perspectivas**. Biogás-BNDES Setorial, 47, p. 221-276, 2018.

NASCIMENTO, R. A. **Desempenho de reator anaeróbio de manta de lodo utilizando efluentes líquidos de indústrias alimentícias**. Dissertação (mestrado). Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, 1996.

NOVACANA. **Biogás pode levar setor brasileiro de cana para "novo nível", diz analista do Rabobank**. Novacana.com, 2020. Disponível em: https://www.novacana.com/n/industria/usinas/biogas-setor-brasileiro-cana-novo-nivel-analista-rabobank-290120. Acesso em: 27/04/2020.

OLIVEIRA, D. C. S. **Otimização da produção de biogás a partir da biodigestão de vinhaça da fabricação de cachaça artesanal**. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Biocombustíveis) – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2019.

PROÁLCOOL –**Programa Brasileiro de Álcool**. Biodieselbr, 2012. Disponível em: https://www.biodieselbr.com/proalc ool/pro-alcool/programa-etanol. Acesso em: 21/04/2020.

SALOMON, K. R. **Avaliação Técnico-Econômica e Ambiental da Utilização do Biogás Proveniente da Biodigestão da Vinhaça em Tecnologias para Geração de Eletricidade**. 2007. 219p. Tese (Doutorado em Engenharia

Mecânica), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Itajubá, 2009.

SANTOS, G.; ROSSIELLO, R. O. P.; FERNANDES, M.; O'GRADY, P. C. Efeitos da vinhaça sobre o pH do solo: a germinação e o acúmulo de potássio em milho. **Pesquisa agropecuária brasileira**,v.16, n.4, p.489-493, 1981.

SCARLAT, N.; DALLEMAND, J. F.; FAHL, F.Biogas: Developmentsand perspectives in Europe. **Renewable Energy**, v. 129. p. 457-472, 2018.

SILVA, V. L. **Estudo econômico das diferentes formas de transporte de vinhaça em fertirrigação na cana-de-açúcar.** 2009. 46f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, 2009.

SILVEIRA, R. N. C. M. **Conservação, uso racional e Sustentável da água:** Manejo e Cuidados no Uso da Vinhaça na Fertirrigação. Fortaleza: INOVAGRI/ IFCE, 2016.

SILVIUS, M.; VOGELAAR, J.; CRUZ, S. **Geração de biogás da vinhaça com um novo tipo de reator anaeróbio**. Portal tratamento de água – Scientech Ambiental. 2016. Disponível em: https://www.tratamentodeagua.com. br/ artigo/geracao-de-biogas-da-vinhaca-com-um-novo-tipo-de -reator-anaerobio/. Acesso em: 27/04/2020.

SOARES, P. A.; ROSSELL, C. E. V. **O Setor Sucroalcooleiro e o domínio tecnológico**. São Paulo: NAIPPE/USP, 2007.

SPEECE, R. E. Anaerobicbiotechnology for industrial wastewatertreatment. **Environ. Sci. Technol**., v. 17, n. 9, 1983.

SZYMANSKI, M. S. E.; BALBINOT, R.; SCHIRMER,W. N. Biodigestão anaeróbia da vinhaça: aproveitamento energético do biogás e obtenção de créditos de carbono – estudo de caso. **Semina: Ciências Agrárias, Londrina**, v. 31, n. 4, p. 901-912, 2010.

PRADA, S. M.; GUEKEZIAN, M.; SUÁREZ-IHA, M. E. **Metodologia analítica para a determinação de sulfato em vinhoto**. São Paulo: Instituto de Química da USP, 1997.

WEREKO-BROBBY, C. Y.; HAGEN, E. B. **Biomass conversion and technology**. New York: John Wiley& Sons, 2000.

CAPÍTULO IV

Bagaço, a energia da indústria sucroalcooleira

»*Anderson Aldelyan Ramalho De Sousa*
»*Danielle Christine Almeida Jaguaribe*
»*Joelma Morais Ferreira*

1. INTRODUÇÃO

O Brasil desponta no cenário mundial como o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo. Segundo a Embrapa, o país processou na safra 2017/2018 641 milhões de toneladas de cana de açúcar. A Região Centro-Sul corresponde a 90%, enquanto o Norte-Nordeste aos 10% restantes, de acordo com dados da UNICA (COMAS, 2018). No Brasil, dentre as matérias-primas de biomassa mais utilizadas têm-se o bagaço de cana-de-açúcar, que é o resíduo final da retirada do caldo da cana-de-açúcar nas usinas que produzem álcool e açúcar, posicionando o país entre os maiores produtores do mundo (MAPA, 2015).

A indústria sucroalcooleira, além da produção de álcool e açúcar, vem atuando com as práticas sustentáveis e aproveitamento do bagaço de cana de açúcar para a geração de energia elétrica e de bioeletricidade, beneficiando as empresas, não só sob o ponto de vista sustentável, mas pelo baixo custo de aquisição do bagaço.

Para cada tonelada de cana-de-açúcar processada há uma produção residual de bagaço de 280 kg de bagaço, tornando-o o principal resíduo da indústria sucroalcooleira. Segundo Franco (2003), essa biomassa traz benefícios ao sistema produtivo, pois melhora as características químicas e físicas do solo, controla plantas infestantes e pode ser usada como uma excelente biomassa para uso na cogeração de energia.

Pode-se dizer que o bagaço de cana de açúcar possui um poder calorífico compatível com o da lenha, com a vantagem de reduzir os impactos negativos sobre as florestas, além de ser uma outra fonte de geração de renda para os empreendedores do setor sucroenergético, transformando resíduos em energia, proporcionando ao mesmo tempo uma contribuição do setor para o meio ambiente.

Esse capítulo mostra como as indústrias sucroalcooleiras utilizam o resíduo da moagem da cana de açúcar, o bagaço, para a geração de energia térmica, mecânica e elétrica. Também é mostrada como se dá a produção do vapor no interior das caldeiras e a sua importância ao longo do processo. Finalmente, será avaliado o princípio do balanço energético no interior das caldeiras e os métodos para o cálculo da sua eficiência, fazendo-se uma análise dos diferentes parâmetros envolvidos na geração do vapor a partir do bagaço de cana de açúcar.

2. APROVEITAMENTO DA BIOMASSA COMO COMBUSTÍVEL

Com a demanda mundial por energia crescendo a cada ano, isso faz com que a utilização de combustíveis fósseis aumente cada vez mais, gerando um crescimento de problemas ambientais em todo o mundo. Sendo assim a procura por novas fontes de energia e combustíveis renováveis tem sido alvo de diversos estudos.

Uma das alternativas mais promissoras vem da biomassa residual. A biomassa é um material rico em matéria orgânica. Um dos recursos renováveis, que vêm chamando o interesse da comunidade científica é a biomassa; que se define como toda a matéria orgânica susceptível de ser transformada em energia. (MIRANDA, 2009).

De acordo com os dados da ANEEL, 2018, a biomassa pode ser classificada do ponto de vista energético como toda matéria orgânica, seja de origem animal ou vegetal, que pode ser utilizada na produção de energia.

Segundo Franco (2018), existem várias opções de processamento de conversão da biomassa em formas úteis de energia. Alguns fatores determinam qual será o processamento que a biomassa deverá passar para se obter a energia desejada. A conversão de biomassa em energia é realizada por meio de processos termoquímicos, bioquímicos, biológicos e extração mecânica (KRUSE; GAWLIK, 2003).

A biomassa tem enorme potencial, o que pode tornar este resíduo em uma enorme fonte de produção de energia e combustíveis renováveis nos próximos anos. Saxena*et al*. (2008), afirmam que a biomassa é a quarta maior fonte de energia no mundo, representando 15% do consumo mundial, sendo que nos países em desenvolvimento

este percentual sobe para 38% do consumo de energia primária. A biomassa desempenha um papel especialmente importante e que contribui com 19% do consumo final de energia mundial (RENEWABLES, 2013).

Em 2017 as fontes de energia que provém da biomassa, correspondem a um total de 8,9% da matriz energética brasileira. De fato, o setor sucroenergético registrou uma produção, naquele ano, de 32,3 ton.W/h de energia elétrica, o que representa 76,8% da energia provenientes da biomassa no Brasil (EPE, 2017).

É através da combustão do bagaço, que as indústrias sucroalcooleiras realizam a cogeração de energia, ou seja, a produção simultânea de energia térmica, elétrica e mecânica, com grande aproveitamento energético, diminuindo os custos demandados pela empresa, ao mesmo tempo que são diminuídos, os impactos ambientais.

3. COGERAÇÃO

A cogeração é a geração simultânea de energia térmica, mecânica e elétrica para processo, a partir de uma única fonte de energia, ou melhor dizendo a partir de um único combustível (no caso da indústria sucroalcooleira, um combustível sólido, bagaço da cana de açúcar).

No Brasil e no mundo, somente os sistemas de vapor para a cogeração de energia são encontrados na indústria sucroalcooleira. Os sistemas de cogeração mais modernos utilizam equipamentos como turbinas a vapor, turbinas de condensação/extração e geradores (SEGUNDO *et al.*, 2015).

3.1 Vantagens técnico-econômicas da cogeração

- Conservação da energia devido à melhoria da eficiência na utilização da energia (SEGUNDO *et al.*, 2015);
- Custos de capital relativamente baixa, devido à alta eficiência global da planta;
- Cogeração contempla a geração de energia elétrica descentralizada;
- Como a transferência de energia elétrica não requer longas distância, as perdas por distribuição se tornam desprezíveis;
- Baixo impacto sobre a poluição ambiental;
- Nas usinas de cana de açúcar, as fontes de energia são renováveis;
- O vapor gerado pela queima do bagaço é utilizado para acionar as turbinas à vapor nos ciclos de cogeração.

3.2 Principais Componentes de um Sistema de Cogeração

3.2.1 TURBINA A GÁS

A turbina a gás consiste em uma máquina térmica de combustão interna, que tem por finalidade a conversão da energia

cinética do fluido de trabalho, em energia de pressão. A denominação "turbina a gás" foi dada em consequência do seu fluido de trabalho: o ar. É uma máquina composta por um compressor, câmara de combustão e turbina.

3.2.2 TURBINA A VAPOR

É uma máquina térmica de combustão externa, que utiliza a água como fluido de trabalho. Após a saída da turbina, o vapor a uma baixa pressão passa por um processo de remoção de calor. O vapor é então condensado, e o calor liberado será utilizado em outras etapas do processo, sendo parte desta energia convertida em energia mecânica, e parte em energia elétrica.

3.2.3 GERADOR

É o elemento final responsável pela conversão de diversos tipos de energia, como química, mecânica, cinética, ou de outra natureza, em energia elétrica.

3.2.4 CICLO COMBINADO

O Ciclo Combinado é a combinação de dois ou mais ciclos, com a finalidade de aumentar o rendimento energético da planta. O princípio de um Ciclo Combinado coincide com o princípio da cogeração, caracterizado pelo aproveitamento do calor oriundo de um ciclo anterior de geração. A combinação mais utilizada é o ciclo

Brayton (turbina a gás) / Rankine (turbina a vapor), onde os gases de exaustão da turbina a gás, são encaminhados, posteriormente, para a caldeira do ciclo a vapor.

4. CALDEIRAS

Uma caldeira é um dispositivo utilizado para mudar o estado da água de líquido para vapor, a fim de ser usado em aquecimento, acionamento de máquinas, em processos industriais, esterilização, e geração de energia elétrica. Naturalmente, que a preferência pelo vapor d'água como fluido de trabalho é justificada pelo seu alto calor específico e pela ampla disponibilidade da água no meio industrial.

Na verdade, a caldeira é um tipo de trocador de calor, que operando a uma pressão superior à pressão atmosférica, produz vapor, partindo da energia térmica de alguma fonte qualquer, a exemplo, da energia química oriunda da combustão. Quase sempre a fonte geradora de calor é um combustível, especificamente utilizado para tal finalidade. Entretanto, calores residuais, oriundos de outros processos, também podem ser utilizados, e neste caso, referimo-nos à caldeiras de recuperação.

Para a produção de vapor d´água é necessário que haja combustão no interior da caldeira. Quanto mais viscoso o fluido combustível, mais difícil será a vaporização da água. Muitas vezes há a necessidade de haver um pré-aquecimento do fluido combustível, para que assim, haja uma diminuição da sua viscosidade. Assim, surge uma primeira classificação das caldeiras, ou seja, quanto ao tipo de combustível: (i) Combustíveis líquidos (óleo combustível, diesel); (ii)

Combustíveis gasosos (gás natural, gás combustível nas refinarias) e Combustíveis sólidos (madeira, coque de carvão, coque de petróleo, bagaço de cana)(MME,2005).

Existem diversos tipos de caldeira. Os tipos de caldeiras mais comuns utilizadas nas Indústrias sucroalcooleiras são do tipo Aquatubular. Nesse tipo de caldeira, a água a ser vaporizada circula pelo interior da tubulação, enquanto que o produto da combustão circula pelo exterior deles (VERGHHANINI, 2018).

As caldeiras mais modernas da indústria sucroalcooleira são compostas por um sistema de recuperação da energia dos gases de exaustão. Esse sistema, denominado de SREG é composto por um conjunto de equipamentos que tem a finalidade de aumentar a eficiência da combustão do bagaço de cana de açúcar (VERGHHANINI, 2018). O sistema SREG é composto pelos seguintes equipamentos:

- Pré Aquecedores de Ar - Possuem a função de aquecer o ar primário e secundário utilizado na caldeira. O ar quando aquecido, antes de adentrar a caldeira, aumenta a velocidade da combustão, contribuindo para que essa queima ocorra de forma mais controlada e estável.

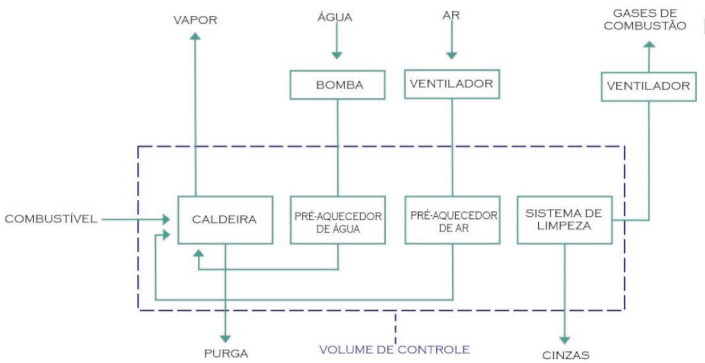
- Economizadores - São trocadores de calor com a função de elevar a temperatura da água de alimentação da caldeira, para a temperatura de vapor, a uma alta pressão, utilizando a energia remanescente dos gases oriundos da combustão. A grande vantagem da utilização dos economizadores é a produção de uma certa quantidade de vapor antes da entrada da água de alimentação na caldeira.

- Secadores do Bagaço - São necessários, uma vez que a umidade presente no bagaço influencia fortemente na sua combustão. As caldeiras em geral são projetadas para queimar o bagaço com a umidade entre 48 e 50%. Sendo a umidade superior a 52%, problemas poderão ocorrer, pois o bagaço não irá secar totalmente, não entrando em combustão.

A Figura 1 apresenta um esquema simplificado de uma caldeira com um sistema de recuperação de energia acoplado.

A geração de vapor nas caldeiras pode variar em função do grau de tecnologia empregada e da integração térmica dos sistemas existentes, o que influencia diretamente no consumo do combustível utilizado.

Figura 1 - Esquema simplificado de uma caldeira com um sistema de recuperação acoplado



Fonte: Própria dos autores (2020)

A tendência é um aumento cada vez maior na capacidade de geração de vapor das caldeiras destinadas ao setor sucroalcooleiro. As caldeiras com eficiência de 85% apresentam uma capacidade de 150 a 250 ton/h de vapor. Os sistemas mais modernos, com eficiência acima dos 90%, contam com uma geração de vapor de 300 a 450 ton/h (PROCKNOR,2017).

Há duas opções para implementar o sistema de cogeração na Indústria sucroalcooleira: (1) Aquisição de uma nova caldeira e (2) aumento da capacidade da caldeira já existente.

As caldeiras mais modernas recebem a água de alimentação pré - aquecida, com uma temperatura em torno dos 115˚C e bagaço com 50% de umidade, produzindo cerca de 40 a 55% de vapor em relação a cana processada, dependendo da eficiência da caldeira. Ou seja, para cada 100 kg de cana moída, se tem de 40 a 55 kg de vapor (PROCKNOR, 2017).

4.1 O Projeto de uma caldeira

O projeto de uma caldeira é ponto chave para assegurar a eficiência global da geração do vapor. A área de transferência de calor e as outras considerações do projeto são fatores importantes para determinar a quantidade de energia transferida dos gases oriundos da combustão. Obviamente, uma área de transferência de calor adicional contribuirá para a caldeira operar mais eficientemente (reduzindo a temperatura de exaustão dos gases da combustão). A quantidade de área de transferência de calor é um fator de projeto que leva a

consequências econômicas: uma superfície adicional de transferência de calor requer uma despesa adicional.

5. O VAPOR

O vapor tem um grande papel como fonte industrial de calor. O vapor além de ser uma energia limpa proporciona um aquecimento rápido e uniforme. Um aquecimento a vapor apresenta 1,5 a 2 vezes mais eficiência do que aqueles que utilizam água quente.

O vapor gerado nas caldeiras das indústrias sucroalcooleiras, é do tipo saturado, o que implica que a água e o vapor estão no ponto crítico, ou seja, coexistem no equilíbrio.

O vapor é consumido em diversas etapas do preparo da cana e extração do caldo, para o acionamento das turbinas que fornecem energia para os picadores, desfibradores e ternos de moenda. O vapor também irá acionar, além das turbinas, os geradores, produzindo energia elétrica. Quando há interesse na produção de energia elétrica, além da venda do excedente dessa energia para uma concessionária, a pressão de trabalho da caldeira deve ser dobrada.

A Tabela 2 apresenta uma média das propriedades físicas do vapor, utilizadas nas Indústrias sucroalcooleiras.

O vapor produzido na caldeira é então gerado pela transformação da energia química do bagaço em calor. A energia introduzida na instalação em massa, ou volume de combustível, ou seja, essa energia química, é denominada de energia disponível (Q_d). Unidades (kJ/kg) ou (kJ/m^3) (SEGUNDO *et al*., 2015).

Tabela 2 – Propriedades físicas do vapor (dados analisados no circuito de cogeração de uma usina da Paraíba)

Temperatura no Interior da fornalha (°C)	**125**
Pressão (kPa)	2,2 x 10^3
Temperatura do Vapor (°C)	125
Massa Específica, ρ (kg/m^3)	0,41
Viscosidade do vapor, ν (m^2/s)	0,135
Título do vapor (%)	99
Entalpia (kJ/kg)	2.994,34

Fonte: JAGUARIBE; SEGUNDO, 2016

A quantidade de energia absorvida pelo fluido de trabalho, ou seja, o vapor, pode ser utilizada além da geração de energia térmica, para a geração de energia elétrica. Essa energia é denominada de energia útil (Q_u) (kJ/kg) ou (kJ/m3). A energia útil, na verdade é o calor dos gases de exaustão de fato aproveitado, para a formação do vapor (SEGUNDO *et al*., 2015).

A diferença entre a energia disponível e a energia útil, é devido às perdas que ocorrem durante o processo, inevitáveis e nos vários pontos da instalação. Essa energia é denominada de energia de perdas (Q_p) (SEGUNDO *et al*., 2015).

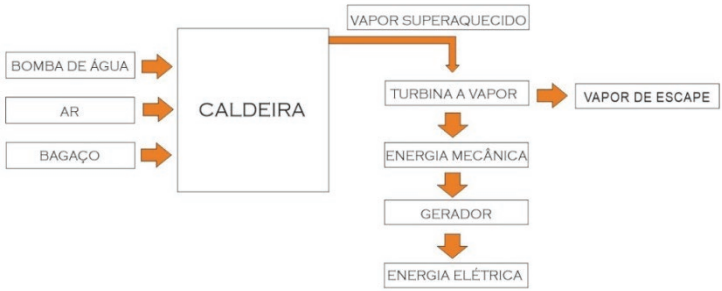
Em um processo otimizado, o vapor de escape possui normalmente uma temperatura em torno dos 125 ˚C. No entanto, para evitar os riscos de condensação, incorrendo na queda da eficiência do processo, é recomendável se trabalhar com um grau de superaquecimento na faixa de 10 a 15 ˚C, o que significa uma temperatura ótima em torno dos 140 ˚C.

6. PRODUÇÃO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA

Na geração de energia na indústria sucroalcooleira a queima do bagaço resulta em uma formação de gases de alta temperatura (gases de exaustão), que irá evaporar a água de alimentação, formando o vapor. O bagaço contendo 50% de umidade e 15% de teor de fibra é queimado no interior da caldeira aquecendo a água, até que esta atinja o estado de vapor (VERGHHANINI, 2018).

Essa produção de energia pode ser classificada de acordo com dois ciclos: (1) ciclo *topping*, aonde ocorre inicialmente a produção de energia elétrica através dos gases da combustão, seguida da utilização de energia residual em forma de calor e (2) ciclo *bottoming*, aonde a energia térmica é gerada inicialmente, e em seguida, o calor residual é utilizado para a geração de energia mecânica / elétrica. A Figura 2 apresenta um fluxograma simplificado de geração de energia na indústria sucroalcooleira, desde a entrada do bagaço, até a saída de energia.

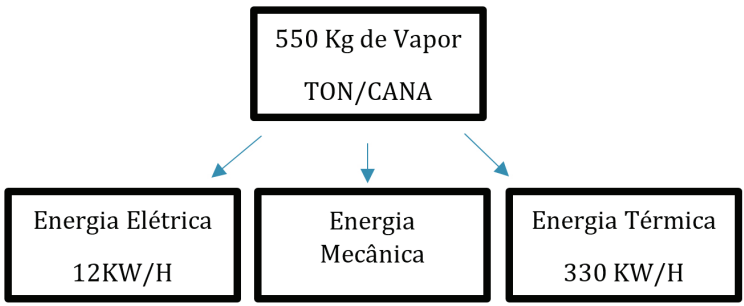
Figura 2 - Esquema simplificado da geração a partir do bagaço



Fonte: Própria dos autores (2020)

Um esquema simplificado para a cogeração de energia na indústria sucroalcooleira, a partir da produção de 550 kg de vapor, é representado pela Figura 3.

Figura 3 - Fluxograma simplificado da cogeração na indústria sucroalcooleira



Fonte: Própria dos autores (2020)

Para a geração de energia mecânica/elétrica, o vapor deve ser expandido em turbinas. O calor rejeitado no escape das turbinas, fornece a energia térmica requerida no processo. Apesar do subaproveitamento, é grande o potencial deste resíduo de Biomassa para a produção de energia térmica e mecânica e também de energia elétrica.

A produção simultânea de energia térmica, elétrica e mecânica, proveniente da queima do bagaço nas caldeiras geradoras de vapor das indústrias sucroalcooleiras, permite o aproveitamento de cerca de 15% da energia excedente do bagaço (FERREIRA *et al*., 2010).

Para permitir o total aproveitamento do subproduto bagaço de cana são propostos estágios de atualização e otimização tecnológica:

1. Auto suficiência energética através de melhorias de sistema de geração de vapor, com a utilização de geradores de maior eficiência, que permitem geração de vapor superaquecido a altas pressões.

2. Substituição das caldeiras antigas por caldeiras modernas para suportar essas altas pressões.

Para o aumento da capacidade de produção de energia elétrica em usinas, diversos investimentos em equipamentos são necessários, novos geradores de vapor, turbinas e aprimoramento na secagem do bagaço, visto que quanto maior o teor de umidade, menor a sua eficiência como combustível.

O processo e produção de energia elétrica a partir do bagaço de cana é totalmente automatizado e inserido nas linhas de produção

das usinas. A planta, após a colheita, passa por três moendas, restando apenas o bagaço que é conduzido para as caldeiras, onde é realizada a sua queima (ANEEL, 2018).

Apesar do pouco investimento por parte governamental, nesta fonte alternativa de energia elétrica o Centro Nacional de Referência em Biomassa, com base na produção de 267 mil toneladas anuais de cana de açúcar para ao uso na cogeração de energia elétrica a partir do bagaço, em substituição aos combustíveis fosseis, estima um potencial de 3.852 MW, podendo chegar a 20.000 MW por ano(FERREIRA *et al*., 2010).

7. MATÉRIA PRIMA (O BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR)

A biomassa do bagaço da cana-de-açúcar vem sendo utilizado no Brasil em uma larga escala para geração de vapor, eletricidade e geração de calor entre suas principais aplicações, sendo um subproduto da extração do caldo nas usinas de produção de álcool e açúcar. Tendo em vista, a elevada produção deste produto e sua implantação de novas usinas, observa-se um aumento considerável da demanda do mercado brasileiro e mundial por este produto. Assim, a biomassa da cana-de-açúcar torne-se o principal resíduo agrícola do país, especialmente quando se refere a utilização de biomassa para geração de energia (BACCI; SANTOS, 2008) e da quantidade produzida da cana-de-açúcar aproximadamente 30% do peso viram resíduos chamado bagaço.

Considerando a safra de cana-de-açúcar no período de 2018/2019 no Brasil, foram moídas mais de 620 milhões de toneladas,

estimando o grande potencial da utilização desta biomassa, sabendo que certas quantidades são utilizadas para a produção de álcool e açúcar na cogeração de vapor e energia elétrica (NOVACANA, 2019). Fazendo uma comparação do conteúdo energético de uma tonelada de cana-de-açúcar 1.718.000 kcal, com potencial energético de um barril de petróleo que é de 1.386.000 kcal, o que equivale energeticamente uma tonelada de cana-de-açúcar a 1,24 barris de petróleo bruto. Considerando a safra de produção dos anos de 2018 até o presente momento, esta safra corresponde a 620 milhões de toneladas, estipula-se que equivalentes energéticos corresponde a 768,8 milhões de barris de petróleo (NOVACANA, 2019).

A qualidade do bagaço é essencial para um melhor aproveitamento desse combustível, assim sendo, o bagaço bem preparado proporciona uma queima excelente, estável e uniforme.

7.1 Bagaço excedente

Uma vez que a fração utilizada no processo produtivo, cerca de 37,5% da cana moída, é suficiente para atender a demanda, a usina vende o excedente, ou seja, cerca de 24 ton de bagaço por safra (JAGUARIBE *et al.*, 2002).

O bagaço excedente é calculado subtraindo-se o bagaço total produzido, menos o consumo do bagaço consumido durante a safra, durante a entressafra, bem como uma parcela correspondente a um estoque de segurança. A fórmula para tal cálculo é a que se segue na Equação 1 (JAGUARIBE *et al.*, 2002):

- $B_{exc} = B_t - B_{sf} - B_{ef} - B_{est}$ (1)

Onde:

- B_{exc} é o bagaço excedente
- B_T é o bagaço total produzido
- B_{sf} é o bagaço utilizado na safra
- B_{ef} é o bagaço utilizado na entressafra
- B_{est} é o bagaço estocado

7.2. Composição física e química médias do bagaço

A composição física é utilizada para a determinação da quantidade de fibra no bagaço. Já a composição química, nos permite fazer uma avaliação energética do bagaço como combustível, relacionando-a com o seu Poder Calorífico (PC). As composições físicas e química médias do bagaço estão expressas nas Tabelas 2 e 3 abaixo.

Tabela 2 – Composição física média do bagaço

Umidade (W)	**50%**
Impurezas e sólidosdissolvidos (D)	2%
Teor de açúcar no bagaço (s)	3%
Pureza residual do caldo(ϕ)	75,18%
B	37,5%

Fonte: JAGUARIBE; SEGUNDO, 2016.

Tabela 3 – Composição química média do bagaço

C (%)	**46**
H (%)	6
O (%)	44
Cinzas(Ɛ)	4

Fonte: JAGUARIBE; SEGUNDO, 2016.

O teor de fibra do bagaço (*f*) é dado pela Equação 2:

- $f = 100 - w - D$ (2)

Onde:

- w = umidade
- D = Impurezas e Sólidos dissolvidos

7.3 O poder calorífico do bagaço

O Poder Calorífico de um combustível é a quantidade de energia, na forma de calor, liberada durante sua combustão completa, por unidade de massa, ou de volume. Caso esta quantidade de energia inclua o calor liberado pela condensação da água formada durante a combustão, o poder calorífico é chamado de Superior (PCS), e estabelece bem o potencial de calor contido no combustível. Assim, o Poder Calorífico Inferior (PCI) é a energia efetivamente disponível, por unidade de massa, ou de volume após serem deduzidas as perdas com a evaporação da água. (JAGUARIBE e SEGUNDO, 2016).

A diferença entre PCS e PCI é a energia requerida para evaporar a umidade presente no combustível. Esses cálculos utiliza o PCI, pois o calor latente referente à evaporação da umidade do combustível, não é aproveitável nos processos térmicos (LOTRA e VENTURINI, 2012).

O Poder Calorífico Superior do bagaço é o calor liberado quando 1 kg de bagaço é queimado, sob pressão atmosférica.

Não existe uma metodologia normalizada para a determinação do PCS e do PCI de um combustível, entretanto, nos anos 70, foi desenvolvido um equacionamento para a indústria sucroalcooleira (HUGOT, 1977), ainda hoje utilizado. As Equações (3) e (4) são utilizadas para o cálculo do PCS e do PCI do bagaço:

- $$PCS = 19.246\,\frac{f}{100} + 16.548\,\frac{s}{100} + 17.154\,\frac{i}{100} \quad (3)$$

- $$PCI = 19.246\,\frac{f}{100} + 16.548\,\frac{s}{100} + 17.154\,\frac{i}{100} - 1.454\,\frac{100-w}{100} - 2.510\,\frac{w}{100} \quad (4)$$

Onde i, ou seja, a relação entre o poder calorífico do açúcar e das impurezas, é dado pela Equação 5:

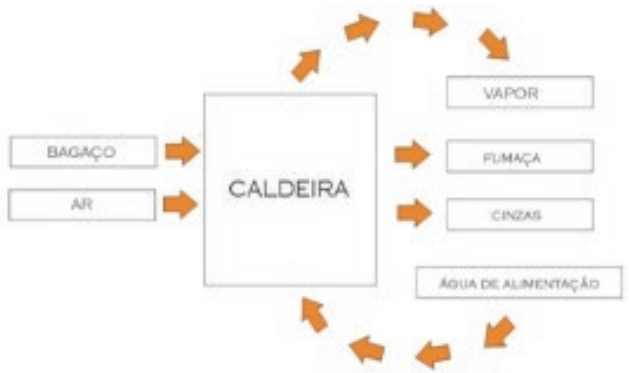
- $$i = \frac{100-\varphi}{\varphi}\,\mathrm{x} \quad (5)$$

O bagaço in natura, com cerca de 50% de umidade, possui um PCS de cerca de 7.000 kJ/kg. Para se ter uma ideia da importância da secagem do bagaço de cana antes de entrar na caldeira, o Bagaço contendo 33% de umidade, tem o seu PCS aumentado para 19.268 KJ/Kg (RAMALHO, 2019).

7.4 A combustão do bagaço

A queima do bagaço consiste em sua oxidação (reação com o oxigênio) no interior da caldeira. O produto da combustão é um material gasoso constituído por CO, CO_2, SO_2 e vapor de água. O material mineral que compõe o bagaço, passa a constituir o resíduo sólido da combustão. A Figura 4 apresenta um esquema simplificado da combustão do bagaço.

Figura 4 - Fluxograma de combustão do bagaço



Fonte: Própria dos autores (2020)

A massa de oxigênio necessária para oxidar totalmente a massa de bagaço é dada pela Equação 6 (SEGUNDO *et al.*, 2015):

- $$MO2 = 2{,}67 \frac{C}{100} + 8 \frac{H}{100} - \frac{O}{100} \quad (6)$$

Onde:

- C, H e O representam os teores em % do carbono, hidrogênio e Oxigênio respectivamente.

Já para o cálculo do volume total de ar necessária para que seja queimada 1 kg de bagaço é dada na Equação 7:

- $$Var = \frac{Mar}{\rho ar} \qquad (7)$$

Onde: a massa do ar (Equação 8) será dada em função da massa de oxigênio, considerando-se que 21% do ar atmosférico é composto de oxigênio.

- $$Mar = \frac{M\,O2}{0{,}21} \qquad (8)$$

O volume de água será igual ao volume de oxigênio que entrou na combustão do bagaço, multiplicado por dois.

O processo de combustão pode ser completo, ou incompleto, este último muito indesejável do ponto de vista energético, uma vez que o combustível não é totalmente queimado. Esta parte de combustível não queimada, sai pela chaminé, em sua forma gasosa, juntamente com produtos nocivos ao meio ambiente e fuligem.

Na prática, utiliza-se um excesso de ar para se conseguir a completa oxidação de todo o combustível. Ressaltando-se neste ponto, que quanto maior for o excesso de ar, maior será o teor de CO_2 e consequentemente, menor será a eficiência da caldeira. Normalmente, para o caso dos combustíveis sólidos, coeficiente de excesso de ar varia de 15 A 30% (SEGUNDO *et al.*, 2015).

O volume total dos gases de combustão é dado pela Equação 9 (SEGUNDO *et al.*, 2015):

- $V_{ac} = V_{O2} + V_{CO2} + V_{N2} + V_{H2O}$ (9)

Entretanto uma correlação bastante utilizada, já considerando o ar em excesso é dada através da Equação 10(SEGUNDO *et al.*, 2015):

- $V_{as} = V_{ar}(1 - w) + V_{ai}(1 - w) + 1{,}244\, w$ (10)

8. PRINCÍPIO DO BALANÇO ENERGÉTICO NAS CALDEIRAS

Um balanço energético consiste basicamente na obtenção de índices que traduzem o rendimento destas caldeiras. O rendimento de uma caldeira caracteriza a perfeição com que o sistema térmico opera. Entretanto, a caldeira depende de uma série de dispositivos, cada um deles, consumindo uma parcela da energia que entra.

Nas aplicações que se seguem, partiu-se Primeira Lei da Termodinâmica, que traduz o princípio da conservação de energia, aonde uma das principais considerações feitas é que a variações de energia cinética e potencial do sistema são supostas desprezíveis, em face da variação de energia interna U (JONES; HAWKINS,1986). Considera-se também um regime permanente, ou seja, não há variações significativas das propriedades do sistema com o tempo.

A energia térmica da massa que entra e da massa que sai da caldeira é representada pela entalpia H, cujo valor, de uma forma mais geral, é uma função da temperatura e da pressão do processo.

O calor que entra na caldeira, aumenta a temperatura da água líquida de alimentação (a água entra a uma baixa temperatura e alta pressão), saindo como vapor saturado, ou superaquecido, a uma mesma pressão, porém a uma temperatura mais alta. Como a energia não desaparece, a energia que entra na caldeira é igual a que sai, de acordo com a Equação 11:

- $Q_{entra} = Q_{sai}$ (11)

Ou, em termos de entalpia (H):

- $H_e + Q = H_s$ (12)

onde os índices representam a entalpia na entrada (e) e na saída (s) da caldeira.

A Figura 5 representa o esquema da entrada e saída de energia da caldeira.

Figura 5 - Esquema de entrada e saída de energia da caldeira

Fonte: Própria dos autores (2020)

Para o cálculo da eficiência da caldeira, dois métodos diferentes serão utilizados: (1) Método Direto e (2) Método Indireto (HUGOT, 1977; BEJAN, 1988; CAMARGO *et al.*, 1990; KOTAS, 1995). Independentemente do método de cálculo utilizado para calcular a eficiência de uma caldeira, o rendimento térmico é sempre inferior a 100% e quanto menor a quantidade de perdas, maior será o seu rendimento.

8.1 Método direto

A partir da aplicação do balanço de energia na caldeira, pode-se obter a formulação para o cálculo do rendimento pelo método direto. Esse método é baseado na medida direta da energia útil e somente pode ser aplicado para operações de caldeira em operação. Além disso, como as vazões de vapor, ar e combustível estão sujeitas a erros significativos, não permite um cálculo com precisão significativa. Neste caso a eficiência do processo é definida pela Equação 13:

- $$\eta_{md} = \frac{Q_{util}}{Q_{disponível}} \text{ x } 100 \qquad (13)$$

O calor útil é aquele que realmente é utilizado para vaporizar a água e formar o vapor saturado, ou vapor superaquecido, com a vazão desejada. Já o calor disponível, é todo aquele oriundo da combustão, neste caso específico, da queima do bagaço.

A energia disponível é calculada pela Equação 14 a seguir:

- $$\eta_{MD} = \frac{\dot{m}_V\,(Hv - H_{H2O})}{\dot{m}_B\,PCI}\; x\; 100 \qquad (14)$$

Onde:

- m_V = vazão mássica do vapor
- m_B = vazão mássica do bagaço
- Hv = Entalpia do vapor
- H_{H2O} = Entalpia da água de alimentação

Pode-se dizer que a principal parcela de energia da potência disponível é referente à energia química do bagaço, as demais estão associadas às entalpias dos fluxos de combustível e do ar, utilizado para a combustão.

8.2 Método Indireto

O cálculo da eficiência por este método é bem mais realista, uma vez que contabiliza todas as perdas de energia que ocorrem ao longo do processo, sendo estas portanto, uma outra abordagem para estudo. Isto posto que, conhecendo-se as perdas de energia, bem como as suas causas, pode-se encontrar a maneira de minimizá-las, tornando o funcionamento de uma caldeira mais adequado. Neste caso, tal eficiência é dada pela Equação 15:

- $$\eta_{mi} = 100 - \sum \frac{Q_{perd}}{dispon} \quad (15)$$

Faz-se necessário ressaltar que na Q_{perdas}, é contabilizado todo o calor perdido ao longo do processo.

8.3 Avaliação das perdas energéticas na caldeira

Como já foi visto anteriormente, a eficiência da caldeira geradora de vapor, calculada pelo método indireto, é feita através das perdas de energia ao longo do processo (SEGUNDO *et al*., 2015), apresentada pela Equação 16:

- $$\eta_{mi} = 100 - \sum q_{perdas} \quad (16)$$

8.3.1 PERDA JUNTO AOS GASES DE EXAUSTÃO

Essa perda ocorre devido aos gases da combustão deixarem a caldeira a uma temperatura bastante elevada e é o item mais importante do balanço energético(SEGUNDO *et al*., 2015), sendo o primeiro ponto que tem capacidade de provocar a queda na eficiência da caldeira, atingindo de 4 a 7% nas caldeiras de grande porte. Deve-se utilizar no cálculo da eficiência da caldeira, uma temperatura menor do que a temperatura rela dos gases.

8.3.2 PERDA DEVIDO AO EXCESSO DE AR

O grande excesso de ar é indesejável, pois diminui a eficiência da chama de combustão, aumentando as perdas de energia ao longo do processo. Por outro lado, um baixo excesso de ar pode resultar em uma combustão incompleta, formação de muito CO e fuligem.

8.3.3 PERDA PELA SUPERFÍCIE DA CALDEIRA

Este tipo de perda relaciona-se aos mecanismos de transmissão de calor de radiação e convecção, que representam uma parcela muito pequena das perdas energéticas, isso porque todas as caldeiras possuem isolamento para minimizá-las. No entanto, esse isolamento nunca chega aos 100% e é fundamental a verificação do material utilizado, bem como a qualidade de sua instalação, buscando-se sempre uma máxima eficiência na transferência de calor.

8.3.4 PERDA DEVIDO À COMBUSTÃO INCOMPLETA

Normalmente esse tipo de perda está associada ao teor de CO nos gases de exaustão, que é o indicativo de uma combustão mal feita, que depende, sobretudo do excesso de ar. O aparecimento dessa perda indica uma mistura de ar/combustível imperfeita, além do pouco tempo de contato entre o ar e o combustível, podendo alcançar 5%.

8.3.5 PERDA DEVIDO AO COMBUSTÍVEL NÃO QUEIMADO

A perda de energia pelo combustível não queimado e é determinada pela presença desse combustível nas escórias, nas cinzas retiradas da fornalha, bem como nas cinzas voláteis arrastadas pelos gases. Na queima do bagaço em fornalhas de grande porte, essa perda situa-se entre 0,5 a 5%.

8.3.6 PERDA DEVIDO ÀS ENTALPIAS DAS ESCÓRIAS

Este tipo de perda energética inclui a entalpia da escória e a perda devido ao resfriamento de dutos echaminés, não pertencentes ao sistema de circulação da caldeira. As escórias retiradas do fundo da fornalha, estão a uma alta temperatura superior ao início da fusão das cinzas. Assim, parte do calor é transferido para a água de resfriamento da escória, que para caldeiras de fornalha fechada, a perda energética, está em torno dos 2%.

8.4 Oportunidade de melhorias na eficiência de uma caldeira

Ao se identificar as perdas, se é capaz de implementar a eficiência de um processo, buscando-se uma solução específica para cada caso. Muitas são as oportunidades para melhorar a eficiência de uma caldeira. Oportunidades comuns de melhorar a eficiência estão listadas a seguir:

- Minimizar o excesso de ar, reduzindo a quantidade de calor perdido nos gases de escape na chaminé, permitindo que maior quantidade de energia do combustível seja transferida para o vapor.
- Otimizar a quantidade de excesso de ar, a fim de minimizar a perda energética, sem produzir a combustão incompleta.
- Limpar as superfícies de transferência de calor da caldeira, promovendo a efetiva transferência de calor dos gases de combustão para o vapor.
- Instalar equipamentos de recuperação de calor (economizadores para a água de alimentação ou pré-aquecedores para o ar de combustão).
- Aperfeiçoar o tratamento de água, para minimizar as descargas de fundo da caldeira.
- Adicionar / restaurar os refratários da caldeira.

- Implementar programa efetivo de manutenção dos purgadores de vapor, reduzindo a passagem de vapor vivo para o sistema de condensado e promovendo uma operação eficiente de transferência de calor no equipamento de uso final do vapor.
- Bloquear as linhas de vapor fora de uso.
- Utilizar turbinas de contrapressão, ao invés de válvulas redutora de pressão.

9. CÁLCULO DOS PARÂMETROS ÓTIMOS NA GERAÇÃO DO VAPOR A PARTIR DO BAGAÇO

Nesta seção serão consideradas as energias trocadas entre o bagaço e a água de alimentação, no interior da caldeira, para formar o vapor (SEGUNDO *et al*., 2015). Desta forma, considerar-se-á o calor de saída, ou seja, a diferença de entalpia entre a água e o vapor, a uma mesma temperatura. O calor consumido pela água para a conversão em vapor, será dado pela seguinte Equação 17:

- $$Q_{saída} = \frac{m_{vapor}\ (hvapor - hagua)}{3600} \qquad (17)$$

O calor na entrada da caldeira é calculado através da Equação 18.

- $$Q_{entrada} = \frac{Q_{saída}(100)}{\eta} \qquad (18)$$

O consumo de bagaço (combustível) ótimo, é fornecido pela relação apresentada na Equação 19.

- $$B = \frac{Q_{saída}\,(3600)}{PCI} \qquad (19)$$

E finalmente, para um regime de escoamento de vapor, totalmente desenvolvido no interior da caldeira, a pressão ótima, em qualquer ponto da tubulação, pode ser fornecida pela seguinte Equação 20:

- $$P = \frac{\rho_{vapor}\ x\ \eta\ x\ PCI\ x\ B}{m_{vapor}} \qquad (20)$$

10. CONCLUSÕES

O Brasil desponta no cenário mundial como o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, consequentemente fazendo com que o bagaço de cana de açúcar, resíduo final da extração do caldo, seja a biomassa mais utilizada.

Neste capítulo se demonstrou, como a partir do bagaço de cana de açúcar é feita a cogeração de energia na indústria sucroalcooleira, mostrando-se como se dá a produção do vapor no interior das caldeiras e a sua importância ao longo do processo. Foi mostrado o princípiodo balanço energético no interior das caldeiras e os métodos para o cálculo da sua eficiência, fazendo-se uma análise dos diferentes parâmetros envolvidos na geração do vapor a partir do bagaço de cana de açúcar.

A energia produzida por meio de bagaço de cana pode contribuir não só para reduzir as emissões de poluentes, mas também para diversificar a matriz energética brasileira. Desde 2004 o Brasil consolidou-se como o maior produtor de cana de açúcar do mundo e esta consolidação reflete o bom desempenho o setor, impulsionado por uma maior geração energética. Ademais, a geração de energia elétrica com o bagaço desempenha um papel fundamental no cenário nacional, visto que, este tipo de indústria gera um negócio significativo, disponibilizando cerca de 1 milhão de empregos.

11. REFERÊNCIAS

ANEEL - **Curso EAD: Fundamentos do Setor Elétrico** -2018.

Disponível em: http://www.labtime.ufg.br/modulos/aneel

Acesso em: 16 de maio de 2020.

BACCI, M.S.; SANTOS, A. M. **Avaliação energética do bagaço de cana em diferentes níveis de umidade graus de compactação**. Anais do XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP), Rio de Janeiro, 2008.

BEJAN, A. **Advanced Engineering Thermodynamics**. A Wiley-Interscience Publication, New York, 1988.

CAMARGO, C. A. **Conservação de Energia na Indústria do Açúcar e Álcool: manual de recomendações**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, São Paulo, 1990.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Matriz Energética e Elétrica** – 2017.

Disponível em: http://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica. Acesso em: 17 de maio de 2020.

EPE - **Empresa de Pesquisa Energética – Publicações**. Disponível em: http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico457/massa%20e%20Epans%C3%A3o%20de%20Energia.pdf. Acesso em 15 de maio de 2020.

FERREIRA, F. M. **Cogeração no Setor Sucroalcooleiro em Goiás**. 2010. Monografia (MBA em Gestão Sucroalcooleira) – Centro Universitário de Lins – Unilins, 2010.

FRANCO, F. N. **Alguns parâmetros de desempenho operacional de um sistema de recolhimento de palhiço de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp) a granel**. 2003. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

GOYAL, H. B.; SEAL, D.; SAXENA, R. C. Ã. Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources: A review.**Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 12, p. 504–517, 2008.

HUGOT, E. **Manual da Engenharia Açucareira**. Ed. Mestre Jou, São Paulo, Vol. I e II, 1977.

JAGUARIBE, E. F., LOBO, P. C., LIMA NETO, J. R., SOUZA, W. L., ROCHA, F. A. A. **Ampliação de uma planta de cogeração de uma destilaria de cana de açúcar visando a autossuficiência energética – estudo de um caso**. Anais do II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, CONEM, trabalho CPB0130, João Pessoa-PB, 2002.

JAGUARIBE, D.C.A., SEGUNDO, V. **Principle of a thermal balance on a steam boiler of a sugar cane mill**. Anais do 6thEuChems Congress, Sevilla, 2016.

JONES, J. B., HAWKINS, G. A. **Engineering Thermodynamics – an introductory textbook**. John Wiley & Sons, Inc, New York, 1986.

KOTAS, T. J. **The Exergy Method of Thermal Plant Analysis**. Krieger Publishing Company, Reprint edition, Florida, USA, 1995.

MAPA - **Ministério da Agricultura e Pecuária**. 2015. Disponível em: www.agricultura.gov.br. Acesso em: 18 de maio de 2020.

MIRANDA, I.C. **Aproveitamento energético de resíduos de biomassa: Bagaço e palha de cana-de-açúcar**. 2009. Dissertação de Mestrado em Ciências. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. **Bioresource Technology**, v. 83, p. 47–54, 2002.

NOVACANA – **Levantamento da Safra de 2018 / 2019**.

Disponível em: https://**www.novacana.com/n/cana/safra/conab-levantamento-safra-2018-19-cana-de-acucar-210818**. Acesso em 17 de maio de 2020.

COMAS, C.C. **Mato Grosso do Sul tem amplo potencial para transformar biomassa em energia**. Embrapa, 2018. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/35222348/mato-grosso-do-sul-tem-amplo-potencial-para-transformacao-de-biomassa-em-energia. Acesso em 16 de maio de 2020.

PROCKNOR, C. **Publicações**. 2017. Disponível em: https://www.procknor.com.br/br/br/artigos. Acesso em: 16 de maio de 2020.

RAMALHO, A.A. **Gaseificação de *pellets* de bagaço de cana de açúcar para a obtenção de energia limpa, e de alto poder calorífico**. 2019. Trabalho de Concluão de Curso em Tecnologia Sucroalcooleira, Universidade federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.

SAXENA, R. C.; SEAL, D.; KUMAR, S.; GOYAL, H. B. Thermo-chemical routes for hydrogen rich gas from biomass: A review.**Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 12, n. 7, p. 1909–1927, 2008.

SEGUNDO, V.; JAGUARIBE, D.C.A.; PONTES, T. **Princípios de balanços energéticos em caldeiras sucroalcooleiras**. Novas Edições Acadêmicas, São Paulo, 2015.

VERGNHANINI, R. **Metodologia Simplificada de Cálculo de Rendimento Térmico de Caldeiras**. Artigos Técnicos – 2018.

Disponível em: https://www.revistaadnormas.com.br/2018/11/20/metodologia-simplificada-de-calculo-do-rendimento-termico-de-caldeiras. Acesso em: 16 de maio de 2020.

CAPÍTULO V

Gaseificação Do Bagaço De Cana-De-Açúcar, A Rota Termoquímica Para A Produção De Etanol De Segunda Geração

»*Danielle Christine Almeida Jaguaribe*
»*Joelma Morais Ferreira*

1. INTRODUÇÃO

Devido ao elevado preço do petróleo e a escassez desse combustível a longo prazo, é inegável a necessidade por novas alternativas que permitam substituir e sintetizar os compostos, dele derivados. Assim sendo, a utilização de biomassa residual, ou florestal, como fonte alternativa de energia, apresenta-se como uma alternativa bastante promissora, pois pode ser convertida em energia através da sua queima direta (conversão termoquímica). A rota termoquímica agrega novas tecnologias a cadeia produtiva, como por exemplo a síntese de Fischer Tropsch, com reação catalítica para a produção de energia e biocombustíveis.

A técnica de conversão termoquímica da biomassa, em um biocombustível gasoso, conhecido como gás de síntese (*syngas*), é denominada de gaseificação. Na maioria dos casos, os processos desenvolvidos com esta finalidade, partem da oxidação parcial da biomassa, originando o gás de síntese, que consiste em uma mistura de monóxido de carbono, dióxido de carbono, metano e hidrogênio. O gás de síntese é um intermediário chave na indústria química, e pode ser usada em diversas sínteses de produtos químicos e combustíveis, além de ser fonte de hidrogênio puro ou monóxido de carbono.

É a partir do gás de síntese, oriundo da gaseificação da biomassa residual, ou florestal, tal como o bagaço da cana de açúcar, que se pode obter diversos compostos combustíveis, desde os hidrocarbonetos, a compostos oxigenados, a exemplo de aldeídos e álcoois superiores(WILLIAM, B.; KAFKA, S., 2015). A hidrogenação catalítica do CO, sob pressões e temperaturas moderadas e dependendo do catalisador utilizado, fornece uma vasta gama de produtos: hidrocarbonetos, bioprodutos (hidrogênio e amônia) a biocombustíveis (etanol de 2G e álcoois superiores).

A conversão do *syngas* em álcoois, e em outros compostos oxigenados, é conhecida como síntese de Fischer–Tropsch (DAVIS, 2010), e consiste em uma polimerização, que leva a uma distribuição de produtos com diferentes pesos moleculares. Esta reação já é conhecida desde o final dos anos 20. Entre 1970 e 1990, muitos trabalhos foram conduzidos com esta finalidade. Muito embora nenhum deles fora implementado em escala industrial, devido às condições severas de operação, tais como elevadas temperatura e pressão, bem como o alto custo dos catalisadores (RUMÃO, 2013).

É sabido que, muito embora o etanol apresente uma série de vantagens em relação a outros combustíveis, principalmente relacionado à sua baixa toxidade, pensar em uma síntese de misturas de metanol e álcoois superiores, representa uma excelente rota alternativa para a formulação de combustíveis menos poluentes, e com maior potencial energético.

Para a implementação da técnica de gaseificação na indústria sucroalcooleira, parte da biomassa vai para a queima na caldeira, formando o vapor que vai dar origem às energias, e outra parte do bagaço vai ser queimado junto com a palha com pouco oxigênio (oxidação parcial), de forma a obter um gás contendo principalmente $CO + H_2$ (gás de síntese).

Este capítulo trata da potencial aplicação dos sistemas de gaseificação do bagaço da cana de açúcar, para a produção de etanol de segunda geração + álcoois superiores, através da síntese de Fischer-Tropsh. Esse processo mostra-se como uma extraordinária alternativa de fonte energética da conversão catalítica do etanol em combustível de alto valor agregado e que segue a tendência mundial da evolução na utilização dos combustíveis gasosos (VIEIRA,2014). Finalmente uma perspectiva é oferecida para destacar os desafios e as oportunidades associadas a essa área de pesquisa.

Os catalisadores reportados nesse estudo, bem como os resultados alcançados, foram baseados nos experimentos realizados pelas autoras, com colaboração das suas equipes de trabalho, com subsídios do CNPq.

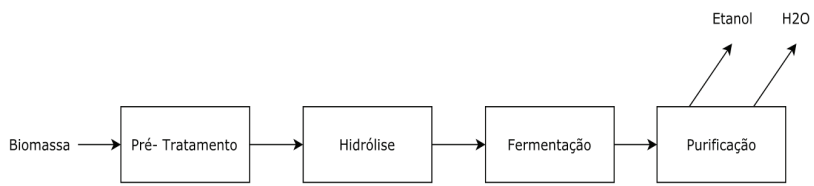
2. ROTAS PARA A PRODUÇÃO DO ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO

2.1 Rota fermentativa

Para a obtenção do etanol segunda geração através da biomassa é preciso que o bagaço passe por alguns processos, sendo eles: pré-tratamento, hidrólise, fermentação e purificação, obtendo-se o produto final.

A Figura 1 apresenta um esquema simplificado de obtenção do etanol de segunda geração. De acordo com a Figura 1, nota-se que na obtenção do etanol de segunda geração existem algumas etapas a mais do que na produção de etanol de primeira geração, implicando em um custo mais elevado do produto final.

Figura 1 - Fluxograma para obtenção do etanol de segunda geração a partir da biomassa



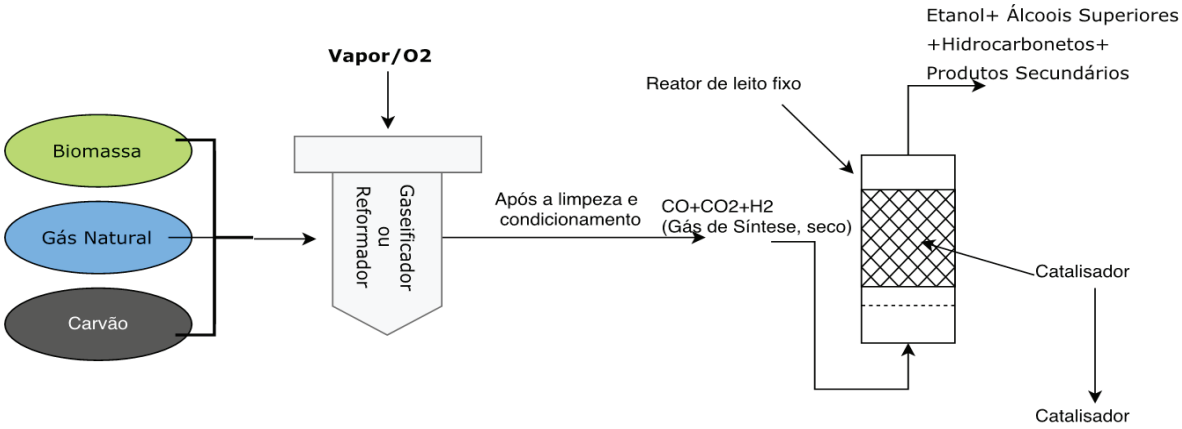
Fonte: Própria dos autores (2017)

A rota fermentativa será discutida detalhadamente no capítulo VI.

2.2 Rota termoquímica

Uma parte do bagaço excedente vai para a queima na caldeira, formando o vapor que vai dar origem a energia térmica, e posteriormente mecânica e elétrica. A outra parte do bagaço vai ser queimada junto com a palha e as pontas, com pouco muito pouco oxigênio (oxidação parcial), de forma a obter um gás contendo principalmente $CO + H_2$ (gás de síntese). A reação catalítica do $CO + H_2$, sob pressões e temperaturas moderadas e dependendo do catalisador fornecerá etanol de segunda geração e os álcoois superiores. A Figura 2 apresenta um esquema simplificado da conversão catalítica de biomassa em álcoois superiores.

Figura 2 - Esquema genérico da conversão termoquímica de biomassa, gás natural e carvão para álcoois



Fonte: Própria dos autores (2017)

3. ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO

Aos poucos, outras variedades energéticas economicamente atraentes vêm ganhando espaço no planeta e tendem a ser adotadas em larga escala pelo mundo industrializado. A procura por fontes de energia que substituam com eficácia os combustíveis fósseis tem incentivado as pesquisas relacionadas aos biocombustíveis, aqueles derivados da biomassa e menos agressivos ao meio ambiente. Neste período de incertezas e transformações, no meio ambiente e nas empresas, cabe a reflexão sobre a importância do papel da produção limpa e coeficiente.

O processamento industrial da cana de açúcar apresenta uma cadeia produtiva em que várias de suas etapas, se não gerenciadas adequadamente, podem provocar impactos ambientais indesejados. Com o aumento da produção de açúcar e álcool, mais resíduos são gerados e nem sempre os resultados são alcançados. Devido a isso, observa-se a necessidade de se viabilizar a produção de etanol a partir de outras matérias-primas, por exemplo, o bagaço de cana-de-açúcar. O uso desta matéria-prima poderá elevar em 30%, no mínimo, a produção de etanol no Brasil, sem a necessidade da expansão da área de plantio (LIBERATO, 2019). A obtenção de etanol celulósico a partir dos polissacarídeos da parede celular vegetal é denominada de etanol de segunda geração (BUCKERIDGE *et al*., 2010).

Enquanto as tecnologias de primeira geração estão baseadas na fermentação alcoólica dos carboidratos presentes, por exemplo, no caldo de cana-de-açúcar, a segunda geração consiste na produção de

etanol celulósico a partir da quebra dos polissacarídeos presentes na parede celular vegetal dos resíduos lignocelulósicos (PITARELO, 2012).

O etanol de segunda geração se apresenta como uma tecnologia capaz de fazer frente aos desafios energéticos internacionais contemporâneos: alta do preço do petróleo nos mercados internacionais, dependência dessa fonte por determinados países, aquecimento global e a demanda crescente de etanol de primeira geração tanto no mercado nacional quanto internacional (ARAÚJO; NAVARRO; SANTOS, 2013).

4. ÁLCOOIS SUPERIORES

Os álcoois superiores, também conhecidos como HAS, compõem uma mistura de álcoois C_1 a C_8, cujo propósito é obter uma alta taxa de etanol, em relação a uma taxa mínima de metanol, álcool de menor poder calorífico e consequentemente, de menor valor comercial (JAGUARIBE, 2017).

5. FUNDAMENTOS DA GASEIFICAÇÃO

A produção de energia, através da gaseificação da biomassa, pode parecer uma tecnologia recente, mas na realidade possui mais de 100 anos de existência. Ela foi esquecida por um longo tempo devido ao baixo preço dos combustíveis fósseis. Entretanto após a crise do petróleo, seu estudo foi retomado, apresentando-se como uma boa opção para a substituição aos combustíveis fósseis, e devido à sua baixa emissão de poluentes. E muito embora uma análise feita

pela organização British Petroleum (BP) (EPE, 2007) tenha concluído que existe reserva de óleo bruto para as próximas décadas, sabe-se que combustíveis fósseis é fonte finita.

Gaseificação é um processo termoquímico de oxidação parcial, na qual substâncias que contêm carbono em sua composição (madeira rejeitos de agricultura, como biomassa, coque, etc.) são convertidos em uma mistura de gases. Essa mistura de gases resultante é constituída basicamente por monóxido de carbono (CO) e hidrogênio (H_2), com pequenos traços de outros gases, tal como o metano (CH_4), o dióxido de carbono (CO_2) e água. O gás resultante é denominado de gás de síntese e pode ser utilizado para a síntese de outros combustíveis (gasolina, diesel, etano,etc), ou outros produtos químicos. Também pode ser utilizado de forma direta, como combustível, em turbinas ou motores a gás (WILLIAM, B.; KAFKA, S., 2015).

Em resumo, a produção termoquímica a partir da biomassa é feita através da gaseificação, um processo termoquímico que envolve a conversão de material carbonáceo em calor, energia e combustível. Estima-se que 130 milhões de toneladas de resíduos agrícolas, podem ser utilizados para produzir 28 bilhões de etanol, anualmente (RAMESH; RAMACHANDRAN, 2019). MESH C.

O processo de gaseificação é conduzido a temperaturas elevadas (800~1000°C)(SÁNCHES, 2010). O processo é considerado como sendo resultante de uma combustão parcial da biomassa, uma vez que o volume de ar, ou mais precisamente o oxigênio utilizado é inferior aquele necessário para a queima completa da biomassa. Assim, nos processos de gaseificação, a matéria orgânica é total ou parcialmente transformada em gases, cujos principais

componentes são: CO (monóxido de carbono), CO_2 (dióxido de carbono), H_2 (hidrogênio) e, dependendo das condições de operação, CH_4 (metano) e hidrocarbonetos leves. Além de vapor de água em diferentes proporções. Caso a quantidade de ar seja suficiente para a combustão completa, dado que a biomassa contém moléculas de carbono, hidrogênio e oxigênio, serão produzidos apenas dióxido de carbono (CO_2), vapor de água e N_2. Na prática, a gaseificação consegue converter 70 a 90% da energia da biomassa em energia interna do gás (REED e DAS, 1998).

O gaseificador é essencialmente um reator onde ocorrem várias reações químicas e físicas. Dentro do reator a biomassa perde umidade, aquece, sofre pirólise, oxida e se reduz por toda a extensão do reator até que chega ao final

como uma mistura de combustível gasosa. Assim sendo, uma vez que os gases apresentam uma maior facilidade no transporte e armazenamento, há uma maior facilidade na combustão, tendo-se maior controle de chama / intensidade, e de vazão (CHEREMISINOFF, 2005).

A Índia e a China são os países que mais têm investido no desenvolvimento dos gaseificadores, principalmente, utilizando-se carvão como matéria prima. Desde a década de 80 cerca de 4.000 sistemas foram instalados, parte para geração de energia em projetos de eletrificação rural e parte para bombeamento voltado para irrigação, em proporções praticamente iguais (DIAS, 2010).

Lora e Andrade (2004) também verificaram que a biomassa no Brasil possui um potencial térmico de geração de eletricidade de 27 GW/h. Apontam, ainda, que dentre as tecnologias para a conversão

da energia contida na biomassa em eletricidade, a gaseificação é a mais promissora.

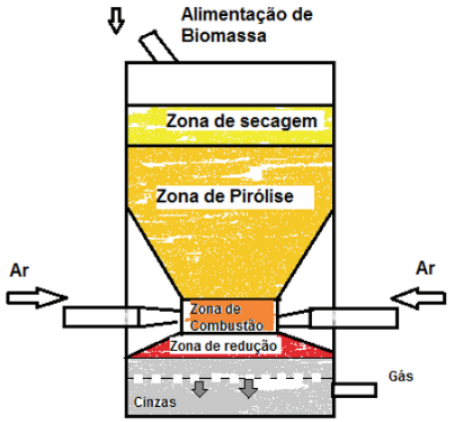
Estudos realizados sobre essa tecnologia (CHEREMISINOFF, 2005; DASAPPA *et al,* 2003) de gaseificação, ao redor do mundo, são numerosos, principalmente pela preocupação ambiental crescente e com a preocupação do futuro dos combustíveis fósseis, uma vez que eles não são renováveis. Neste contexto o Brasil se encontra em níveis tecnológicos compatíveis aos países desenvolvidos.

Dentre os aspectos ambientais positivos, destaca-se a absorção do carbono da atmosferapelo novo plantio, isso porque toda a proposta deste trabalho se orienta ao uso da biomassa residual do produto agrícola. Tal absorção de carbonoestaria ajudando a regular a quantidade de CO_2 existente (pois tecnicamente haveria menos uso de combustível fóssil) e, consequentemente, contribuindo para reduzir o efeito estufa.

5.1 Princípios dos processos de gaseificação

A gaseificação envolve, basicamente, quatro processos, que podem ocorrer na mesma região ou em regiões diferentes do reator denominadas zonas (Figura 3), e isso vai depender da tecnologia empregada (RUMÃO,2013; SIVAKUMAR, 2010). Os processos são descritos a seguir:

Figura 3 – Gaseificador concorrente



Fonte: Própria dos autores (2020)

- Secagem da biomassa: é a ocorrência inicial e se dá na parte superior do reator, durante o aquecimento do combustível. Essa etapa é mais significativa e lenta para materiais mais úmidos. No caso do bagaço, a quantidade máxima de água permitida é de no máximo 20%(RUMÃO,2013). É necessário ressaltar que, no caso da biomassa ser o bagaço, não se faz necessário a sua separação das pontas e palhas.

- Pirólise (desvolatilização ou decomposição térmica): se inicia a pelo menos 280 °C, quando ocorre vaporização das partes voláteis e se dá, na continuação, a fragmentação das partículas sólidas. Esse último fenômeno se dá pela quebra molecular do material pelo calor, quando

a biomassa é aquecida na ausência de ar, ocorrendo a formação de carvão, gases (CO, CO_2, H_2, H_2O, CH_4) e vapores de alcatrão(RUMÃO,2013). Esses vapores ao tocarem superfícies a temperaturas mais baixas se condensam formando o ácido, ou o extrato pirolenhoso.

- Combustão ou reação do material com oxigênio: é o processo responsável pelo fornecimento de calor para as demais etapas. Essa fase pode ocorrer no próprio reator principal, em um gerador de vapor ou em câmara de combustão(RUMÃO,2013). O que se queima podendo ser: parte do próprio gás de síntese, outros produtos da gaseificação (líquidos e sólidos) e até o combustível primário.

- A gaseificação em si, que ocorre na zona de redução quando o carbono e os hidrocarbonetos do combustível reagem parcialmente com o oxigênio, gerando como combustíveis principalmente o monóxido de carbono (CO) e o gás hidrogênio (H_2). Esse processo se dá em temperatura de 400 °C a 900 °C(RUMÃO,2013).

É a partir da formação de H_2 + CO, que, sob condições adequadas, de temperatura e pressão, além de um catalisador ideal, que o sistema de gaseificação poderá ser utilizado para a produção de etanol de segunda geração e álcoois superiores, pelo processo de Fischer-Tropsch.

5.2 Razões para a escolha da gaseificação na indústria sucroalcooleira (CARVALHO, 2017).

- Maior gama de produtos, além da alta eficiência energética;
- Aproveitamento de 100% do bagaço e da palha de cana-de-açúcar;
- Tem potencial para larga escala industrial;
- Combinação de alta eficiência energética com emissão de poluentes próximos a zero e redução no consumo de água ao longo do processo;
- Custos competitivos e prazos bastante reduzidos;
- Plantas de grande escala, em termos de gigawatt, produzem os menores custos de produção de combustível.
- A diminuição nos custos de investimento, é muito mais significativa do que o aumento com os custos de transporte.

5.3 Desafios para a implementação da gaseificação do bagaço de cana-de-açúcar

A gaseificação é uma tecnologia complexa, que exige altos investimentos e, portanto, ainda não conseguiu atingir a sua maturidade. Os projetos de gaseificação continuam a ser testados, em escala piloto, ou em escala de demonstração, mas inexiste uma

planta em escala industrial de gaseificação de biomassa no mundo (YASHIKAWA, 2006).

Os desafios ainda são inúmeros, tais como os elencados a seguir (CARVALHO, 2017; CHEREMISINOFF, 2005):

- As plantas de gaseificação exigem um alto investimento;
- A operação de um gaseificador é complexa, pois depende de diversas variáveis de difícil controle, tais como a uniformidade da biomassa e a presença de alcatrão e material particulado no produto;
- Há que se desenvolver novas tecnologias para processos de pré-tratamento do bagaço, com reduzido consumo de energia (secagem, torrefação e pirólise rápida);
- É preciso remover as cinzas em uma etapa de prégaseificação;
- Materiais devem ser resistentes ao desgaste abrasivo;
- Desenvolvimento de catalisadores mais baratos para otimizar a produção de etanol de segunda geração e de álcoois superiores, a partir do gás de síntese.

Além disto, os catalisadores utilizados para conversão direta de gás de síntese em etanol e álcoois superiores precisam atingir maiores rendimentos de álcoois e maior seletividade a etanol. Isto permitiria a redução do reciclo de gás de síntese e de metanol,

o que contribuiria para a diminuição do custo do etanol obtido (FOUST *et al.,* 2009).

5.4 Síntese de Fischer-Tropsch para a Produção de Combustíveis

A síntese FT tem sido objeto de inúmeros estudos, pois se apresenta, em primeiro lugar, como uma alternativa para a produção de hidrocarbonetos pesados, além de combustíveis líquidos, tais como gasolina e diesel, com comprovado sucesso industrial. Esse feito foi demonstrado em países como África do Sul, Nova Zelândia e Malásia (AZOCLEANTECH, 2013). A síntese de Fischer-Tropsch, desenvolvida no início do século passado, é utilizada para a produção de hidrocarbonetos parafínicos a partir de gás de síntese, de acordo com a Equação 1

- $CO + 2H_2 \rightarrow$ "-CH_2-" + H_2O (1)

Onde "-CH_2-" representa um produto formado, principalmente, por hidrocarbonetos parafínicos com diferentes comprimentos de cadeia, que podem chegar a mais de 100 átomos de carbono. Esta reação é altamente exotérmica, o que torna o projeto dos reatores complexo,para que o calor possa ser removido e a reação permaneça sob controle (VAN DE LOOSDRECHT *et al*., 2013).

Portanto, a síntese de F-T é a criação de uma cadeia química a partir de matériasprimas renováveis, residuais e não alimentares. Consiste basicamente em uma reação de polimerização, a partir

da hidrogenação termoquímica do monóxido de carbono e, dessa forma, qualquer reação que utilize a hidrogenação catalítica do CO, ficou conhecida como síntese de F-T.

As grandes trocas térmicas envolvidas na síntese de F-T, reação altamente exotérmica, podem ser usadas para a geração de energia elétrica, em combinação com o gás oriundo da própria síntese.

O processo de Ficsher-Tropsch basicamente é feito em três etapas: (1) limpeza do gás de síntese após a etapa de gaseificação, (2) utilização de catalisadores para separar diferentes líquidos, com diferentes pesos moleculares e (3) processamento desses líquidos (BOERRIGTER *et al*,2005).

O produto da reação será uma mistura de hidrocarbonetos, ou outros combustíveis líquidos, com uma distribuição de pesos moleculares. Isto torna o controle do peso molecular dos produtos um fator importante nesta tecnologia (SMITH, 2012; VAN DE LOOSDRECHT *et al*., 2013). Por produzir, principalmente, cadeias lineares, este processo é mais apropriado para a produção de óleo diesel (com cadeias entre 9 e 22 átomos de carbono) e querosene (com cadeias entre 9 e 15 átomos de carbono).

Os principais tipos de catalisadores utilizados comercialmente no processo Fischer-Tropsch são os catalisadores à base de ferro, níquel e cobalto (SMITH, 2012; VAN DE LOOSDRECHT *et al*., 2013). As condições de operação do processo Fischer-Tropsch, em geral são severas: pressão variando entre 1 e 4 Mpa, e temperatura acima dos 300°C.

5.5 Síntese de Fischer-Tropsch para a Produção de Etanol e Álcoois Superiores

A síntese de etanol e álcoois superiores a partir de gás de síntese é um caso particular das reações de Fischer-Tropsch. Trata-se de converter metanol, de baixo valor, a valorosos combustíveis, ou seja, álcoois superiores. Muito embora, no início do século passado, os álcoois eram o produto desejado do processo Fischer-Tropsch, com a descoberta dos catalisadores à base de cobalto, níquel, que produzem principalmente hidrocarbonetos não oxigenados, o interesse pela produção de álcoois, via FT, diminuiu (LOU, 2003; TAVASOLI, 2007).

Faz-se necessário compreender que o campo da catálise, sobretudo da heterogênea, é uma parte fundamental da síntese F-T. É o catalisador que vai determinar a gama de produtos que será obtido a partir do gás de síntese. Alguns sistemas catalíticos foram reportados na literatura para o fim de obtenção da síntese de álcoois superiores, sob condições de reação do tipo F-T.

Para se obter um melhor desempenho dos catalisadores na síntese F-T, faz-se o uso de promotores, ou seja, elementos que influenciam na seletividade e atividade dos catalisadores. Estudos demonstraram que o uso de promotores alcalinos (K, Li, Na, Cs), aumentam a basicidade do catalisador, aumentando, consequentemente, a conversão total dos produtos para etanol e álcoois superiores (SUN *et al.,* 2016).

5.6 Catalisadores tipo Fischer-Tropsch para a síntese de etanol de segunda geração

Estudos anteriores sugerem que uma etapa muito importante desta reação é o controle cinético da reação, conduzindo ao crescimento da cadeia a etanol, e posteriormente aos álcoois superiores(YANG, 2014).

A produção do etanol a partir do gás de síntese decresce com o aumento da temperatura, e estudos termodinâmicos sugeriram que esta reação deve ser feita abaixo dos 300°C (YANG, 2014).

O etanol também poderia ser produzido via homologação do metanol. A reação envolve a carbonilação redutora do metanol, sobre um catalisador, para favorecer o crescimento da cadeia e, assim, conduzindo à formação do etanol (YANG, 2014).

Um dos maiores desafios para a viabilização da rota termoquímica de conversão direta de gás de síntese em etanol e álcoois superiores é a obtenção de um catalisador capaz de converter gás de síntese em etanol e álcoois superiores de maneira economicamente atrativa. Vários tipos de catalisadores podem ser utilizados neste processo.

Os catalisadores a base de ródio e molibidênio são os mais promissores para a formação dos álcoois superiores, no entanto, o seu custo muito elevado torna inviável a sua utilização em escala industrial (SUN et al, 2016). Menos caros são os catalisadores à base de cobre e cobalto, dopados com metais alcalinos e derivados daqueles utilizados na síntese do metanol, os chamados catalisadores de Fischer-Tropsch modificados.

Estudos mais recentes têm se voltado para a produção de catalisadores capazes de produzir, de forma seletiva, uma mistura linear de álcoois de C_1 a C_8, em condições reacionais de temperaturas e pressões moderadas. Os catalisadores empregados seriam então de custo acessível (JAGUARIBE, 2017).

Enquanto os catalisadores baseados em metais nobres produzem principalmente etanol e outros compostos oxigenados com 2 átomos de carbono, os catalisadores baseados em metais não nobres favorecem a formação de uma mistura de álcoois com 1 a 8 átomos de carbono (JAGUARIBE, 2017). Ou seja, trata-se da conversão direta do gás de síntese a etanol e álcoois superiores com a utilização de catalisadores bimetálicos, nomeadamente uma liga mássica feita a partir de metais não nobres, cobre e cobalto.

As principais vantagens da utilização da liga bimetálica cobre/cobalto é conversão direta do gás de síntese a etanol e álcoois superiores, além do seu baixo custo, e também é resistente à presença de enxofre na carga. Isto favorece o processamento de matérias-primas que possuem enxofre na sua composição, como diversas biomassas, a exemplo do bagaço de cana-de-açúcar, uma vez que o custo da limpeza do gás de síntese pode ser reduzido (GUPTA *et al.*, 2011). Os dois metais combinados, apresentam uma grande sinergia, aumentando a atividade desta reação e gerando uma alta estabilidade termoquímica. Estes catalisadores também favorecem a formação de álcoois lineares, com uma alta seletividade relativamente a etanol.

5.7 Catalisador bimetálico à base de cobre e cobalto

Os catalisadores objeto desse capítulo são fundamentalmente à base de uma liga mássica de Co e Cu, suportados em Al_2O_3 promovido com alcalinos. Em relação aos suportes, os mais comumente utilizados na literatura são alumina, silíca e as zeólitas. Faz-se mister ressaltar que o diâmetro do poro está diretamente ligado ao comprimento da cadeia dos álcoois. Foi observado, também, em estudos anteriores, que quanto mais reduzido o Co, maior será a seletividade para cadeias maiores (GUPTA *et al.*, 2011; JAGUARIBE, 2017; SUN *et al.*, 2016).

A obtenção desses catalisadores se deu, inicialmente, com a modificação dos catalisadores para a produção de metanol e pela adição de pelo menos um alcalino. No entanto, esse sistema se mostrou ineficiente para a síntese de álcoois superiores. Logo, deu-se início à pesquisa de catalisadores bimetálicos, principalmente à base de cobalto e cobre, contendo alcalinos, preferencialmente Li, Na, e K. Esses catalisadores, por sua vez, se mostraram satisfatórios, pois, foi observado um aumento considerável na produção de álcoois C_1 a C_8 (JAGUARIBE, 2017)

Foi observado, também, em estudos anteriores, que quanto mais reduzido o Co, maior será a seletividade para cadeias mais longas (JAGUARIBE, 2017; SUN *et al.,* 2016)

Dentre as vantagens da utilização de catalisadores bimetálicos estão:

- Melhora na estabilidade térmica
- Aumento na atividade

- Melhora na resistência à formação de enxofre.

Na síntese de Fischer-Tropsch, a adição de um alcalino aumentaria a força da ligação metal-moléculas receptoras. Ou seja, quando o metal é enriquecido com elétrons pelos alcalinos, ocorre o favorecimento da formação dos produtos oxigenados a partir do gás de síntese. Há, portanto, o entendimento que a inserção do CO na ligação metal-alquila venha a se constituir uma etapa fundamental na formação de álcoois superiores, a partir do gás de síntese (ZHOU, 2015).

6. ANÁLISE DE ALGUNS PARÂMETROS OPERACIONAIS PARA A OBTENÇÃO DE ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO E ÁLCOOIS SUPERIORES ATRAVÉS DA ROTA TERMOQUÍMICA

A análise a seguir é uma compilação de estudos realizados anteriormente, e engloba alguns parâmetros operacionais, tais como biomassa, etapas de gaseificação, catalisador e separação dos produtos.

6.1 Carga (bagaço de cana)

No Brasil, a biomassa mais promissora é o bagaço de cana-de-açúcar, quer seja para a produção de energia elétrica, quanto para produção de biocombustíveis (DE MELO, 2018). As razões estão elencadas a seguir:

- O bagaço que excede a quantidade necessária para geração de energia e vapor para a usina é um resíduo da produção de cana. Portanto, seu custo de produção já está embutido no custo da produção de açúcar e etanol da usina e, por estar disponível em grande quantidade, a utilização de bagaço em plantas anexas a estas usinas praticamente elimina os custos de transporte.

- Estudos anteriores demonstraram que, em uma usina brasileira típica, com a integração do sistema de vapor, há uma redução no consumo de bagaço. Com esta redução, a geração de calor e energia elétrica consumiria menos de 50% do bagaço, logo o bagaço excedente poderia ser destinado à produção de etanol de segunda geração.

- A integração de um sistema de gaseificação e de ciclo combinado para a geração de vapor, aumentaria ainda mais a eficiência na geração de energia térmica, e consequentemente de energia elétrica.

- Palha e pontas podem ser utilizadas como combustível complementar da caldeira, dessa maneira, aumentando a disponibilidade de biomassa e implicando em uma oportunidade de aumento na eficiência do processo.

Diante de tudo o que foi exposto, verifica-se que a utilização do bagaço de cana como carga em um processo de gaseificaçãoé uma alternativa promissora para a produção de etanol de segunda geração e de álcoois superiores.

6.2 Energia obtida a partir da gaseificação do bagaço

O bagaço de cana, in natura, resultante do processo de moagem, apresenta aproximadamente 50% de umidade e massa especifica de 120 Kg/m^3. O PCI bagaço nessas condições é da ordem de 3.100 a 4.400 Kcal/Kg (PETROBRÁS,1982).

A massa específica do bagaço, bem como a sua umidade, deve ser levada em consideração quando o objetivo é aumentar os resultados de um processo de gaseificação. Na verdade, é notório que o aumento da massa específica de um material influencia na sua cinética química, e também nas correlações de transporte de calor e massa (RAMALHO, 2019). Em um processo de peletização de biomassa, a compactação da matéria prima é uma ferramenta necessária para auxiliar na etapa da pirólise (JAMES *et al*., 2016; HUFF, 2012)

Com a compressão e adensação do bagaço de cana-de-açúcar in natura, e diminuição de 30% da umidade, observa-se um PCI no valor de 15.767 Kcal/Kg , ou seja, equivalente a cerca de 5,09, 6 vezes o PCI do bagaço in natura (RAMALHO, 2019).

7. ETAPAS DO PROCESSO

A seguir serão apresentadas resumidamente as etapas do processo (DAZA, 2009; CARDONA, 2019):

- Preparação da carga: o bagaço deve ser seco até um teor de umidade de 10 a 20%;

- Gaseificação: a biomassa passa por um processo de gaseificação. O gaseificador ideal a ser utilizado é do tipo leito fluidizado circulante duplo. Os produtos obtidos são gás de síntese, alcatrão e coque.

- Recuperação de calor dos gases da combustão: os gases de combustão passam por um processo de recuperação de calor, que será posteriormente utilizado para a desumidificação do bagaço;

- Limpeza dos gases: o processo de limpeza do gás de síntese compreende a reforma dos hidrocarbonetos presentes no gás de síntese (alcatrão, metano e outros), e o seu resfriamento e lavagem. No reformador, os hidrocarbonetos presentes no gás de síntese reagem num leito de arraste, com o auxílio do catalisador de reforma de alcatrão. Os gases são separados do catalisador num ciclone e o catalisador segue para um vaso onde é regenerado através da queima do coque formado na reação de reforma. O catalisador quente é, então, separado dos gases de combustão e retorna para o reformador fornecendo a energia necessária para a reação de reforma, que é endotérmica.

- Produção de etanol de segunda geração e álcoois superiores: o gás de síntese é comprimido até 0,5Mpa e enviado para um reator de leito fixo que contém um catalisador de síntese de álcoois, à base de uma liga

mássica de cobre e cobalto, a uma temperatura entre 200 e 250°C. Durante a reação uma parte do gás é convertida a oxigenados, CO_2 água e hidrocarbonetos. O calor gerado é retirado através da geração de vapor do lado externo do reator.

- Separação de álcoois: os álcoois gerados são despressurizados em um tambor de "flash" e devem ser reciclados para o reator de reforma. A corrente líquida é desidratada com peneiras moleculares e enviada para uma coluna de destilação que separa o metanol e o etanol dos álcoois superiores. A corrente de topo da coluna de destilação é enviada para uma segunda coluna onde o metanol é separado do etanol, que é obtido dentro das especificações de etanol combustível (ASTM, 2011).
- Reciclagem de metanol: O metanol restante (69%) é reciclado para o reator de síntese de álcoois para aumentar o rendimento de etanol.

7.1 Catalisadores propostos

Os catalisadores propostos nesse capítulo estão baseados em estudos mais recentes, que têm se voltado para a produção de catalisadores à base de uma liga mássica de cobre e cobalto, uma vez que se apresentou seletiva para o etanol, e porque o produto é uma mistura de álcoois primários, de C_1 a C_8, e não de álcoois secundários

como na síntese do metano (JAGUARIBE, 2017). Os catalisadores propostos apresentaram uma ótima performance em temperaturas e pressões abaixo do que é exigido na síntese de Fischer-Tropsch, ou seja, temperatura entre 200 e 250 °C e Pressão abaixo de 0,5 Mpa. a baixas pressões e temperaturas, o que significa menores custos para o processo.

Efeitos específicos de aditivos alcalinos (Li, Na, K) sobre as propriedades físico-químicas de sistemas catalíticos Co-Cu, foram estudados. Os catalisadores utilizados apresentaram teores em alcalino estabelecidos em várias proporções, de 0.5 a 7% em peso do catalisador. Observou-se que a adição dos alcalinos conduziu a uma redução das áreas superficiais dos catalisadores. Os testes catalíticos de hidrogenação do CO, efetuados até agora, confirmam à formação de álcoois C_1 a C_8em detrimento à formação de hidrocarbonetos. (JAGUARIBE, 2017).

8. CONVERSÃO BIOQUÍMICA VERSUS CONVERSÃO TERMOQUÍMICA

A conversão bioquímica do bagaço de cana em etanol envolve hidrólise e fermentação, enquanto a rota termoquímica, envolve gaseificação e síntese catalítica. As duas rotas, entretanto, são capazes de produzir quantidades similares de etanol, a partir de uma mesma quantidade de biomassa.

Um estudo conduzido de 2012 a 2019 (GARCIA-VELASQUEZ; CARDONA, 2019), a respeito da performance das duas rotas para a obtenção do etanol, sugere que a rota bioquímica traz menos

impacto ambiental, relacionado a emissão de gases, enquanto que a rota termoquímica oferece um menor consumo de água, além de redução na utilização de produtos químicos. Em relação a produção de uma maior gama de produtos, a rota termoquímica oferece uma maior performance.

9. PLANTAS EM OPERAÇÃO

É necessário conduzir uma validação adequada da tecnologia em plantas piloto, totalmente integradas, antes da sua expansão para a escala industrial.

Em 2002, a Shell deu início a testes de gaseificação, produzindo 500 kg/h de biocombustíveis através da gaseificação (BACOVSKY *et al*., 2013).

A tecnologia de conversão direta de gás de síntese em etanol e álcoois superiores foi, primeiramente desenvolvida, em escala piloto pela, Iowa StateUniversity, em Boone, EUA (200 t/ano de etanol), pelo NREL, em Golden, Coorado, EUA (50 t/ano de etanol) e pelo Southern ResearchInstitute, em Durham, Carolina do Norte, EUA (capacidade não divulgada). Já a tecnologia de produção do etanol a partir de metanol começou a ser desenvolvida em escala de demonstração pela Tembec, em Temiscaming, Canadá (13.000 t/ano de etanol) e pela Enerkem, em Westbury, Canadá (4.000 t/ano de etanol)(BACOVSKY *et al*., 2013).

Em Edmonton,Canadá, uma planta piloto de gaseificação de resíduos e subsequente síntese catalítica para a produção de 30.000 t/ano de etanol, é operada desde 2014. Outro projeto de gaseificação

de resíduos, para a produção de 11.200 t/ano de etanol, foi iniciado na Áustria. A Bio 2G (Suécia), tem uma planta em andamento, com a perspectiva de produção de 111.000 t/ano de etanol, a partir de biomassa residual, que estará em pleno funcionamento neste ano de 2020 (BACOVSKY, 2017).

As razões econômicas ainda são um grande obstáculo para o avanço desta tecnologia, induzindo ao fechamento de grandes projetos de rota termoquímica para a produção de etanol e de álcoois superiores, a exemplo da companhia Chorens, na Alemanha, com capacidade de 15.000 t/ano e a companhia Range Fuels, nos Estados Unidos, com capacidade de 300.000 t/ano (BACOVSKY, 2017). Até 2021, a União Europeia tem 23 projetos em andamento, envolvendo 224 biorrefinarias, das quais 181 envolvem rota alternativa para a fabricação de etanol a partir da cana de açúcar. O objetivo é que até 2030, 25% dos combustíveis fósseis sejam substituídos por etanol de segunda geração. A expectativa é que até 2030, 26 bilhões de galões de etanol de segunda geração sejam produzidos. Já para os Estados Unidos, a estimativa é de 23 milhões de toneladas de etanol ao ano (PALAGE *et al.)*. No Brasil essa rota termoquímica para a obtenção de etanol de segunda geração e de álcoois com alto peso molecular, ainda encontra-se em estágio pouco avançado e com muita limitação, sendo apenas tema de produção científica. Considera-se, no entanto, ser uma rota bastante promissora para um futuro próximo, principalmente considerando que a política da não utilização das queimadas está acelerando o desenvolvimento de novas tecnologias que aproveitem os resíduos da cana de açúcar, em sua totalidade.

A UFPB possui dois, dos poucos gaseificadores para a produção de energia, existentes no Brasil. Os gaseificadores em questão, um em escala piloto, e outro de bancada), foram importados da India, do Indian of Science/Combustion Gas Propulsian Laboratory, através do Ministério de Minas e Energia e se encontram no Laboratório de Inovação em Conversão Térmica, Centro de Tecnologia. Diversos tipos de biomassa já foram testados, a exemplo de pellets de bagaço de cana de açúcar, sabugo de milho, madeira e resíduos urbanos, consolidando o objetivo proposto, que é a obtenção de energia elétrica a partir da biomassa.

10 CONCLUSÕES

Existem diversos desafios tecnológicos que precisam ser superados para viabilizar a produção comercial de etanol e álcoois superiores a partir do gás de síntese. Como acontece com todos os processos que utilizam gás de síntese proveniente da gaseificação de biomassa, diversos desafios relativos à gaseificação da biomassa, em si, e à limpeza do gás de síntese resultante precisam ser superados. Além disto, os catalisadores utilizados para conversão direta de gás de síntese em etanol e álcoois superiores precisam atingir maiores rendimentos de álcoois e maior seletividade a etanol. Isto permitiria a redução do reciclo de gás de síntese e de metanol, o que contribuiria para a diminuição do custo do etanol obtido.

Diante do exposto, um dos principais desafios para a utilização comercial desta rota é o desenvolvimento do catalisador para síntese de álcoois a partir de gás de síntese. Existem diversos

tipos de catalisadores que podem ser utilizados neste processo, porém estudos mais recentes mostraram que os catalisadores à base de uma liga mássica de cobre e cobalto, dopados com metais alcalinos, se destacam entre os mais promissores, além de serem de baixo valor comercial.

Dentre os aspectos ambientais positivos, destaca-se a absorção do carbono da atmosfera, pelo novo plantio, isso porque toda a proposta deste capítulo se orienta ao uso da biomassa residual do produto final agrícola. Tal absorção de carbono estaria ajudando a regular a quantidade de CO_2 existente (pois tecnicamente haveria menos uso de combustível fóssil) e, consequentemente, contribuindo para reduzir o efeito estufa.

Embora as plantas comerciais em operação sejam poucas, devido a dificuldades técnicas, a produção de energia a partir da gaseificação pode ser vista como uma forma promissora num país abundante em biomassa como o Brasil.

11. REFERÊNCIAS

ARAUJO, G. J. F.; NAVARRO,L F. S.; SANTOS,B. A.S. O Etanol de Segunda Geração e sua importânciaEstratégica ante o CenárioEnergetico Internacional Contemporâneo.**X Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 9, n. 5, p. 01-11, 2013.

AZOCLEANTECH. **Novel Fischer-Tropsch Catalyst for Making Synthetic Fuels from Natural Gas and Biomass**, 2013.

BACOVSKY, D.; LUDWICZEK, N.; OGNISSANTO, M.; MANFRED. Status of Advanced Biofuels Demonstration Facilities in 2012.**Avanced Biofuels Conference**, Austria, 2013.

BACOVSKY, D. **Advanced biofuels are just around the corner. Advanced Biofuels Conference**. Áustria, 2017.

BOERRIGTER, H.; CALIS, H. P.; Slort, D. J.; BODENSTAFF, H.; KAANDORP, A. J.; UIL, H. den; RABOU, L. P. L. M. Gas cleaning for integrated Biomass Gasification (BG) and Fischer-Tropsch (FT) systems. **Energy research Centre of the Netherlands (ECN).** Petten, The Netherlands, report C-04-056, 59 pp, 2005.

CARVALHO, A. S. **Preparação e Caracterização de Catalisadores Bimetálicos, para a Produção de Álcoois Superiores, via Gaseificação do Bagaço de Cana de Açúcar**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnologia em Produção Sucroalcooleira) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017.

CHEREMISINOFF, N.P. Gasification technology: a primer for engineers and scientists. **CRC Press**, 2005.

DASAPPA, S., MUKUNDA, H. S., PAUL, P. J. *et al*. **Biomass to Energy:** The Science and Technology of the IISc Bio-energy systems. 1ed. Índia. ABETS. 2003.

DAVIS, B. H. Fischer-Tropsch synthesis current mechanisms and futuristic needs. **Fuel Process Technology**, v. 71, p. 157 -166, 2010.

DAZA MONTANO, C. Process design and evaluation of butanol production from lignocellulosic biomass. **4th International Bioenergy Conference**, Finland, 2009.

DE MELO, T. S. **Estudo da palletização do bagaço da cana de açúcar para a otimização de custo e transporte**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnologia em Produção Sucroalcooleira) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.

EPE – **Empresa de Pesquisa Energética Plano Nacional de Energia 2030**. 2007. Disponível em:http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes. Acesso em: 7 de junho de 2020.

FOUST, T. D.; ADEN, A; DUTTA, A; PHILLIPS, S. An economic and environmental comparison of a biochemical and thermochemical lignocellulosic ethanol conversion processes. **Cellulose**, v.16, n. 4, p. 547-565, 2009.

GARCIA-VELASQUEZ, C.A.; CARDONA, A.C. Comparison of the biochemical and thermochemical routes for bioenergy production: A techno-economic (TEA), energetic and environmental assessment. **Energy**, v. 172, p. 232-242, 2019.

GUPTA, M., MIRANDA L., SMITH, JAMES J. Spivey Heterogeneous Catalytic Conversion of Dry Syngas to Ethanol and Higher Alcohols on Cu-Based Catalysts. **ACS Catalysis**, v. 1, p. 641 -656, 2011.

HUFF, E. R. Effect of Size, Shape, Density, Moisture and Furnace Wall Temperature on Burning Times of Wood Pieces. In:**Fundamentals of thermochemical biomass conversion**. Springer Science & Business Media, p. 761-775,2012.

JAMES R.; WENQIAO Y.; BOYETTE, M. The effect of biomass physical properties on top-lit updraft gasification of woodchips. **Energies**, v. 9, n.4, p. 283, 2016.

JAGUARIBE, D.C.A **Síntese e caracterização de catalisadores bimetálicos para a produção de Etanol de segunda geração**. Pós Doutorado no Programa Ciências sem Fronteiras, universidade de Aberdeen, Escócia, 2017.

LIBERATO, J.O. **Aspectos da Produção e Importância do Etanol de Segunda Geração**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso. UNICESUMAR, Maringá, 2019.

LOOSDRECHT, Van de, J.; BOTES, F.G.; CIOBICA, I.M.; FERREIRA, A.C.; GIBSON, P; MOODLEY, D.J.; SAIB, A.M.; VISAGIE, I.L.; WESTSTRATE, C.J.; NIEMANTSVERDRIET, J.W. Fischer-Tropschsynthesis : catalystsandchemistry**. Catalysis& Energy**, 2013.

LORA, E. E. S., ANDRADE. Geração de Energia e a Gaseificação de Biomassa. Núcleo de Excelência em Geração Termelétrica e Distribuída (NEST).**Biomassa Energia**, p. 311-320,2004.

PALAGE, K; LUNDMARK, R.; SODERHOLM, P. The Impact of Pilot and Demonstration Plants on Innovation: The Case of Advanced Biofuel Patenting in the European Union.**International Journal of Production Economics**, v. 210, p.42-55, 2019.

PITARELO, A. P. Efeito do teor de umidade sobre o pré-tratamento a vapor e a hidrólise enzimática do bagaço de cana-de-açúcar.**Química Nova**, p.1-8, 2012.

RAMALHO, A. A. **Gaseificação de Pellets do Bagaço da Cana de Açúcar para Obtenção de Energia Limpa e de Alto Poder Calorífico**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnologia em Produção Sucroalcooleira) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.

RAMESH C. R., RAMACHANDRAN, S. BioethanolProductionfrom Food Crops. In: **Sustainable Sources, Interventions, and Challenges**.1 Edição. Elsevier, 2019.

RUMÃO, A. S. **Geração de potência e energia elétrica a partir da gaseificação de rejeitos de biomassa**. 2013. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2013.

SÁNCHES, C. G. **Tecnologia da Gaseificação de Biomassa**. São Paulo: Átomo, 2010.

SIVAKUMAR, S., N. RANJITHKUMAR, AND S. RAGUNATHAN. Design and development of down draft wood gasifier. **International Journal of Mechanical Engineering**, v. 2, n.2, p. 1-10, 2010.

SMITH, M. **Copper-cobalt catalysts for conversion of syngas to ethanol and higher alcohols**. Tese de Doutorado apresentada na Faculdade do Estado da Luisiana and Agricultural and Mechanical College, 2012.

STAHL, M.; BERGHEL, J. Energy efficient pilot-scale production of wood fuel pellets made from a raw material mix including sawdust and rapeseed cake. **Biomass and bioenergy**, v. 35, p. 4849-4854, 2011.

SUN, J., CAI. Q., WAN, Y., WAN, S., WANG, L., JINDONG, L., DONGHAI, M., WANG, Y. Promotional effects of cesium promoter on higher alcohol synthesis from syngas over cesium-promoted Cu/ZnO/Al2O3 catalysts.**ACS Catalysis**, v. 6, p. 5771−5785, 2016.

YANG, J.; DUAN, X.; ZHU, Y.-A.; CHEN, D.; HOLMEN, A. Discrimination of the mechanism of CH 4 formation in Fischer–Tropsch synthesis on Co catalysts: a combined approach of DFT, kinetic isotope effects and kinetic analysis. **Catalysis Science & Technology**, v.4, p.3534−3543, 2014.

YOSHIKAWA, K. **R&D (Research and Development) on distributed power generation from solid fuels**. Elsevier/Energy, ScienceDirect, 2006.

ZHOU, M.; LIU, B. DFT Investigation on the Competition of the Water–Gas Shift Reaction Versus Methanation on Clean and Potassium-Modified Nickel(111) Surfaces.**ChemCatChem**, v. 7, p. 3928–3935, 2015.

VIEIRA. G, NUNES, A., TEIXEIRA, L., COLEN. A. Biomassa: uma visão dos processos de pirólise. **Liberato**, v.15, n. 24, 2014.

WILLIAM, B., KAFFKA. S, **Biomass Gaseification – Draft**.
Public Interest Energy Research (PIER) Program DRAFT INTERIM PROJECT REPORT, 2015.

CAPÍTULO VI

Produção de etanol de segunda geração: rota enzimática

»*Laís Campos Teixeira de Carvalho-Gonçalves*
»*Solange Maria de Vasconcelos*

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, questões relacionadas à segurança energética e ambiental têm sido discutidas em todo o mundo, levando ao desenvolvimento e utilização de fontes alternativas de energia. Dentre estas, observa-se um crescente interesse pelo uso de biocombustíveis visto que podem, teoricamente,constituir uma das alternativas ao petróleo, cuja oferta mundial deverá sofrer consideráveis restrições no futuro previsível. Dados do ano de 2015 indicam que, até 2050, a demanda global de energia será 2 a 3 vezes maior do que aquela demandada naquele momento, o que sugere que as reservas existentes de combustíveis fósseis sejam incapazes de atender as necessidades do mercado (ROSA; GARCIA, 2009; ZABED *et al*., 2017; BITTENCOURT*et al*., 2019).

A biomassa refere-se a qualquer matéria orgânica rica em energia química, como carboidratos, que pode ser transformada em energia mecânica, térmica ou elétrica, e tem recebido grande atenção como alternativa para a produção de biocombustíveis (sólidos, líquidos ou gasosos). Esta biomassa pode ter origem a partir de diferentes fontes, como agricultura, florestas, rejeitos urbanos, industriais ou animais. Há muito tempo, os biocombustíveis primários, como a lenha, já foram ou, em algumas regiões, ainda são utilizados em sua forma natural para aquecimento ou produção de eletricidade. Por outro lado, biocombustíveis secundários, como o etanol e o biodiesel, podem ser usados como fonte de combustível, os quais podem ser produzidos de diversas maneiras, através do processamento adequado das diferentes biomassas (NALI; RIBEIRO; HORA, 2016; RASTOGI; SHRIVASTAVA, 2017). Tanto o etanol quanto o biodiesel já são usados de forma eficiente em motores de combustão interna que equipam os mais diversos veículos automotores, podendo ser usados puros ou misturados aos combustíveis derivados do petróleo. Dentre eles, o etanol é o biocombustível que conseguiu maior penetração no mercado mundial, com destaque para os EUA, que utiliza o milho como matéria-prima e, para o Brasil, cuja matéria-prima principal é a cana-de-açúcar (MILANEZ *et al.*, 2017).

Nos últimos anos, diversos países, visando ampliar a participação dos biocombustíveis na sua matriz energética, têm investido em pesquisas direcionadas ao desenvolvimento de etanol de segunda geração ou etanol celulósico, produzido a partir de matérias-primas lignocelulósicas, incluindo palha e casca de cereais, bagaço e palha de cana-de-açúcar, resíduos florestais etc. O uso dessas matérias-

primas pode aumentar a produção dos biocombustíveis, sem que ocorra a competição com a produção de alimentos ou com o cultivo de terras agrícolas, ou seja, não compromete a segurança alimentar e evita o desmatamento florestal (SIMS *et al.,* 2010; RABELO *et al.*, 2011).

A produção de etanol de segunda geração pode ocorrer através de duas rotas de processamento diferentes: i) rota bioquímica ou enzimática, na qual enzimas são utilizadas para converter os componentes celulose e hemicelulose, presentes nas biomassas lignocelulósicas, em açúcares fermentescíveis; ii) rota termoquímica, na qual as tecnologias de pirólise/gaseificação produzem o gás de síntese ($CO + H_2$) a partir do qual, o etanol pode ser reformado, com base na conversão de Fischer-Tropsch (SIMS *et al.*, 2010). No Brasil, tem-se observado nos últimos anos, diversas pesquisas voltadas à produção de etanol de segunda geração através da rota enzimática.

Em geral, a conversão de biomassa lignocelulósica em etanol de segunda geração, através da rota enzimática, envolve quatro etapas principais: i) pré-tratamento; ii) despolimerização de polímeros de carboidratos para produção de açúcares fermentescíveis, por ação de enzimas; iii) fermentação de hexoses e/ou pentoses para produzir etanol; iv) destilação de etanol (CANILHA *et al;* 2012. SANTOS *et al.*, 2014).

2. CONTEXTO HISTÓRICO DO ETANOL NO BRASIL

Historicamente, a produção de etanol para uso automotivo no Brasil começou em 1927 e, embora no ano de 1930 a quantidade de etanol produzido e a frota automotiva em circulação no país ainda

fossem pequenas, o governo brasileiro introduziu uma mistura de 5% de etanol na gasolina (RAELE *et al.,* 2014).

Após a primeira crise do petróleo, em 1973, o governo brasileiro decidiu criar o Proálcool (Programa Nacional do Álcool) com o objetivo de produzir o etanol para substituir o uso da gasolina para uso carburante. A matéria-prima escolhida para a produção desse biocombustível foi a cana-de-açúcar, que já era bem adaptada às condições geográficas e climáticas do país. Com o programa, criado oficialmente em 1975 por meio do Decreto nº 76.593, houve um aumento na área de plantio e incentivos, na forma de financiamentos pelo Governo, para instalações de destilarias autônomas. Assim, o Brasil passou a contar com inúmeras novas destilarias produtoras de etanol. Centros de pesquisa, universidades, empresas públicas e privadas e, uma infinidade de organizações foram mobilizadas a partir do programa, o qual durou três décadas e conseguiu criar uma infraestrutura produtiva de grande magnitude e escala comercial para o etanol (ANDRIETTA; STECKELBERG; ANDRIETTA, 2006; RAELE *et al.,* 2014).

Desde a criação do Proálcool até os dias atuais, tem-se observado um grande aumento na produção de etanol total (anidro e hidratado), passando de 556 mil m^3 naquela época a 33 milhões de m^3 na safra 2018/2019 (MAPA, 2009; MAPA, 2020a).

Na última década tem-se se observado intensos esforços no sentido de aumentar a produção etanol no Brasil, a partir da utilização de resíduos lignocelulósicos (etanol de segunda geração), provenientes da agroindústria brasileira. Neste sentido, no ano de 2011, o BNDES e a Finep, em parceria, lançaram o plano BNDES-Finep

de apoio à Inovação dos Setores Sucroenergético e Sucroquímica (Paiss), a partir do qual Centros de Pesquisa, a exemplo do CTC – Centro de Tecnologia Canavieira e algumas usinas, como a GranBio e a Raízen, anunciaram seus programas de pesquisa, desenvolvimento e produção em escala industrial (LORENZI; ANDRADE, 2019). No caso do CTC, as pesquisas para a produção de etanol de segunda geração contam com laboratórios de biotecnologia industrial e planta piloto e de demonstração, esta anexa à uma Usina (CTC, 2020).

Laboratórios, institutos de pesquisas e universidades públicas, empresas públicas e privadas de desenvolvimento de tecnologias e pesquisas, a partir de então têm demandado grandes esforços no sentido de desenvolver tecnologias viáveis à produção de etanol de segunda geração.

Mais recentemente, em dezembro de 2017, foi instituída a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), através da Lei nº 13.576/2017, que tem entre os seus objetivos, promover a expansão da produção e do uso de biocombustíveis na matriz energética nacional, fundamentada na previsibilidade, sustentabilidade ambiental, econômica e social, e compatível com o crescimento do mercado. A partir desta expansão, almeja-se uma importante contribuição dos biocombustíveis na redução das emissões de gases de efeito estufa no país (BRASIL, 2017). Com a implantação do RenovaBio, a expectativa é que ocorra um salto na produção de etanol dos atuais 33 milhões de m^3, para mais de 50 milhões de m^3, em 2050 (CANALBIOENERGIA, 2020).

3. MATÉRIAS-PRIMAS UTILIZADAS NA PRODUÇÃO DE ETANOL

A produção de etanol por via fermentativa pode se dar a partir de qualquer biomassa contendo carboidratos e, de acordo com o tipo de carboidrato presente na matéria-prima, esta pode ser classificada em: i) sacarina – neste grupo estão incluídas a cana-de-açúcar, beterraba açúcareira, melaços, sorgo sacarino; ii) amilácea – grãos amiláceos (milho, trigo, arroz), raízes e tubérculos (batata doce, mandioca); iii) celulósicas ou lignocelulósicas – são constituídas por celulose, hemicelulose e lignina. Estas são representadas por palhas, resíduos agrícolas, da exploração madeireira e de fábricas de papel (PACHECO; MACHADO; GONÇALVES, 2013).

Atualmente, no Brasil, a produção em larga escala de etanol utiliza como matéria-prima principal, a cana-de-açúcar. Mais recentemente, teve início a produção de etanol de milho, na região Centro-Oeste do Brasil, inicialmente adotada em usinas "flex", aproveitando as instalações e energia de usinas de cana-de-açúcar (MOREIRA; ARANTES, 2018).

4. BIOMASSAS LIGNOCELULÓSICAS NO BRASIL

O Brasil é um grande produtor agrícola, com destaque para a cana-de-açúcar e para os grãos, como a soja, o milho, o arroz e o trigo, cujas produções (safra 2018/19) estão apresentadas, na Tabela 1. Com isso, durante o processamento desses produtos, são gerados diversos resíduos lignocelulósicos como, bagaço e palha de cana-de-

açúcar, palha e casca de soja, palha e sabugo de milho, casca de arroz e palha de trigo. Esses resíduos podem ser utilizados para a produção de produtos de valor agregado, como o etanol de segunda geração.

Tabela 1 – Produção brasileira de cana-de-açúcar e de grãos (safra 2018/19)

Produto Agrícola	Produção (milhões de t)
Cana-de-açúcar	620,49
Soja	115,03
Milho	99,98
Arroz	10,46
Trigo	5,40

Fonte: CONAB, 2020

Observa-se que a cana-de-açúcar se destaca entre os produtos agrícolas do Brasil, com uma produção de 620,49 milhões de toneladas na safra 2018/19. A maior parte desta matéria-prima é processada nas diversas unidades industriais produtoras de etanol e açúcar, espalhadas pelo Brasil que, segundo dados coletados pelo Sistema de Acompanhamento da Produção Canavieira, há 352 unidades cadastradas como produtoras de etanol e açúcar. Destas, 211 (59,94%) são unidades mistas, ou seja, produtoras tanto de etanol quanto de açúcar, 123 (34,94%) são destilarias autônomas e, 18 (5,11%), produtoras de açúcar (MAPA, 2020b).

Atrelada à produção de etanol e açúcar, ocorre a geração de uma grande quantidade materiais lignocelulósicos, considerados como subprodutos, visto que apresentam um alto valor agregado,

a exemplo do bagaço de cana-de-açúcar. A cada tonelada de cana moída são gerados, aproximadamente, 280 kg de bagaço (com 50% de umidade) (CGEE, 2009).

A palha de cana-de-açúcar geralmente era queimada no campo para permitir a colheita manual. No entanto, coma colheita mecânica que está sendo empregada com mais frequência, principalmente nas usinas do Centro-Sul,uma vez que a queima da cana-de-açúcar é proibida por razões ambientais, grandes quantidades de palha estarão disponíveis para uso na indústria. Numa estimativa obtida dos estudos realizados sobre a recuperação da palha, verificou-se que são gerados 140 kg de palha (em base seca) por tonelada de cana (CGEE, 2009; DIAS *et al.*, 2013).

4.1 Estrutura e composição das biomassas lignocelulósicas

As biomassas lignocelulósicas apresentam uma estrutura complexa, representada principalmente pela interação físico-química entre celulose, um polímero de glicose, hemicelulose, um heteropolímero de açúcar altamente ramificado, e lignina, uma macromolécula aromática de alto peso molecular e reticulado (FERREIRA-LEITÃO *et al.*, 2010). A lignina é o componente mais recalcitrante, e quanto maior a sua proporção, maior a resistência à degradação enzimática da biomassa (TAHERZADEH; KARIMI, 2008).

A fração mássica, em base seca, de cada um dos componentes que constituem a biomassa lignocelulósica é variável, podendo estar entre, 35 – 50% para celulose; 20 -35% para hemicelulose; e de 10 – 25%

para lignina (OJEDA *et al.*, 2011). Contém ainda, pequenas quantidades de minerais (cinzas) e vários outros compostos, chamados de extrativos.

No caso do Brasil, a maioria das pesquisas sobre a produção de etanol de segunda geração, até o momento, tem sido direcionadas ao bagaço e palha de cana-de-açúcar. Pois, há um indicativo de que a produção desse biocombustível, a partir dessas biomassas, será favorecida porque o processo pode ser anexado às unidades de açúcar e/ou etanol já existentes, exigindo assim investimentos mais baixos em infraestrutura, logística e fornecimento de energia (SOCCOL *et al.*, 2010).

Diversos pesquisadores, nos últimos anos, têm realizado a caracterização para determinação da composição química, tanto do bagaço quanto da palha de cana-de-açúcar. Alguns resultados encontrados estão apresentados nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 – Composição química de bagaço de cana-de-açúcar determinada por diversos autores

Composição (%, base seca)	**Rodrigues *et al.*, 2010**	**Rocha *et al.*,2011**	**Vasconcelos *et al.*, 2013**	**Liu *et al.*, 2017**
Celulose	45,4 ± 0,8	45,5 ± 1,1	40,10 ± 0,93	41,54 ± 0,45
Hemicelulose	24,1 ± 0,6	27,0 ± 0,8	27,49 ± 0,67	24,24 ± 1,92
Lignina	23,4 ± 0,2	21,1 ± 0,9	18,52 ± 0,76	23,06 ± 0,28
Cinzas	2,3 ± 0,1	2,2 ± 0,1	5,75 ± 0,14	9,50 ± 0,50
Extrativos	ND	4,6 ± 0,3	5,44 ± 0,14	1,33 ± 0,27

ND = não determinado

Tabela 3 – Composição química de palha de cana-de-açúcar determinada por diversos pesquisadores

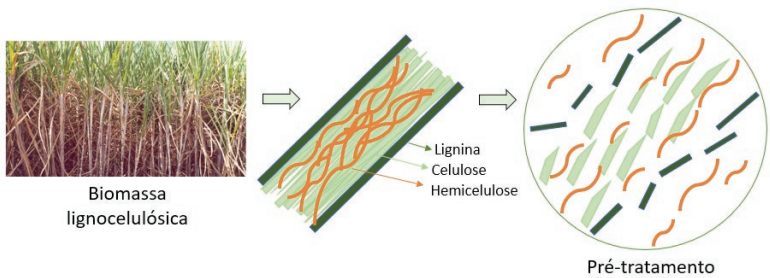
Composição (%, base seca)	Silva, 2009	Oliveira, 2010	Bayona Ayala, 2012
Celulose	38,1 ± 0,2	45,5 ± 1,1	40,10 ± 0,93
Hemicelulose	29,2 ± 0,3	27,0 ± 0,8	27,49 ± 0,67
Lignina	24,2 ± 0,2	21,1 ± 0,9	18,52 ± 0,76
Cinzas	2,4 ± 0,1	2,2 ± 0,1	5,75 ± 0,14
Extrativos	5,9 ± 0,2	4,6 ± 0,3	5,44 ± 0,14

4.2 Pré-tratamento de biomassa lignocelulósica

Dentre os processos envolvidos na produção de etanol de segunda geração, o pré-tratamento deve ser o primeiro a ser realizado, pois este influencia de forma direta no processo de hidrólise enzimática, uma vez que a eficiência deste processo está intimamente relacionada à composição da biomassa lignocelulósica. Se a biomassa for submetida ao processo de hidrólise enzimática em sua forma in natura, além do processo ser muito lento, o rendimento da hidrólise enzimática, ou seja, a conversão de celulose em glicose por ação de enzimas, é muito baixa (< 20%). Portanto, faz-se necessária a aplicação de um pré-tratamento, que será responsável por promover mudanças estruturais no material lignocelulósico (Figura 1). As principais mudanças estão relacionadas aos seguintes fatores: área superficial disponível; índice de cristalinidade da celulose; grau de polimerização; tamanho dos poros da biomassa; teor de lignina e revestimento da

celulose por hemicelulose (HENDRIKS; ZEEMAN, 2009; MOOD *et al*., 2013). A etapa de pré-tratamento, em geral, é responsável por pelo menos 20% dos custos totais relacionados à produção deste biocombustível (CHIARAMONTI *et al*., 2012). Há diversos tipos de pré-tratamentos que podem ser aplicados à biomassa lignocelulósica, porém, ainda não há um consenso sobre qual é o melhor método quando se considera a produção de etanol de segunda geração.

Figura 1 – Pré-tratamento da biomassa lignocelulósica



Fonte: Própria dos autores(2020)

Do ponto de vista de eficiência e custos do processo, as características esperadas/desejadas para o pré-tratamento são as seguintes (CHIARAMONTI *et al*., 2012; TAHERZADEH; KARIMI, 2008):

- produzir fibra celulósica acessível às enzimas;
- as condições do processo devem minimizar a perda de açúcares fermentescíveis;
- evitar a formação de possíveis inibidores de enzimas hidrolíticas e microrganismos de fermentação;

- a demanda de energia deve ser mantida no nível mais baixo possível, porém mantendo o alto desempenho do processo;
- o uso de produtos químicos deve ser reduzido, uma vez que devem ser neutralizados antes da etapa de hidrólise e fermentação. Como resultado da neutralização, há geração de resíduos a serem descartados;
- as dimensões do reator de pré-tratamento devem ser minimizados e o uso de materiais caros deve ser evitado (isso depende das condições operacionais do processo como, temperatura e pressão).

Há diversos tipos de pré-tratamentos que podem sem aplicados à biomassa lignocelulósica, dentre os quais têm os físicos, químicos, físico-químicos e biológicos.

4.2.1 PRÉ-TRATAMENTOS FÍSICOS

A biomassa lignocelulósica possui uma área total acessível composta pelas superfícies externa e interna. A superfície externa depende de sua forma e tamanho, enquanto a superfície interna depende do tamanho e distribuição dos poros. Quando a biomassa é submetida a um pré-tratamento físico poderá ocorrer um aumento em sua área superficial acessível, um aumento do tamanho dos poros, diminuição da cristalinidade e do grau de polimerização da celulose

(TAHERZADEH; KARIMI, 2008; HENDRIKS; ZEEMAN, 2009; PANDIYAN *et al*., 2019).

O aumento na área superficial específica e a redução do grau de polimerização são fatores que aumentam o rendimento total de hidrólise em 5 a 25%, na maioria dos casos (depende do tipo de biomassa, tipo e tempo de pré-tratamento) e reduzem o tempo de digestão enzimática em 23-59%, ou seja, provoca um aumento na taxa de hidrólise (HENDRIKS; ZEEMAN, 2009). No entanto, quando se considera o processo de hidrólise enzimática aplicada à diferentes biomassas lignocelulósicas para produção de biocombustível, faz-se necessária a avaliação sobre o tamanho ideal da partícula (BAIG; WU; TURCOTT, 2019).

Cominuição mecânica, extrusão e irradiação são os principais métodos físicos empregados para o pré-tratamento de biomassas lignocelulósicas (PANDIYAN *et al*., 2019).

A redução grosseira de tamanho, moagem e trituração estão entre os diferentes métodos mecânicos de redução de tamanho. A moagem e trituração são eficazes na redução do tamanho das partículas e da cristalinidade da celulose, provavelmente como resultado das forças de cisalhamento geradas durante a moagem.O tipo e a duração da moagem, bem como o tipo de biomassa, determinam o aumento da área superficial específica, o grau de polimerização final e a redução na cristalinidade da celulose (AGBOR *et al*., 2011). Uma vantagem do emprego da cominuição mecânica é a não produção de inibidores da fermentação do etanol, como furfural e hidroximetilfurfural – HMF, uma vez que esse método não faz uso de

reagentes químicos. No entanto, a alta demanda de energia exigida pelos equipamentos, eleva o custo do processo (ZHENG *et al*., 2014).

O método da extrusão, como pré-tratamento aplicado à biomassa lignocelulósica, vem sendo estudado nos últimos anos e parece ser um método promissor (PANDIYAN *et al*., 2019). A extrusão é uma operação que combina várias operações em uma unidade. As matérias-primas são alimentadas em uma extremidade da extrusora, que consiste em um cilindro com um ou dois parafusos giratórios em seu interior, e são transportadas ao longo da seção cilíndrica por acionamento dos parafusos. O cisalhamento gerado entre os parafusos e as paredes do cilindro provoca calor de atrito, responsável pelo aquecimento desses materiais e também ocorre a mistura. Como resultado desses fatores combinados, ocorrem modificações físicas e químicas nas biomassas, causando aumento significativo na acessibilidade das enzimas à celulose (HJORTH *et al*., 2011; ZHENG *et al*., 2014; PANDIYAN *et al*., 2019).

O pré-tratamento por extrusão tem apresentado algumas vantagens sobre outros pré-tratamentos, tais como: i) bom monitoramento e controle de processo; ii) não geração de produtos de degradação dos açúcares; iii) boa adaptabilidade à modificações do processo; iv) alto rendimento. Além disso, os sistemas extrusores são disponíveis comercialmente (ZHENG; REHMANN, 2014; ZHENG *et al*., 2014)

A irradiação é um método físico de pré-tratamento que inclui micro-ondas, ultrassom e feixe de elétrons (ZHENG *et al*., 2014).

As biomassas lignocelulósicas são decompostas por irradiação emfibras amorfas frágeis, oligossacarídeos de baixo peso molecular

e até celobiose. O índice de cristalinidade da biomassa diminui rapidamente com o aumento da dose de irradiação (TAHERZADEH; KARIMI, 2008; PANDIYAN *et al*., 2019).

O método de pré-tratamento por irradiação mais estudado é o que emprega micro-ondas. A energia é gerada por um campo eletromagnético e entreguediretamente à biomassa para fornecer aquecimento rápido em todo o material, com gradientes térmicos reduzidos. O campo de micro-ondas e a resposta dielétrica de um material determinam sua capacidade de ser aquecido com energia de micro-ondas. A tecnologia de micro-ondas pode ser uma alternativa eficaz ao aquecimento convencional, visto que pode aquecer mais rapidamente um grande volume, reduzindo o tempo de tratamento, o que pode levar a uma economia considerável de energia (ZHENG *et al*., 2014).

O pré-tratamento por ultrassom gera cavitações monolíticas, que resultam em efeitos físicos e químicos em soluções líquidas. Os efeitos físicos resultam do colapso de bolhas cavitacionais, que por sua vez produzem uma alteração elevada na natureza química através da formação de radicais livres. A combinação desses efeitos físicos e químicos pode causar alterações na estrutura da parede celular, aumentar a área superficial específica e reduzir o grau de polimerização, levando a maior biodegradabilidade da biomassa lignocelulósica na etapa de hidrólise enzimática (ZHENG *et al*., 2014).

O método de irradiação por feixe de elétrons é considerado um método não térmico, onde ocorre vibração das ligações polares, as quais são alinhadas a um campo magnético em constante mudança. A interrupção e choque nas ligações polares aceleram os processos

químicos, biológicos e físicos. A biomassa lignocelulósica sofre alterações que incluem o aumento da área superficial específica, redução do grau de polimerização e cristalinidade da celulose, hidrólise da hemicelulose e uma parcial despolimerização da lignina (SARKAR *et al.*, 2012).

No entanto, os processos de irradiação são mais caros e ainda apresentam dificuldades de expansão para escala industrial (PANDIYAN *et al.*, 2019).

4.2.2 PRÉ-TRATAMENTOS QUÍMICOS

Os métodos químicos de pré-tratamento fazem uso de ácidos, álcalis, solventes orgânicos, ozônio, líquidos iônicos ou outros produtos químicos. Esses métodos são de fácil aplicação e têm apresentado bons rendimentos de conversão. Os mais estudados e amplamente empregados no pré-tratamento de biomassas lignocelulósicas têm sido os ácidos e alcalinos (SARKAR *et al.*, 2012; PANDIYAN *et al.*, 2019). Dependendo do processo químico aplicado, haverá uma maior solubilização de hemicelulose ou de lignina presentes na biomassa.

O pré-tratamento ácido é um processo bem conhecido e o mais comumente usado para o pré-tratamento químico de biomassas lignocelulósicas. Age principalmente sobre a fração polissacarídica da biomassa, especialmente sobre a hemicelulose, provocando a sua solubilização e com isso torna a celulose mais acessível às enzimas, na etapa de hidrólise enzimática. Em ambientes ácidos, a lignina que venha a ser solubilizada, rapidamente se condensará e precipitará (HENDRIKS; ZEEMAN, 2009; SARKAR *et al.*, 2012; KUMARI; SINGH, 2018).

Levantamentos realizados por diversos grupos de pesquisas evidenciaram que o ácido sulfúrico tem sido o ácido mais comumente usado (TAHERZADEH; KARIMI, 2008; KUMARI; SINGH, 2018). Entretanto, nos últimos anos, diversos trabalhos tem sido realizados utilizando-se outros tipos de ácidos para o pré-tratamento de diversas biomassas lignocelulósicas, incluindo tanto os ácidos inorgânicos como, ácido clorídrico (ZU *et al*., 2014) e ácido fosfórico (GEDDES *et al*., 2010; LÓPEZ-LINARES *et al*., 2013; VASCONCELOS *et al*., 2013; FONTANA *et al*., 2018), quanto os ácidos orgânicos como, o maléico, o succínico e o oxálico (KOOTSTRA *et al*., 2009; ZHANG; KUMAR; WYMAN, 2013; BARISIK *et al*., 2016).

O pré-tratamento ácido pode ser conduzido a alta temperatura e baixa concentração de ácido (pré-tratamento com ácido diluído) ou sob baixa temperatura e alta concentração de ácido (pré-tratamento com ácido concentrado). Baixas temperaturas operacionais (por exemplo, 40 ºC) em pré-tratamento com ácido concentrado é uma vantagem quando comparada aos processos com ácido diluído. No entanto, a alta concentração de ácido (30 – 70%), aplicada ao pré-tratamento com ácido concentrado, o torna extremamente corrosivo e perigoso. Assim, esse processo exige que os reatores sejam construídos com material não metálico especializado ou com ligas caras (TAHERZADEH; KARIMI, 2008).

Durante o pré-tratamento ácido pode ocorrer a formação de produtos secundários inibidores, devido à conversão das hemiceluloses solubilizadas (oligômeros), através de reações hidrolíticas em furfural e hidrometilfurfural e outros produtos voláteis, o que pode inibir os

crescimento de microrganismos na etapa de fermentação a etanol (HENDRIKS; ZEEMAN, 2009; PANDIYAN *et al*., 2019).

Os pré-tratamentos que utilizam álcalis (alcalinos), ozônio (ozonólise) e solventes orgânicos (organossolve), atuam primordialmente na solubilização da lignina, processo comumente chamado de deslignificação. Em alguns casos, dependendo das condições aplicadas, pode haver também remoção de parte da hemicelulose (TAHERZADEH; KARIMI, 2008; HENDRIKS; ZEEMAN, 2009; ALVIRA *et al*., 2010; SARKAR *et al*., 2012; AMIN *et al*., 2017; KUMARI; SINGH, 2018; PANDIYAN *et al*., 2019).

Os principais reagentes utilizados no pré-tratamento alcalino têm sido os hidróxidos de sódio, de cálcio, de potássio e de amônio (SARKAR *et al*., 2012; KUMARI; SINGH, 2018, PANDIYAN *et al*., 2019;).

No pré-tratamento alcalino, a biomassa lignocelulósica fica em contato com uma solução alcalina e é misturada por um determinado período de tempo a uma temperatura específica. O processo pode ser realizado a baixas temperaturas, mas com um tempo relativamente longo e alta concentração de álcali (TAHERZADEH; KARIMI, 2008; PANDIYAN *et al*., 2019).

Durante o pré-tratamento alcalino, a superfície interna da biomassa sofre uma espécie de "inchaço", o que provoca uma diminuição do grau de polimerização e de cristalinidade do material, quebra das ligações cruzadas entre a lignina e outros componentes, como a hemicelulose e a solubilização da lignina, tendo como resultado um aumento na porosidade da biomassa. Todos esses fatores associados são responsáveis pelo aumento da digestibilidade da celulose, na etapa subsequente de hidrólise enzimática. Além

disso, são mais efetivos na solubilização da lignina e apresentam menor solubilização da celulose e da hemicelulose que os processos de pré-tratamento ácidos ou hidrotérmicos (ALVIRA *et al*., 2010; AMIN *et al*., 2017; KUMARI; SINGH, 2018). Uma desvantagem do processo é a necessidade de neutralização da polpa pré-tratada (KUMARI; SINGH, 2018).

O pré-tratamento de materiais linocelulósicos pode ser realizado por tratamento com ozônio, processo conhecido por "ozonólise" ou "ozonização". O ozônio é produzidopela exposição do O_2 a alta voltagem elétrica. É um poderoso agente oxidante, que mostra alta eficiência de deslignificação e remoção de lignina, o que provoca um aumento na exposição da celulose na biomassa, tornando-a mais acessível às enzimas no processo de hidrólise enzimática. O processo geralmente é realizado a temperatura ambiente e pressão normal, o que favorece a não produção de compostos inibidores que podem afetar as etapas de hidrólise e fermentação subsequentes (TAHERZADEH; KARIMI, 2008; ALVIRA *et al*., 2010;BAIG; WU; TURCOTT, 2019; PANDIYAN *et al*., 2019).

Ainda como vantagens da aplicação de ozônio como pré-tratamento, tem-se que a geração de ozônio ocorre no próprio local, com utilização direta, o que evita problemas relacionados ao fornecimento e armazenamento de produtos químicos; durante o processo de pré-tratamento há ausência de fase líquida, evitando assim problemas relacionados à diluição do produto e ainda, não há necessidade de aditivos químicos durante o processo. Por outro lado, o processo apresenta algumas desvantagens: i) as características altamente reativas, corrosivas e tóxicas do ozônio, leva a processos

potencialmente perigosos; ii) as características exotérmicas do processo podem exigir sistemas de refrigeração; iii) altos custos de geração devido à grande demanda de energia (custos do oxigênio e de energia elétrica) (TRAVAINI *et al*., 2016).

O pré-tratamento organossolve é um método promissor para solubilizar a lignina e aumentar a acessibilidade da celulose durante o processo de hidrólise enzimática (PANDIYAN *et al*., 2019). No processo, podem ser utilizados solventes orgânicos em mistura com água para a solvatação. Diversos solventes orgânicos podem ser usados como: metanol, etanol, acetona, etileno glicol, trietileno glicol, álcool tetrahidrofurfurílico(SUN; CHENG, 2002; KUMARI; SINGH, 2018; PANDIYAN *et al*., 2019).

Nesse processo, o solvente ou a mistura de solventes é misturado a um catalisador que pode ser um ácido orgânico (oxálico, acetilsalícilico e salicílico) ou inorgânico (HCl e H_2SO_4) ou básico (NaOH, NH_3 e $CaCO_3$) (SUN; CHENG, 2002; KUMARI; SINGH, 2018).

As vantagens do método incluem a facilidade de recuperação dos solventes orgânicos por destilação, o que possibilita a reutilização dos mesmos no processo de pré-tratamento e a recuperação química. Os processos de polpação com organossolvente possibilita o isolamento da lignina como material sólido e os carboidratos, como xarope, os quais se mostram promissores com matéria-prima química. Esse método de pré-tratamento parece ser mais viável dentro do conceito de biorrefinaria, que considera a utilização de todos os componentes da biomassa lignocelulósica. No entanto, algumas desvantagens inerentes ao processo foram relatadas, tais como: a necessidade de lavagem dos sólidos pré-tratados com um solvente

orgânico, antes da lavagem com água, a fim de evitar a precipitação da lignina dissolvida, o que exige alguns arranjos de lavagem; os solventes orgânicos são sempre caros e, portanto, devem ser recuperados o máximo possível, o que leva ao aumento do consumo de energia. Além disso, o pré-tratamento com solventes orgânicos deve ser realizado sob controle rígido e eficiente, devido à volatilidade desses solventes (ZHAO; CHENG; LIU, 2009).

Líquido iônico (LI) é o termo comumente aceito para sais de baixo ponto de fusão (menor que 100 °C), obtido pela combinação de grandes cátions orgânicos com uma grande variedade de ânions. O número de combinações de cátions e ânions que podem dar origem a potenciais líquidos iônicos (LIs) é vasto e, devido a alta possibilidade de variações sintéticas, os LIs passaram a ser denominados de "solventes projetados" (CHIAPPE; PIERACCINI, 2005).

O pré-tratamento com LIs pressupõe o processamento de uma mistura bifásica (biomassa lignocelulósica e LI numa proporção sólido/líquido pré-determinada), a uma certa temperatura e por um período de tempo. A dissolução da biomassa pode ser parcial ou completa, embora a dissolução completa melhore a eficiência do pré-tratamento. Após a dissolução, é realizada a regeneração da biomassa com a adição de um anti-solvente, como água, acetona, diclorometano e acetonitrila. A fração da biomassa regenerada demonstra ser composta essencialmente por carboidratos, enquanto a lignina parece ser parcialmente extraída na mistura LI/anti-solvente (LOPES *et al*., 2013).

Os LIs possuem as vantagens de baixa toxicidade, baixa hidrofobicidade, baixa viscosidade, estabilidade térmica (mesmo

acima de 300 °C), ampla seleção de combinações de cátions e ânions, boa estabilidade eletroquímica, altas taxas de reações, baixa volatilidade com impacto ambiental mínimo e propriedades não inflamáveis (LOPES *et al*., 2013; ZHENG *et al*., 2014).

4.2.3 PRÉ-TRATAMENTOS FÍSICO-QUÍMICOS

Dentro desta categoria de pré-tratamentos estão as tecnologias de explosão a vapor, explosão da fibra por amônia (AFEX) e hidrotérmico(AGBOR *et al*., 2011).

Explosão a vapor, também chamado de auto-hidrólise é o método físico-químico mais amplamente estudado e aplicado com maior frequência para o pré-tratamento de biomassas lignocelulósicas. É bastante relatado na literatura, tendo sido testado e aplicado por diversos grupos de pesquisa, tanto em escala laboratorial quanto em escala piloto e até já demonstrado em plantas industriais (TAHERZADEH; KARIMI, 2008; AGBOR *et al*., 2011).

O objetivo do pré-tratamento a vapor é a solubilização da hemicelulose, tornando a celulose mais acessível às enzimas durante o processo de hidrólise enzimática e, ainda evitar formação de compostos inibidores (HENDRIKS; ZEEMAN, 2009).

A biomassa é submetida a vapor saturado de alta pressão por um determinado período de tempo e, em seguida, a pressão é rapidamente reduzida, fazendo com que a biomassa sofra uma descompressão explosiva. Durante o processo, a biomassa é submetida a uma temperatura de 160-260 °C com uma pressão correspondente de 0,7 a 4,8 MPa, por poucos segundos (por exemplo, 30 segundos)

a poucos minutos (por exemplo, 20 minutos) antes de o material ser exposto à pressão atmosférica (TAHERZADEH; KARIMI, 2008; ZHENG *et al*., 2014; KUMAR; SHARMA, 2017).

Esse tipo de pré-tratamento atua pela combinação de forças mecânicas e de efeitos químicos. Os efeitos mecânicos são causados devido à súbita redução da pressão, o que permite a separação das fibras da biomassa em suas formas individuais. A ação química ocorre porque, a altas temperaturas, o processo de auto-hidrólise é favorecido, fazendo com que ocorra a formação de ácido acético a partir dos grupos acetila associados à hemicelulose. Esse ácido acético liberado pode catalisar a hidrólise da hemicelulose, resultando na liberação de monômeros de glicose e xilose. Em combinação com a hidrólise parcial e solubilização da hemicelulose, a lignina é redistribuída e pode haver a remoção de uma certa quantidade deste componente (ALVIRA *et al*., 2010; AGBOR *et al*., 2011).

No processo AFEX, o material lignocelulósico é tratado com amônia anidra líquida, a temperatura entre 60 – 100 ^{o}C e alta pressão, por um período variável de tempo. Após o tempo determinado, a válvula de pressão é rapidamente aberta, aliviando explosivamente a pressão. A rápida expansão do gás amônia causa um "inchaço" na biomassa lignocelulósica e ruptura de suas fibras, redução parcial da cristalinidade da celulose e aumento da área superficial acessível (ALVIRA *et al*., 2010; AGBOR *et al*., 2011).

Esse pré-tratamento tem as desvantagens de ser menos eficiente para biomassas que apresentem em sua composição um alto teor de lignina, além de causar a solubilização de uma pequena fração de hemicelulose na forma de oligômeros. Uma das principais

vantagens é a não formação de subprodutos inibidores, uma vez que não ocorre degradação de açúcares. No entanto, partes de fragmentos fenólicos provenientes da lignina e outros extrativos da parede celular da biomassa podem permanecer na polpa obtida do pré-tratamento e, portanto, a lavagem com água pode ser necessária para a remoção desses compostos (TAHERZADEH; KARIMI, 2008; SARKAR *et al*., 2012).

Os parâmetros que devem ser considerados para um processo eficaz são a carga de amônia, temperatura, quantidade de água, tempo e número de tratamentos (BALAT, 2011; SARKAR *et al*., 2012). A viabilidade do processo exige a eficiente recuperação da amônia após o processode pré-tratamento, devido ao seu alto custo, bem como devido à proteção ambiental(TAHERZADEH; KARIMI, 2008).

No processo de pré-tratamento hidrotérmico aplica-se uma determinada pressão à mistura biomassa/água, durante um período fixo de tempo, de forma a manter a água líquida a altas temperaturas (160 – 240 °C) (ALVIRA *et al*., 2010; BALAT, 2011). A água sob pressão penetra na biomassa, hidrata a celulose, remove a hemicelulose e parte da lignina. No entanto, também contribui para a produção de pequenas quantidades de compostos de degradação inibidores, como furfural e ácidos carboxílicos (TAHERZADEH; KARIMI, 2008; SARKAR *et al*., 2012).

Os carboidratos provenientes da solubilização da hemicelulose são dissolvidos como oligossacarídeos solúveis em líquidos e podem ser separados por filtração, obtendo-se uma fração sólida enriquecida com celulose e lignina. A lignina é parcialmente despolimerizada e solubilizada durante o pré-tratamento hidrotérmico, mas a deslignificação completa não é possível, devido àrecondensação

de componentes solúveis originários da lignina. No entanto, esse método de pré-tratamento pode aumentar a área superficial acessível da celulose e torná-la mais acessível às enzimas hidrolíticas (TAHERZADEH; KARIMI, 2008; ALVIRA *et al.,* 2010).

O pré-tratamento hidrotérmico se mostra atraente devido ao potencial de redução de custos, uma vez que não exige a adição de produtos químicos como catalisadores e à não necessidade de materiais resistentes à corrosão para reatores de hidrólise. A redução do tamanho da matéria-prima é uma operação altamente exigente em energia para a grande quantidade de materiais em escala comercial e também não haveria necessidade de redução de tamanho, ao se aplicar o pré-tratamento hidrotérmico. No entanto, a demanda de água no processo é maior, quando comparado ao processo de explosão a vapor (TAHERZADEH; KARIMI, 2008; ALVIRA *et al.,* 2010).

4.2.4 PRÉ-TRATAMENTOS BIOLÓGICOS

A desconstrução das estruturas da lignina presente na parede celular de biomassas lignocelulósicas usando microrganismos e/ou enzimas como catalisadores é denominada de pré-tratamento biológico. Esse tipo de pré-tratamento tem recebido uma certa atenção como um método para melhorar a digestibilidade enzimática de biomassas lignocelulósicas. É um método seguro e ecológico e podem ser usados fungos, consórcios microbianos e enzimas (ALVIRA *et al*., 2010; AMIN *et al*., 2017; KUMARI; SINGH, 2018).

Fungos de podridão branca, como *Phanerochaete chrysosporium*, *Ceriporia lacerata*, *Cyathus stercolerus*, *Ceriporiopsis*

subvermispora, *Pycnoporus cinnarbarinus* e *Pleurotus ostreaus* demonstraram alta eficiência na deslignificação de diversas biomassas lignocelulósicas. Esses fungos são capazes de produzir enzimas modificadores da lignina, como lacases, lignina peroxidases e manganês peroxidases que atuam diretamente sobre a degradação da lignina (ALVIRA *et al*., 2010; SUN *et al*., 2016).

O pré-tratamento através do consórcio microbiano é conduzido por microrganismos selecionados de ambientes naturais (solo, estercos etc.), onde a biomassa lignocelulósica é utilizada como substrato.Diferentemente do pré-tratamento por fungos selecionados, que agem principalmente sobre a degradação da lignina, os consórcios microbianos geralmente têma capacidade de degradar a celulose e a hemicelulose da biomassa (ZHENG *et al*., 2014; KUMARI; SINGH, 2018).

Em geral, os pré-tratamentos biológicos ainda não se apresentam tão promissores para a produção de biocombustíveis a nível industrial. Embora, apresentem algumas vantagens como baixo consumo de energia e a não exigência de produtos químicos, demandam um longo tempo de pré-tratamento, podendo durar várias semanas, para que se alcance uma taxa de hidrólise enzimática relativamente alta (SUN *et al*., 2016; KUMARI; SINGH, 2018).

5. HIDRÓLISE ENZIMÁTICA

Após um pré-tratamento adequado, os carboidratos complexos da biomassa lignocelulósica podem ser hidrolisados enzimaticamente em monômeros de açúcar. A hidrólise enzimática é realizada, basicamente, para converter os componentes da celulose e

hemicelulose em açúcares que podem ser fermentados para produção de etanol de segunda geração (FATMA *et al*., 2018).

A hidrólise enzimática da celulose envolve a ação sinérgica das celulases, que formam um complexo enzimático constituído por: endoglicanases (EC3.2.1.4), que clivam ligações internas da fibra celulósica; as exoglicanases (EC 3.2.1.91), que atuam na região externa da celulose; e as β- glicosidases (EC 3.2.1.21), que hidrolisam oligossacarídeos solúveis em glicose. Quando atuam em conjunto, apresentam um rendimento melhor do que quando atuam isoladamente (CASTRO; PEREIRA JR., 2010).

As endo-β-1,4-glicanases ou endoglicanases iniciam hidrolisando randomicamente as regiões com baixa cristalinidade, da estrutura amorfa da fibra celulósica, liberando oligossacarídeos de vários tamanhos, além de novos terminais, sendo um redutor e um não redutor (SAINI; SAINI; TEWARI, 2015).

As exoglicanases (celobiohidrolases, avicelases, exo-1,4-β-d-glicanase) atuam nas extremidades redutoras e não redutoras da molécula de celulose, liberando unidades de celobiose (celobiohidrolases) e monômeros de glicose, diretamente dos terminais do polímero (glicanohidrolases) (LIAO; PONTRELLI; LUO, 2016).

As celobiohidrolases participam da hidrólise primária da fibra e são responsáveis pela amorfogênese, um fenômeno ainda não esclarecido completamente, entretanto,sabe-se que envolve uma ruptura física do substrato, causando desestratificação das fibras, pelo aumento das regiões intersticiais. A amorfogênese promove aumentos na taxa de hidrólise da celulose, por tornar as regiões cristalinas mais expostas às celulases. As celobiohidrolases podem ser

de dois tipos: a tipo I, que hidrolisa terminais redutores, e as do tipo II, que hidrolisa terminais não redutores. Elas sofrem inibição pelo seu produto de hidrólise, a celobiose, por isso é de grande importância a atuação de outra enzima do complexo celulolítico, a β-glicosidade (SHARMA; QIN; XU, 2018; BON *et al*., 2008;ZHANG; LYND, 2004).

As β-1,4-glicosidases ou celobiases hidrolisam celobiose e oligossacarídeos solúveis com liberação de glicose, reduzindo assim a inibição das endoglicanases e exoglicanases pela presença deste dímero, além de aumentar o rendimento total dos açúcares fermentescíveis. A ação das β-glicosidases, além de finalizar a despolimerização, também contribui para a taxa global do processo consumindo a celobiose, que é um inibidor de endoglicanase e de exoglicanase (KUHAD; GUPTA; SINGH,2011;ZABED *et al*., 2017).

Uma vez que apresentam um baixo grau de polimerização e natureza amorfa, a hemicelulose é degradada mais facilmente que a celulose. Apesar disso, é necessário um sistema de enzimas específicas para degradação completa, dada a sua estrutura variável e ramificada (MAMO, 2019; SHALLOM; SHOHAM, 2003).

As hemicelulases são heteropolímeros ramificados consistindo de pentoses (xilose, arabinose), hexoses (glicose, manose, galactose) e açúcares ácidos dos quais a xilana é a mais abundante (70-90 %). O grau de polimerização da maioria das hemiceluloses é de 70 a 200 unidades de monossacarídeos (VOLYNETS; DAHMAN, 2011).

As hemicelulases mais estudadas são as que hidrolisam a hemicelulose do tipo xilana. Usualmente, a xilana é desramificada antes ou em conjunto com a despolimerização da cadeia principal. São requeridas diferentes enzimas dependendo do tipo específico de

xilana a ser hidrolisada. Essas incluem enzimas que despolimerizam a cadeia principal: endo-1,4-β-xilanases e β-xilosidases. Existem ainda enzimas acessórias ou desramificadoras, que removem grupos laterais ou substituintes como as α-L-arabinofuranosidase, α-D-glucuronidase, acetilxilanaesterase e esterases de ácido 46 fenólico (ácido ferúlico e ácido p-cumáricoesterases) (FATMA *et al*., 2018).

Quando os substituintes são removidos, a xilana pode tornar-se menos solúvel e formar agregados que estereoquimicamente retardam ou diminuem sua degradação. Portanto, a remoção simultânea da cadeia lateral e a clivagem na cadeia principal pelas endoenzimas melhoram sinergisticamente a taxa de degradação da hemicelulose (GRAY *et al*., 2006).

As endoxilanases ou D-xilanases (1,4-β-D-xilana xilanoidrolase EC 3.2.1.8) clivam as ligações β-1,4-xilosídicas entre dois resíduos D-xilopiranosídeo. Elas constituem o maior grupo de enzimas hidrolíticas envolvidas na degradação da cadeia da xilana (insolúvel), liberando oligossacarídeos solúveis de diferentes comprimentos e reduzindo o seu grau de polimerização. Os principais produtos da hidrólise são a xilobiose, xilotriose e oligômeros contendo de 2 a 4 resíduos de β-D-xilopiranosil (LI *et al*., 2000; MAMO, 2019).

As β-D-xilosidases (1,4-β-D-xilana xiloidrolase; EC 3.2.1.37) também são conhecidas como xilobiases e exo-β-1,4-xilanases em função de sua relativa afinidade com a xilobiose e xilooligossacarídeos maiores, respectivamente. As β-xilosidases promovem a clivagem da xilobiose e o ataque do terminal não redutor dos xilooligossacarídeos para liberar xilose (RASMUSSEN *et al*., 2006). Devido a sua ação catalítica, a β-xilosidase assume um importante papel na degradação

da xilana pela remoção dos produtos da endoxilanase (pequenos oligômeros de β-D-xilopiranosil), que inibem a atividade desta enzima e, consequentemente, limita a eficiência da hidrólise da xilana (ANDRADE *et al*., 2004).

Além das celulases e hemicelulases, enzimas acessórias como esterases e arabinosidases têm se destacado por aumentarem a eficiência da hidrólise enzimática contribuindo para redução da carga enzimática e dos custos (ROBAK; BALCEREK, 2018).

As enzimas utilizadas nos processos industriais são produzidas principalmente por fungos filamentosos dos gêneros *Aspergillus*, *Penicillium* e *Trichoderma*. Os coquetéis de celulase do *T. reesei* são amplamente aplicados na indústria, mas apresentam algumas desvantagens, como a reduzida produção de β-glicosidase, resultando em alta inibição do produto no processo de degradação. Por outro lado, o grupo dos *Aspergillus* pode superar esse problema, mas eles tendem a não secretar altos níveis de endoglicanases e celobiohidrolases. Já os fungos *Penicillium* tem se destacado como produtores promissores de complexos celulase altamente ativos (PAYNE *et al*., 2015).

Após a hidrólise, a quantidade de açúcares liberada vai depender, entre outros, do tipo e da concentração da matéria-prima utilizada, da eficiência do pré-tratamento, da temperatura, do pH e da carga enzimática (SAINI; SAINI; TEWARI, 2015).

As celulases podem ser inibidas por muitas substâncias, como celobiose, xilo-oligossacarídeos, glicose e alguns produtos de degradação da lignocelulose formados durante o pré-tratamento,

como furfural, 5-hidroximetil furfural (HMF) e compostos fenólicos solúveis(ALVES *et al*., 2018).

A celobiose combinada com o triptofano pode se localizar próximo ao sítio ativo da celobiohidrolase, formando um impedimento estérico que impede que as cadeias de celulose sejam hidrolisadas pelas celulases (ZHAO*et al*., 2004). Aβ-glicosidase,adicionada à hidrólise enzimática, pode reduzir a inibição da celobiose. Entretanto, um alto teor de glicose no hidrolisado inibe as atividades dessas enzimas. Os xilo-oligossacarídeos diminuem a taxa de hidrólise inicial e o rendimento final de glicose, mesmo em baixa concentração. Provavelmente, furfural, HMF e compostos fenólicos solúveis liberados durante alguns tipos de pré-tratamentopodem inibir a hidrólise enzimática dos materiais lignocelulósicos, bem como a fermentação subsequente (SUN *et al*., 2016).

Diferentes processos de produção de etanol de segunda geração têm sido estudados: Fermentação e Hidrólise Separadas (FHSe) e Fermentação e Hidrólise Simultâneas (FHSm). Se a fermentação é realizada após a hidrólise enzimática, utilizando o hidrolisado do substrato que foi filtrado para remoção dos sólidos em suspensão, a configuração do processo é definida como FHSe. A vantagem da FHSe é que ambas as etapas podem ser realizadas em suas condições ótimas e a reciclagem da levedura é facilmente possível. Entretanto, neste caso, o custo capital é maior e a hidrólise enzimática pode ser limitada por inibição da enzima pelo produto final. Por outro lado, na FHSm, no mesmo reator que ocorre a hidólise é realizada a fermentação, sem ocorrência de filtração e separação do hidrolisado do substrato sólido. Neste caso, o custo capital e o tempo de reação são menores

e a inibição da enzima pelo seu produto final é reduzida porque os açúcares produzidos vão sendo proporcionalmente fermentados. A FHSm não permite a reciclagem de levedura e a hidrólise geralmente é realizada abaixo da sua temperatura ótima. Em ambosos processos acima mencionados, o rendimento de etanol pode ser aumentado se o agente de fermentação é capaz de converter pentoses e hexoses em simultâneo (HOYER; GALBE; ZACCHI, 2013; NEVES; PITARELO; RAMOS, 2016).

O principal obstáculo da hidrólise enzimática tem sido o alto custo das enzimas envolvidas no processo de produção, em escala industrial, do etanol de segunda geração.Uma vez que para produção de aproximadamente 300 mil litros de etanol são necessários aproximadamente 1000 kg de biomassa seca e 10000g de celulase, é imprescindível a utilização enzimas de baixo valor para tornar o processo economicamente viável (JOHNSON; CONSULTING; SWITZERLAND, 2016; LIU; ZHANG; BAO,2016). Nesta perspectiva, vários estudos envolvendo o *screening* de novos microrganismos produtores de celulases e hemicelulases, o uso de substratos de baixo custo para induzir a produção destas enzimas, a otimização da produção e da hidrólise enzimática, além da clonagem dos genes envolvidos com a produção de celulases, têm sido realizados (BHATTI*et al*., 2006; GOMATHI*et al*., 2012; LIU *et al*.,2016).

6. REFERÊNCIAS

AGBOR, V. B. *et al*. Biomass pretreatment: Fundamental toward application. **Biotechnology Advances**, v. 29, p. 675-685, 2011.

ALVES, L.F.*et al.*Novel ethanol- and 5-hydroxymethyl furfural-stimulated b-glucosidaseretrievedfrom a BraziliansecondaryAtlantic Forest soilmetagenome. **Frontiers in Microbiology**, v.9, 2018.

ALVIRA, P.*et al.* Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: A review. **Bioresource Technology**, v. 101, p. 4851-4861, 2010.

AMIN, F. R.*et al.* Pretreatment methods of lignocellulosic biomass for anaerobic digestion. **AMB Express**, v. 7 (1), p. 1-12, 2017.

ANDRADE, S.V.*et al*. Effect of carbon source on the biochemical properties of β-xylosidases produced by *Aspergillus versicolor*. **ProcessBiochemistry**, v.39, p.1931-1938, 2004.

ANDRIETTA, M. G. S.; STECKELBERG, C.; ANDRIETTA, S. R.; Bioetanol – Brasil, 30 anos na vanguarda. Construindo a História dos Produtos Naturais #7. **MultiCiência,** outubro 2006.

BAIG, K. S.; WU, J.; TURCOTTE, G. Future prospects of delignification pretreatment for the lignocellulosic materials to produce second generation bioethanol. **International Journal of Energy Research**, v. 43, p. 1411-1427, 2019.

BALAT, M. Production of bioethanol from lignocellulosic materials via the biochemical pathway: A review. **Energy Conversion and Management**, v. 52, p. 858-875, 2011.

BARISIK, G*et al*. Optimization of Organic Acid Pretreatment of Wheat Straw. **BiotechnologyProgress**, v. 32, n. 6, p. 1487-1493, 2016.

BAYONA AYALA, O. L. Avaliação de pré-tratamentos para a hidrólise enzimática de palha de cana-de-açúcar considerando a produção de etanol. Campinas.

2012. (Mestrado em Engenharia Química). Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

BENITES-LAZARO, L. L. *et al*. Land-water-food nexus of biofuels: Discourse and policy debates in Brazil. **Environmental Development**, v. 33, p. 100491, 2020.

BHATTI, H. N. *et al*. Optimization of media for enhanced glucoamylase production in solid-state fermentation by *Fusarium solani*. **Food Technology and Biotechnology**, v. 45, n. 1, p. 51-56, 2006.

BITTENCOURT, G. A.*et al*.Fractionation of sugarcane bagasse using hydrothermal and advanced oxidative pretreatments for bioethanol and biogas production in lignocellulose biorefineries. **Bioresource Technology**, v. 292, p. 121963, 2019.

BON, E. P. S.; GÍRIO, F.; PEREIRA JUNIOR, N. Enzimas na produção de etanol. In: **Enzimas em Biotecnologia: Produções, Aplicações e Mercado**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Interciência Brasil. p. 241-271, 2008.

BRASIL, 2017. Lei Nº 13.576, de 26 de Dezembro de 2017. Diário Oficial da União – Seção 1, Nº 247, 27 de dezembro de 2017. Disponível em: http://pesquisa.in.gov.br/imprensa. Acesso em:14 abr. 2020.

CANALBIOENERGIA, 2020. **RenovaBio: é hora da certificação (matéria publicada em 01/11/2019)**. Disponível em: https://www.canalbioenergia.com.br/renovabio-e-hora-da-certificacao/.Acesso em: 15 abr. 2020.

CANILHA, L.*et al*. Review Article – Bioconversion of Sugarcane Biomass into Ethanol: An Overview about Composition, Pretreatment Methods, Detoxification of Hydrolysates, Enzymatic Saccharification, and Ethanol Fermentation. **Journal of Biomedicine and Biotechnology**, v. 2012, p.1-15, 2012.

CASTRO, A. M.; PEREIRA JÚNIOR, N. Produção, propriedades e aplicação de celulases na hidrólise de resíduos agroindustriais. **Química Nova**, v. 33, p. 181-188, 2010.

CGEE. **Bioetanol combustível: uma oportunidade para o Brasil** – Brasília, DF: Centro deGestão e Estudos Estratégicos, 2009.

CHIAPPE, C.; PIERACCINI, D. Ionic liquids: solvent properties and organic reactivity. **Journal of Physical Organic Chemistry**, v.18, p. 275-297, 2005.

CHIARAMONTI, D. *et al*. Review of pretreatment processes for lignocellulosic ethanol production, and development of an innovative method. **Biomass and Bioenergy**, v. 46, p. 25-35, 2012.

CONAB, 2020. **Companhia Nacional de Abastecimento**. Disponível em: <https://portaldeinformacoes.conab.gov.br/safra-serie-historica-dashboard>. **Acesso em: 18 abr. 2020.**

CTC, 2020. **Etanol Celulósico**. Disponível em https://ctc.com.br/etanol-celulosico. Acessoem: 20 abr. 2020.

DIAS, M. O. S. *et al*. Biorefineries for the production of first and second generation ethanol and electricity from sugarcane. **Applied Energy**, v. 109, p. 72-78, 2013.

FATMA, S. *et al*. Lignocellulosic Biomass: A Sustainable Bioenergy Source for the Future. **Protein & Peptide Letters**, v. 25, p. 148-163, 2018.

FERREIRA-LEITÃO, V. *et al*.Biomass Residues in Brazil: Availability and Potential Uses. **Waste Biomass Valor**, v. 1, p. 65-76, 2010.

FONTANA, J. D. *et al*.Sugar Versatility – Chemical and Bioprocessing of Many Phytobiomass Polysaccaharides Using a Milder Hydrolytic Catalyst: Diluted Thermopressurized Phosphoric Acid. *In*: **Sugarcane Technology and Research**. IntechOpen, 2018.

GEDDES, C. C.*et al*. Optimizing the saccharification of sugar cane bagasse using dilute phosphoric acid followed by fungal cellulases. **Bioresource Technology,** v. 101, p. 1851-1857, 2010.

GOMATHI, D. *et al*. Submerged fermentation of wheat bran by *Aspergillus flavus* for production and characterization of carboxy methyl cellulase. **Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine**, v. 2, n. 1, p. 67-73, 2012.

GRAY, K.A., ZHAO, L., EMPTAGE, M. Bioethanol. **Current Opinion in Chemical Biology**, v.10, p. 141–146, 2006.

HENDRIKS, A. T. W. M.; ZEEMAN, G. Pretreatment to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. **Bioresource Tecnhology**, v. 100, p. 10-18, 2009.

HJORTH, M.*et al*. Extrusion as a pretreatment to increase biogas production. **Bioresource Tecnhology**, v. 102, p. 4989-4994, 2011.

HOYER, K.; GALBE, M.; ZACCHI, G. Influence of fiber degradation and concentration of fermentable sugars on simultaneous saccharification and fermentation of high-solids spruce slurry to ethanol. **Biotechnology for Biofuels**, v.6, n.1, p.145, 2013.

JOHNSON, E.; CONSULTING, A.; SWITZERLAND, G. Integrated enzyme production lowers the cost of cellulosic ethanol. **Biofuels, Bioproducts, Biorefining**, v.10, p.164–174, 2016.

KOOTSTRA, A. M. J.*et al*. Optimization of the dilute maleic acid pretreatment of wheat straw. **Biotechnology for Biofuels**, v. 2:31, p. 1-14, 2009.

KUHAD, R.C.; GUPTA, R.; SINGH, A. Microbial cellulases andtheir industrial applications. **Enzyme Research**, 280696, 2011.

KUMAR, A. K.; SHARMA, S. Recent updates on different methods of pretreatment of lignocellulosic feedstocks: a review. **Bioresources and Bioprocessing**, v. 4 (1), p. 1-19, 2017.

KUMARI, D.; SINGH, R. Pretreatment of lignocellulosic wastes for biofuel production: A critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 90, p. 877-891, 2018.

LI, K.*et al*. Relationships between activities of xylanases and xylan structures. **Enzyme Microbiology and Technology**, v. 27, p. 89-94, 2000.

LIAO, J.C. M.I. L, PONTRELLI. S., LUO, S. Fuelling the future: microbial engineering for the production of sustainablebiofuels. **Nature Review Microbiology**, v.14, p. 288–304, 2016.

LIU, G.; ZHANG, J.; BAO, J. Cost evaluation of cellulase enzyme for industrial-scale cellulosic ethanol production based on rigorous Aspen Plus modeling. **Bioprocess and Biosystems Engineering**, v. 39, p.133–140, 2016.

LIU, Z. J.*et al*. Effect of bissulfite treatment on composition, structure, enzymatic hydrolysis and cellulase adsorption profiles of sugarcane bagasse. **Bioresource Technology**, v. 223, p. 27-33, 2017.

LOPES, A. M. C.*et al*. Pre-treatment of lignocellulosic biomass using ionic liquids: Wheat straw fractionation. **Bioresource Technology**, v. 142, p. 198-208, 2013.

LÓPEZ-LINARES, J. C.*et al*. Fermentable sugar production from rapessed straw by dilute phosphoric acid pretreatment. **Industrial Crops and Products**, v. 50, p. 525-531, 2013.

LORENZI, B. R.; ANDRADE, T. H. N. O Etanol de Segunda Geração no Brasil – Políticas e Redes Sociotécnicas. **Revista Brasileira de Ciências Sociais**, v. 34, n. 100, 2019.

MAMO, G. Alkaline active hemicellulases. **Adv Biochem Eng Biotechnol**, p.1-47, 2019.

MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Anuário estatístico da agroenergia/Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento** – Brasília: Mapa/ACS, 2009. 160p. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/sustentabilidade/agroenergia/arquivos-publicacoes-agroenergia/anuario-estatistico-da-agroenergia-2009.pdf>. **Acesso em: 24 fev. 2020**

MAPA, 2020a. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretatia de Política Agrícola – Departamento de Café, Cana-de-Açúcar e Agroenergia. Disponível em:

<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/agroenergia/arquivos-producao/001PRODUOBRASILEIRADECANADEACARACAREETANOL_12022020.pdf/view>**Acesso em: 14 abr. 2020**

MAPA, 2020b. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – SAPCANA – Sistema de Acompanhamento da Produção Canavieira (Cadastro de Instituições). Disponível em: <http://sistemasweb.agricultura.gov.br/sapcana/downloadBaseCompletaInstituicao!downloadArquivo.action>. Acesso em: 18 abr. 2020.

MILANEZ, A. Y. *et al*. O acordo de Paris e a transição para o setor de transportes de baixo carbono: o papel da Plataforma para o Biofuturo. *In*: **BNDES Setorial**, Vol 1/Março de 2017.

Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/11734>. Acessoem: 15 abr. 2020.

MOOD, S. H.*et al*. Lignocellulosic biomass to ethanol, a comprehensive review with a focus on pretreatment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 27, p. 77-93, 2013.

MOREIRA, M. M. R.; ARANTES, S. M. **Análise socioeconômica e ambiental da produção de etanol de milho no centro oeste brasileiro**. PolicyBrief, São Paulo, maio de 2018. INPUT – Iniciativa para Uso da Terra – Agroicone

NEVES, P. V.; PITARELO, A. P.; RAMOS, L. P. Production of cellulosic ethanol from sugarcane bagasse by steam explosion: effect of extractives content, acid catalysis and different fermentation technologies. **Bioresource Technology**, v.208, p.184-194, 2016.

NALI, E. C.; RIBEIRO, L. B. N. M.; HORA, A. B. Biorrefinaria integrada à indústria de celulose no Brasil: oportunidade ou necessidade? *In*: **BNDES Setorial**/Março de 2016. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/9434>. Acesso em: 15 abr. 2020.

OJEDA, K.*et al*. Evaluation of technological alternatives for process integration of sugarcane bagasse for sustainable biofuels production – Part 1. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 89, p. 270- 279, 2011.

OLIVEIRA, F. M. V. **Avaliação de diferentes pré-tratamentos e deslignificação alcalina na sacarificação da celulose de palha de cana.** 2010. (Mestrado em Biotecnologia Industrial). Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2010.

PACHECO, T. F.; MACHADO, C. M. M.; GONÇALVES, S. B. Produção de Etanol. *In*: MACHADO, C. M. M. (Ed. Técnica). **Microrganismos na produção de biocombustíveis líquidos**. Brasília, DF: Embrapa, 2013.

PANDIYAN, K.*et al*. Technological interventions for utilization of crop residues and weedy biomass for second generation bio-ethanol production. **Renewable Energy**, v. 132, p. 723-741, 2019.

PAYNE, C.M.*et al*. Fungal cellulases. **Chemical Reviews**, v.115, p.1308-1448, 2015.

RABELO, S. C.*et al*. Production of bioethanol, methane and heat from sugarcane bagasse in a biorefinery concept. **Bioresource Technology**, v. 102, p. 7887-7895, 2011.

RAELE, R.*et al*. Scenarios for the second generation ethanol in Brazil. **Technological Forecasting & Social Change**, v. 87, p. 205-223, 2014.

RASMUSSEM, L.E.*et al*. Mode of action and properties of the b-xylosidase from *Talaromycesemersonni*and *Trichoderma reesei*. **Biotechnology Bioengineering**, v.94, p.869-876, 2006.

RASTOGI, M.; SHRIVASTAVA, S. Recent advances in second generation bioethanol production: An insight to pretreatment, saccharification and fermentation processes. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 80, p. 330-340, 2017.

ROBAK, K., BALCEREK, M. Review of Second Generation Bioethanol Production from Residual Biomass. **Food Technology and Biotechnology**, v. 56, p. 174-187, 2018.

ROCHA, G, J. M.*et al*. Dilute mixed-acid pretreatment of sugarcane bagasse for ethanol production. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, p. 663-670, 2011.

RODRIGUES, R. C. L. B. *et al*.Scale-up of diluted sulfuric acid hydrolysis for producing sugarcane bagasse hemicellulosic hydrolysate (SBHH). **Bioresource Technology**, v. 101, p. 1247-1253, 2010.

ROSA, S. E. S;. GARCIA, J. L. F. **O etanol de segunda geração: limites e oportunidades**. Revista do BNDES 31, dezembro 2009. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/7046. Acessoem: 13 abr. 2020

SAINI, J.K., SAINI, R., TEWARI, L. Lignocellulosic agriculture wastes as biomass feedstocks for second-generation bioe-thanol production: concepts and recent developments. **3Biotech**, v.5, p.337–353, 2015.

SANTOS, F. A.*et al*. Pré-tratamento hidrotérmico da palha de cana-de-açúcar visando à produção de etanol celulósico. **Química Nova**, v. 37, n. 1, p. 56-62, 2014.

SARKAR, N.*et al*. Bioethanol production from agricultural wastes: An overview. **Renewable Energy**, v 37, p. 19-27, 2012.

SHALLOM, D.; SHOHAM, Y. Microbial Hemicellulases. **Current Opinion in Microbiology**, v.6, p.219-228, 2003.

SHARMA, H.K., QIN, W., XU, C.C. Cellobiohydrolase (CBH) Activity Assays. **Methods in Molecular Biology**, p. 185-199, 2018.

SILVA, V. F. N. **Estudos de pré-tratamento e sacarificação enzimática de resíduos agroindustriais como etapas no processo de obtenção de etanol celulósico**. 2009 (Mestrado em Biotecnologia Industrial). Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2009.

SIMS, R. E. H.*et al*. An overview of second generation biofuel technologies. **Bioresource Technology**, v. 101, p. 1570-1580, 2010.

SOCCOL, C. R.*et al*. Bioethanol from lignocelluloses: Status and perspectives in Brazil. **Bioresource Technology**, v. 101, p. 4820-4825, 2010.

SUN, S.*et al*. The role of pretreatment in improving the enzymatic hydrolysis of lignocellulosic materials. **Bioresource Technology**, v. 199, p. 49-58, 2016.

SUN, Y.; CHENG, J. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. **BiouresourceTechonology**, v. 83, p. 1-11, 2002.

TAHERZADEH, M.; KARIMI, K. Pretreatment of Lignocellulosic Wastes to Improve Ethanol and Biogas Production: A Review. **International Journal of Molecular Sciences**, v 9, p. 1621-1651, 2008.

TRAVAINI, R.*et al*. Ozonolysis: An advantageous pretreatment for lignocellulosic biomass revisited. **Bioresource Technology**, v. 199, p. 2-12, 2016.

VASCONCELOS, S. M. *et al*.Diluted phosphoric acid pretreatment for production of fermentable sugars in a sugarcane-based biorefinery. **Bioresource Technology**, v. 135, p 46-52, 2013.

VOLYNETS, B.; DAHMAN, Y. Assessment ofpretreatmentsandenzymatichydrolysisofwheatstraw as a sugar source for bioprocessindustry. **International Journal of Energy and Evironment**, v. 2, n. 3, p. 427-446, 2011.

ZABED, H.*et al*. Bioethanol production from renewable sources: Current perspectives and technological progress. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 71, p. 475-501, 2017.

ZHANG, P.; LYND, R. L. Towardanaggregatedunderstandingofenzymatichydrolysisofcellulose: noncomplexedcellulase systems. **Biotechnology and Bioengineering,** v. 88, n. 7, p. 797-824, 2004.

ZHANG, T.; KUMAR, R.; WYMAN, C. E. Sugar yields from dilute oxalic acid pretreatment of maple wood compared to those with other dilute acids and hot water. **Carbohydrate Polymers**, v. 92, p. 334-344, 2013.

ZHAO, X.; CHENG, K.; LIU, D. Organosolv pretreatment of lignocellulosic biomass for enzymatic hydrolysis. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 82, v.5, p. 815-827, 2009.

ZHENG, J.; REHMANN, L. Extrusion Pretreatment of Lignocellulosic Biomass: A Review. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 15, p. 18967-18984, 2014.

ZHENG, Y.*et al.* Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production. **Progress in Energy and Combustion Science,** v. 42, p. 35-53, 2014.

ZU, S.*et al.* Pretreatment of corn stover for sugar production using dilute hydrochloric acid followed lime. **Bioresource Technology**, v. 152, p. 364-370, 2014.

CAPÍTULO VII

Operações unitárias para produção de açúcar

»*Erika Adriana de Santana Gomes*
»*Joelma Morais Ferreira*

7. INTRODUÇÃO

No Brasil, as usinas sucroalcooleiras assumem um relevante papel na economia do país, tanto pela geração de renda e empregos como na produção de produtos e subprodutos, a exemplo do açúcar, álcool e energia.

A indústria sucroalcooleira, assim como toda indústria, envolve etapas (físicas e/ou químicas) que têm como ponto de partida a matéria-prima (cana-de-açúcar). Em cada etapa vai-se agregando valores à matéria-prima até chegar ao produto final. A sequência e a combinação de cada etapa determinam a natureza e qualidade final do produto. O conjunto dessas ações executadas em etapas, que envolvem operações físicas e transformações químicas é chamado de processo unitário.

De acordo com Isenmann (2013), as sequências de transformações físicas necessárias à viabilização numa linha de produção industrial são chamadas de operações unitárias.

É fundamental para o (a) profissional de tecnologia compreender a natureza do processo e a linha de produção integral necessária para obtenção do produto, desde os aspectos microscópicos (propriedades físico-químicas da matéria envolvida, grandezas fenomenológicas, etc) até os macroscópicos (balanço de massa e de energia, detalhamento de equipamento e acessórios, instrumentação, etc).

É importante ressaltar que o dimensionamento das operações unitárias é a base para as técnicas e os equipamentos utilizados, além disso, determina os fluxos dentro da indústria. Toda operação unitária obedece a dois princípios fundamentais: as leis de conservação de massa e de energia (TADINI *et al*. 2018).

Durante o processo de "'fabricação de açúcar" um conjunto de operações unitárias são necessárias, as quais tem como objetivo extrair a maior quantidade de sacarose possível do caldo açucarado na forma de cristais uniformes e com especificações pré-estabelecidas, culminando nos vários tipos de açúcares conhecidos, como: demerara, mascavo, cristal, refinado, líquido, VHP, etc. Dentro desse processo de fabricação, podemos considerar uma usina de açúcar como uma indústria de extração, tendo em vista que o açúcarjá é produzido pela natureza, através da fotossíntese na cana de açúcar, sendo ele somente concentrado no processo, nas suas várias modalidades.

De acordo com COPERSUCAR (1993), para uma boa execução das operações dentro de uma indústria sucroalcooleira produtora de açúcar, é necessário o desenvolvimento de um trabalho em conjunto entre a lavoura e a indústria, de forma bem planejada nas etapas de corte, escolha de variedades adequadas com maiores teores de sacarose, e o processamento imediato, para evitar deterioração e perdas de açúcar.

Neste sentido, esse capítulo aborda de maneira clara e resumida as etapas do processo industrial de fabricação do açúcar, delineando suas operaçõesunitárias, ressaltando suas importâncias e objetivos, assim como também os equipamentos necessários durante a transformação da matéria-prima em produto final, haja vista que o processo de fabricação de açúcar é rico em operaçõesunitárias, o que levará a importância do conhecimento específico que um tecnólogo em produção sucroalcooleira deverá adquirir para sua atuação profissional.

8. MATÉRIA-PRIMA

A cana-de-açúcar, cultura dos primórdios da colonização brasileira, é a matéria-prima mais utilizada nas indústrias sucroalcooleiras do Brasil. É uma gramínea cultivada basicamente em duas regiões distintas do país: região norte-nordeste e centro-sul. A região nordeste apresenta características favoráveis como clima e solos férteis que colaboram para a expansão do cultivo (FIGUEIREDO, 2008).

Quando chegou no Brasil, a cultura da cana de açúcar obteve uma boa adaptação, culminando em um aumento crescente de seu cultivo em diferentes estados que possuem as exigências ambientais e de manejo (MENEGETTI, MEZAROBA E GROFF, 2010)

A produção de açúcar envolve processos de transformação do caldo de cana-de-açúcar em cristais, sendo influenciada pela qualidade da matéria-prima.

A composição da cana-de-açúcar varia de acordo com vários fatores, como: condições climáticas da região cultivada, tipo de solo, sistema de cultivo, estágio de maturação, condições de cultivo, entre outros fatores. Em geral, a cana-de-açúcar é constituída de fibra e caldo, ou seja, respectivamente, sólidos insolúveis e solúveis. E estes são constituídos por compostos orgânicos e inorgânicos, conforme demostrados na Figura 1, (SANTOS; BORÉM, 2016).

A qualidade da cana-de-açúcar como matéria-prima é uma das premissas a ser considerada para se obter o melhor desempenho para a indústria de açúcar. Dois fatores comprometem a qualidade da matéria-prima destinada à essa produção:

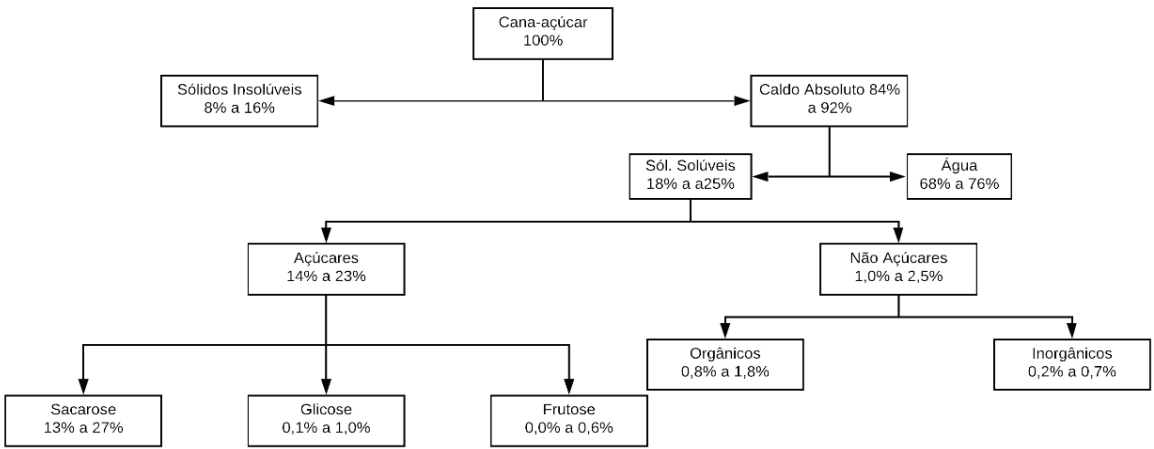
Fatores intrínsecos: são fatores afetados de acordo com a variedade da cana, variações do clima e do solo. São eles: estágio de maturação, teores de sacarose, açucares redutores, fibras, minerais dentre outros;

Fatores extrínsecos: são influenciados por parâmetros externos tais como teor de matéria estranha no colmo (terra, areia, restos de plantas) ou compostos produzidos por microrganismos devido à sua ação sobre os açúcares do colmo.

Para a garantia da qualidade dos produtos são seguidos os padrões de qualidade estabelecidos pelo Conselho de Produtores de Cana-de-açúcar, Açúcar e Etanol do Estado de São Paulo – CONSECANA, a qual segue as normas estabelecidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, direcionada à produção de produtos e subprodutos da cultura (CONSECANA, 2015).

Na Tabela 1 são apresentados os principais fatores na classificação da qualidade da matéria-prima para produção do açúcar.

Figura 1 – Composição da cana-de-açúcar



Fonte: adaptado de SANTOS; BORÉM, 2016

Tabela 1 - Principais fatores na classificação da qualidade da matéria-prima para produção do açúcar

Parâmetros	Definição	Aplicação
POL	Teor de sacarose aparente na cana	Para aindústria canavieira, quanto mais elevados os teores de sacarose, melhor.
Pureza	E´ determinada pela relaçã˜o (POL/Brix) x 100	Quanto maior a pureza da cana, melhor a qualidade da matéria-prima para se recuperar açúcar.
ATR(Açúcares Redutores Totais)	O ATR é´ determinado pela relaçã˜o POL/0,95 mais o teor de açúcares redutores	O ATR é´ determinado pela relaçã˜o POL/0,95 mais o teor de açúcares redutores
Açúcares redutores	E´ a quantidade de glicose e de frutose presentes na cana	Afetam diretamente a sua pureza, já´ que refletem em uma menor eficiência na recuperação da sacarose pela fábrica.
Porcentagem da fibra da cana	Reflete na eficiência da extraçã˜o da moenda	Quantomaisalta a fibra da cana, menor será a eficiência de extraçã˜o

FONTE: GALO (2013)

O controle de qualidade na unidade produtora é realizado através do setor de laboratório, o qual é responsável pelas análises e avaliação dos parâmetros da cana-de-açúcar, bem como dos seus produtos. Nesse contexto, são utilizados indicadores de qualidade, conforme descrito na Tabela 2, que possibilitam a verificação e controle do processo produtivo (SANTOS; BORÉM, 2016).

As operações que antecedem a entrada da matéria prima na indústria são classificadas como operações preliminares. Elas consistem na colheita da cana, carregamento, transporte, pesagem, pagamento da cana pela qualidade, descarregamento, armazenamento e lavagem. Tais operações devem constar de um programa de abastecimento sincronizado com as operações industriais para que não ocorra sobre abastecimento, o que provocará maior tempo de armazenamento com consequente queda da qualidade, ou falta de cana para a extração, ocasionando atrasos na produção.

Tabela 2 – Indicadores de qualidade da cana-de-açúcar

Indicadores de Qualidade	**ValoresRecomendados**
POL	>14
Pureza	>85%
ATR	>15%
AR	<0,8%
Fibra	11 a 13%
Tempo de queima/corte	<35h (corte manual)
Impureza mineral	<12kg/t cana
Contaminação	<5,0 x 105 bastonetes/mL no caldo

Teor de álcool no caldo	<0,6% ou<0,4% ˚Brix
Acidezsulfúrica	<0,80
Dextrana	<500 ppm/˚Brix
Amido	<500ppm/˚Brix
Broca	<1,0%
Palhiçonacana	<5,0%
Ácidoaconítico	<1.500ppm/˚Brix

Fonte: Adaptado de SANTOS; BORÉM, 2016

A cana-de-açúcar, ao chegar na unidade industrial, deverá ser processada o mais rápido possível, tendo em vista que essa matéria-prima está sujeita a contaminação e consequentemente a fácil deterioração. É necessário que todos os equipamentos sejam mantidos sempre limpos e em bom estado de conservação, uma vez que por eles passam toda a matéria-prima e esta, como vimos anteriormente, recebe etapas de preparos e exposições da sacarose. A garantia deste sincronismo é de extrema complexidade, pois muitas vezes as paradas nãosão programadas pela manutenção preditiva, ocorrendo quebras ocasionais de equipamentos, obrigando todo um rearranjo do planejamento de abastecimento para minimizar o tempo de armazenamento.

Para manter a sacarose livre de microrganismos é essencial manter uma assepsia contínua e eficaz, evitando assim o contato das moléculas de sacarose com os microrganismos que a destroem, transformando-a em outros açúcares não cristalizáveis. Os cuidados para evitar a proliferação de contaminações bacterianas são de

fundamental importância para a conservação e obtenção da sacarose disponível na matéria-prima.

No setor sucroalcooleiro, um dos fatores causadores de perdas de açúcares são as deteriorações causadas pelo tempo entre a queima e o processamento da cana-de-açúcar na indústria. As principais perdas se dão pela formação de dextrana e formação de açúcares redutores, diminuindo assim a quantidade de açúcares recuperáveis (ALBUQUERQUE, 2011).

Segundo Albuquerque (2011), as deteriorações podem ser causadas por processos enzimáticos, químicos e microbiano. Entre o tempo de queima e processamento da cana, os principais processos de deterioração são os enzimáticos e os microbianos. A bactéria do gênero *Leuconostoc* é a principal responsável pela deterioração microbiana, causando fermentação e perda de sacarose além de formação de dextrana. Já na deterioração enzimática, a enzima invertase, presente naturalmente na planta, é a principal responsável pela inversão de sacarose em glicose e frutose.

A deterioração química é dada através, principalmente, de fatores como: pH e temperatura. Estes causam a inversão da sacarose, quando pH for ácido e a temperatura for muito elevada, ou ainda a destruição dos açúcares invertidos (glicose e frutose), quando o pH for alcalino (MANTELATTO, 2005)

A cana colhida é normalmente lavada na própria mesa de recepção da cana, para diminuir as impurezas que afetam negativamente o processamento da cana. Algumas usinas já utilizam o sistema de limpeza a seco, baseado em jatos de ar sobre a cana.

Da mesa de alimentação, a cana é transportada por esteiras até os equipamentos de preparo; normalmente existe um ou dois conjuntos de facas rotativas, que tem a finalidade de picar a cana (quando inteira) e/ou nivelar a camada de cana na esteira, facilitando o trabalho do desfibrador.

O desfibrador, composto de um rotor com martelos oscilantes e uma placa desfibradora, pulveriza a cana e abre as células que contêm os açúcares, facilitando o processo de extração (pelo menos 82% das células devem estar abertas para se conseguir uma boa eficiência de extração). Preparos ótimos são mais facilmente obtidos em desfibradores do que em picadores, há uma tendência geral de desfibrar mais e picar menos (REIN, 2013)

Na saída do desfibrador, a altura do colchão de cana é uniformizada por equipamento denominado espalhador, localizado na descarga da esteira metálica, para uma esteira de borracha de alta velocidade e que alimenta a calha de alimentação forçada da moenda (chute Donnely); dentro desta calha, a cana desfibrada forma uma coluna com maior densidade, aumentando a alimentação e capacidade da moenda. O nível da cana dentro da calha é utilizado para controlar o fluxo de cana para a moenda.

9. EXTRAÇÃO DO CALDO

A logística de integração da parte agrícola com a parte industrial ou a logística de integração campo/usinas contribui bastante para a redução dos custos de produção e para o aumento da competitividade daí decorrente.

A unidade de extração é a primeira etapa de processamento do caldo e tem grande influência na sua característica assim como na condução do processo e na eficiência industrial.

A extração dos açúcares contidos na cana, consiste em um tipo de operação unitária de separação e pode ser feita por dois processos: moagem e difusão. Tradicionalmente, no Brasil, a extração do caldo da cana-de-açúcar é realizada por moagem, principalmente na região nordeste.

O objetivo da moagem é separar o caldo contendo sacarose do restante da cana (REIN, 2013). A moagem da cana de açúcar acontece em equipamentos denominados de moendas.

Nas moendas, a cana intensamente picada e desfibrada é espremida sob altas pressões (aproximadamente 250 kg/cm^2) entre sucessivos ternos montados numa estrutura denominada de castelos e projetados para extrair o máximo de caldo possível. Cada um dos ternos é formado por três cilindros principais denominados cilindro de entrada, cilindro superior e cilindro de saída. Ainda é comum encontrar moendas com um quarto rolo, denominado de rolo de pressão, que melhora a eficiência de alimentação. A carga que atua na camada de bagaço é transmitida por um sistema hidráulico que atua no rolo superior. Com o aumento da capacidade de moagem advindo do preparo da cana, é necessária a instalação do rolo de pressão, cuja finalidade é manter constante o fluxo de alimentação da moenda.

A moenda, normalmente formada por quatro a sete ternos em série, deve extrair o caldo assim como também produzir bagaço, no

final do processo, com um grau de umidade média (50 %) que permita sua utilização como combustível nas caldeiras (OLIVEIRA, 2014).

Sabemos que a moagem visa a máxima remoção da sacarose contido na cana, através da extração do seu caldo. Na primeira unidade acontece a maior parte da extração geral, simplesmente pelo deslocamento do caldo provocado pelo esmagamento. Após a primeira unidade, observa-se que o simples esmagamento não é suficiente para se obter bons níveis de extração, ficando mais difícil extrair o caldo remanescente. Neste sentido, com a finalidade de aumentar a eficiência de extração, efetua-se a embebição do bagaço entre os ternos de moenda.

Denomina-se embebição a adição de água ou caldo diluído ao bagaço entre uma moenda e outra, com o objetivo de se conseguir uma maior extração de sacarose (HUGOT, 1977). A água atua como diluente do caldo preso àscélulas da cana. Pela compressão, é possível tirar assim, um pouco mais de açúcares ou de sólidossolúveis retidos nas células do bagaço. A embebição pode ser simples, composta e com recirculação, sendo o tipo composta o mais usado. Neste caso, água é injetada na camada de cana entre os dois últimos ternos e o caldo de cada terno é injetado antes do terno anterior até o segundo terno. Normalmente, o caldo extraído no primeiro terno é enviado para a fábrica de açúcar (por ser de melhor qualidade).

Castro e Andrade (2006) afirmam que uma embebição eficiente vai depender de alguns fatores importantes, são eles: i) grau de desintegração do bagaço; ii) proporção e estrutura da fibra do bagaço; iii) tempo de contato da água ou do caldo diluído com o bagaço; iv) quantidade de água ou caldo diluído aplicado sobre o

bagaço e; v) temperatura e pureza da água e do caldo diluído aplicado sobre o bagaço.

Na prática a extração em moendas aumenta rapidamente com taxas de embebição acima do mínimo de 250-280% sobre a fibra (REIN, 2013)

A eficiência do processo de embebição pode ser encontrada a partir da Equação 1 (REIN, 2013):

- $$Efic\ Emb = \frac{Brix\ do\ caldo\ extraído}{Brix\ do\ caldo\ residual} x100 \qquad (1)$$

Por outro lado, a eficiência de um terno de moenda pode ser medida em função de dois parâmetros: capacidade e eficiência de extração.

Entende-se por capacidade de um terno de moagem a quantidade de cana moída por unidade de tempo. Já o termo eficiência de extração refere-se à quantidade de sacarose extraída da cana pelas moendas.

Alguns fatores que afetam a capacidade de moagem são:

- preparo da cana;
- eficiência de alimentação da moenda;
- tamanho e tipo dos cilindros da moenda;
- regulagem da bagaceira.

A eficiência da extração ou porcentagem de sacarose extraída da cana é determinada através da Equação 2.

- $E\ (\%) = \frac{Msac\ do\ Caldo\ Extraído}{Msac\ da\ Cana}\ x\ 100$ (2)

Onde:

- *Msac do Caldo Extraído*: é a vazão mássica de sacarose do caldo

- *Msac*: é a vazão mássica de sacarose da cana.

A eficiência de extração de açúcares varia de 94,0 % a 97,5 % e a umidade final do bagaço é em torno de 50 % (NOVACANA, 2020).

Para o bom desempenho dos conjuntos de moendas é de fundamental importância o trabalho realizado pelo 1º terno, pois deste dependerá em grande parte o desempenho da extração, capacidade de moagem e uniformidade do processo.

3.2 Tratamento do caldo

O caldo extraído da cana de açúcar durante o processo de moagem não apresenta características físico-químicas que permitem a produção de um açúcar dentro das exigências de órgãos governamentais e especificações dos compradores. É um líquido de cor amarela pandacenta a esverdeado, viscoso, opaco, pH entre 4,3 a 5,6 e de composiçãoquímica bastante complexa e variável (PAYNE, 1989). Possui diversos componentes em todos os graus de dispersões, afetando diretamente na coloração, má formação dos cristais e qualidade do açúcar produzido.

As impurezas do caldo são classificadas como impurezas em suspensão (terra, bagacilho, areia) e impurezas solúveis (corantes, ceras, proteínas, sais minerais). A diferença na composição do caldo da cana-de-açúcar é um dos fatores que afetam as diversas operaçõesunitárias do processo de fabricação do açúcar. Diante disso, é primordial que o caldo extraído seja submetido a alguns tratamentos a fim de eliminar totalmente ou parcialmente todos os compostos indesejáveis. Lembrando que alguns parâmetros como variedade da cana, grau de maturidade, tipo de colheita e tempo entre corte e processamento influenciam na formação do perfil do caldo.

De acordo com Hamerski (2009), a purificação do caldo de cana é um dos processos unitários mais decisivos das usinas açucareiras, tendo em vista que a qualidade da clarificação influencia na filtração do caldo, no cálculo do coeficiente de transferência de calor no evaporador, na cristalização da sacarose e a na qualidade e quantidade do açúcar produzido, além de também afetar a cor e a morfologia dos cristais.

Para purificação do caldo são utilizados tratamentos do tipo físico, químico e térmico.

Os tratamentos físicos são as operações preliminares para eliminação das impurezas em suspensão do caldo. É a separação puramente física, sem adição de produtos químicos. Dentro destas operações está o uso de peneiras e hidrociclones. Aproximadamente 75 a 90 % do bagacilho é removido no peneiramento, e esta quantidade de bagacilho no caldo peneirado depende da dimensão da abertura em relação ao tamanho das partículas na alimentação (REIN, 2013).

Mesmo após o tratamento físico, o caldo ainda contém impurezas na forma de compostos solúveis, coloidais e insolúveis em suspensão que devem ser removidos.

Após a etapa de tratamento físico inicia-se a etapa de clarificação do caldo com o tratamento químico através da adição de agentes químicos. O tratamento químico ou processo de clarificação do caldo visa separar a maior quantidade de impurezas dissolvidas e em suspensão, sem afetar a sacarose. Desta forma, corrige-se o pH do caldo para valores próximos da neutralidade, a um nível onde as perdas de sacarose por inversão sejam mínimas, produzindo um caldo límpido e cristalino.

De forma mais ampla, os propósitos da clarificação podem ser definidos como máxima eliminação de não açúcares e de colóides, caldo clarificado com baixa turbidez, mínima formação de cor e pH do caldo adequado de modo a evitar inversão da sacarose (decomposição dos açúcares redutores).

Em escala industrial e em maior proporção, o Brasil produz dois tipos de açúcar: o cristal branco e o açúcar bruto (VHP e VVHP - matéria-prima das refinarias). Fundamentalmente, os processos de clarificação adotados nas usinas brasileiras compreendem a sulfitação e a defecação (calagem), para a obtenção do açúcar cristal branco e açúcar bruto, respectivamente.

3.2.1 SULFITAÇÃO

Em geral, o caldo peneirado é enviado para o processo de sulfitação, que representa o principal processo de clarificação do caldo

de cana empregado nas usinas brasileiras para produção de açúcar cristal branco. A sufitação consiste, basicamente, na adição de dióxido de enxofre gasoso (SO_2) ao caldo misto, pré-aquecido a temperatura de 60°C (tratamento térmico), até atingir o valor de pH entre 3,8 e 4,2 e posterior alcalinização com leite de cal até pH 7,2-8,2 (HAMERSKI, 2009). O consumo de enxofre varia principalmente em função do açúcar a ser produzido e da qualidade da matéria-prima, tendo variado entre 100 e 200 g/saco, apresentando com média 150 g/saco.

O processo de sulfitação nas usinas de açúcar consiste na geração de gás e sua absorção pelo caldo de cana. A queima é realizada por forno rotativo seguido de uma caixa de término da combustão e de sublimação do enxofre não queimado. Os gases são, então, resfriados e encaminhados para o dispositivo de absorção (LOPES, 2011).

O dióxido de enxofre tem propriedade descorante, em razão do seu caráter redutor, preservativa, evitando o desenvolvimento de microorganismos prejudiciais ao processo, e também reduz a viscosidade, por precipitar certos colóides, melhorando a decantação e a qualidade do caldo para evaporação e cozimento, produzindo dessa forma méis mais esgotados (PAYNE, 1989).

Alguns aspectos e irregularidades têm limitado o uso do processo de sufitação, no Brasil e em países produtores de açúcar branco. O dióxido de enxofre é uma substância muito tóxica e tem proporcionado vários danos ao ser humano e ao meio ambiente, por ser cancerígeno, muito poluente, provocador de chuvas ácidas, destruidor da camada de ozônio e altamente corrosivo. No entanto, a necessidade de produzir um açúcar de boa qualidade e livre de resíduostóxicos vem incentivando as empresas do setor

sucroalcooleiro a buscarem alternativas que sejam viáveis do ponto de vista técnico, para substituir este produto no processo produtivo. O ozônio e os bicarbonatos estão dentre as alternativas tecnicamente viáveis à substituição do enxofre no processo de clarificação, com intuito de minimizar os resíduos e emissões (SILVA *et al*., 2009)

A ozonização é uma técnica que proporciona uma eficiência satisfatória, com um potencial alternativo para a descoloração, resultando um caldo de pouca cor. O processo de branqueamento do açúcar por utilização do ozônio pode minimizar as perdas de sacarose por inversão e evitar problemas de ordem ambiental e alimentar decorrentes do processo tradicional de clarificação do caldo com o uso do enxofre. Além disso, o uso da ozonização poderá levar a uma redução dos problemas de corrosão nos equipamentos, possibilitando um maior tempo de vida útil e redução dos custos de manutenção.

A bicarbonatação, que tem como agente principal de clarificação o bicarbonato de cálcio, segue condições técnicas favoráveis ao seu emprego como outro processo alternativo, para clarificação do caldo de cana. Este processo consiste em adicionar leite de cal e gáscarbônico (CO_2) ao caldo de cana, sob condições controladas, formando um precipitado cristalino o carbonato de cálcio. Este, por sua vez, adsorve e incorpora grande parte da matéria coloidal e insolúvel, os nãoaçúcaresinorgânicos e as substâncias que conferem cor ao caldo. O açúcar a ser produzido com este processo apresentará ausência de sulfitos, atendendo às exigências do mercado internacional e das normas de segurança alimentar.

3.2.2 CALAGEM, CALEAGEM OU DEFECAÇÃO

A calagem, usada na obtenção do açúcar cristal bruto ou demerara, é um processo considerado mais antigo para clarificação do caldo de cana-de-açúcar. Consiste na adição, ao caldo extraído, do leite de cal – solução de hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) obtida pela hidratação da cal virgem (CaO) em água, no intuito de neutralizar os ácidos orgânicos presentes no caldo. O processo de calagem tem como objetivos a correção do pH do caldo e promover a floculação de coloides e o consequente agrupamento do material em suspensão. Geralmente são adicionados de 500 a 800 gramas de cal por tonelada de cana, de modo que o pH caldo fique ajustado entre 7,2 a 8,3. Em seguida, o caldo caleado é aquecido a 90-105ºC (tratamento térmico). A presença de $Ca(OH)_2$, acompanhada da elevação da temperatura, conduz a formação de um precipitado que tanto adsorve como também arrasta boa parte do material suspenso no caldo, o qual será separado por decantação (FONSECA, 2017).

A adição de leite de cal é feita em tanque de caleagem, sob agitação. A quantidade de leite de cal a ser adicionada ao caldo de cana varia de acordo com alguns fatores como: sistema de clarificação adotado, qualidade da cal e do caldo, tipo de açúcar a ser fabricado, etc.

De acordo com HUGOT (1977), a qualidade da cal utilizada é um fator importante. Uma boa cal deve possuir dosagem de 90 a 95% de CaO.

Os métodos de calagem mais empregados são:

I. Calagem fria – Na calagem fria, o caldo proveniente da extração que apresenta o pH próximo a 5,6 recebe o leite

de cal até atingir um pH entre 7,2 e algumas vezes próximo de 8,3. Em seguida, é enviado para aos aquecedores a uma temperatura entre 103 a 105˚C. A calagem fria é suficiente para produção de açúcar demerara (HUGOT ,1977).

II. Calagem quente – Para se obter uma clarificação melhor, muitas vezes, o caldo bruto extraído das moendas é enviado primeiramente para os aquecedores (70 °C), efetuando a seguir a calagem que é levada ao ajuste do pH 7,2 e continuando depois o aquecimento até 103 ˚C. A calagem quente exige 15 a 20 % a menos de cal, obtendo-se um resultado satisfatório (HUGOT ,1977).

O tratamento térmico (aquecimento) baseia-se em elevar a temperatura do caldo por volta de 103-105 ˚C, a fim de que a floculação dos seus coloides se processe com maior rapidez, dada pelo aumento do movimento browniano das partículas coloidais, e eficiência, uma vez que o calor é fator complementar da operação de clarificação do caldo, após o tratamento químico. O processo de aquecimento é realizado em aquecedores horizontais ou verticais, que são formados por uma calândria tubular, onde o caldo circula nestes tubos e o vapor em volta. Os cabeçais possuem paredes que obrigam o caldo a passar um certo número de vezes de cima para baixo e de baixo para cima, seguindo em cada vez por uma parte diferente dos tubos da calândria, garantindo a troca de calor com o vapor em contra-corrente

O aquecimento proporciona a redução da viscosidade e densidade do caldo e acelera a velocidade das reaçõesquímicas, agrupando as impurezas na forma de pequenos "flocos ". Os sais formados sãoinsolúveis a altas temperaturas, possibilitando a sua decantação.

3.2.3 DECANTAÇÃO

Após o caldo ter recebido o tratamento apropriado é necessário separar o caldo clarificado do precipitado oriundo do tratamento químico. A decantação conclui a etapa de purificação do caldo, na qual são removidas as impurezas floculadas nos tratamentos anteriores, auxiliada pela adição de agentes floculantes.

O caldo tratado e aquecido (103-105˚C) é enviado sob pressão ao decantador passando antes pelo balão de "flash". No balão de "flash" ocorrerá uma expansão à pressãoatmosférica, o qual provoca a liberação de um fluxo de vapor juntamente com o ar presente no caldo. Em outras palavras, o caldo perde velocidade e sofre uma auto-ebulição (RIBEIRO; BLUMER; HORII, 1999). Em seguida, o caldo flui lentamente para o decantador, entrando através de uma tubulação, na câmara de coagulação. De acordo com REIN (2013), a dosagem do floculante diluído precisa ser realizada imediatamente após o balão de flash assim como também a temperatura necessita ser verificada, para garantir que o ar e os gases dissolvidos tenham sido removidos. Isso requer aproximadamente 3˚C acima da temperatura de ebulição do caldo que está entrando no tanque de flash (103˚C).

No decantador ocorre a separação do caldo clarificado e do precipitado formado em sua massa por diferença de densidade. Os tipos de decantadores mais utilizados são os divididos internamente em vários compartimentos cuja finalidade é de multiplicar a superfície de decantação. São tanques grandes e cilíndricos dotados de um eixo central girando lentamente e raspadores metálicos que lentamente escovam o fundo de cada compartimento. O caldo a ser decantado

chega tangencialmente à parte superior, num compartimento cujo diâmetro é a metade do diâmetro do tanque (HUGOT, 1977).

As impurezas de maior densidade depositam-se sobre as bandejas, sendo retiradas pelos raspadores, que giram de 10 a 12 rph. As borras, que tem maior densidade que o caldo, descem pelo espaço central existente entre as bandejas, até a câmara de borras.

Durante o processo de decantação há dois tempos de residência a considerar, o do caldo clarificado (volume de trabalho acima da interface lodo-caldo, dividido pela vazão de caldo clarificado na saída) e do lodo espessado (o volume de trabalho abaixo da interface lodo caldo, dividido pela vazão do lodo de saída) (REIN, 2013).

O tempo de residência do caldo clarificado (tcd) é dado pela Equação 3.

- $tcd = \left(\frac{vcd}{Qcd}\right)$ (3)

Onde:

- vcd = fração do volume de trabalho acima da interface do lodo-caldo;
- Qcd = vazão volumétrica de caldo clarificado.

Na Equação 4 temos a expressão referente ao tempo de residência do lodo espessado (tls).

- $tsl = V\left(\frac{vld}{Qld}\right)$ (4)

Onde:

- V = volume de trabalho total do clarificador;
- vld = fração do volume de trabalho abaixo da interface do lodo-caldo
- Qld = vazão volumétrica de lodo sedimentado.

O tempo de residência do caldo no decantador varia de 15 minutos a 4 horas, em função do tipo de equipamento. Se este tempo for muito curto, a decantaçãoserá incompleta, com produção de caldo turvo, prejudicial para a produção de açúcar. No caso do tempo de retenção ser muito longo ocorrerão perdas de açúcar e aumento na coloração.

Se a carga nas partículas presentes no caldo for considerada desprezível (decantação livre) então a velocidade de decantação (Vd) é dada pela lei de Stokes (Equação 5).

- $V_d = \frac{g(\rho P - \rho L)dp^2}{18.\mu}$ (5)

Onde:

- $\rho P = densidadedas\ partículas\ sólidas\ em\ kg/m3$;

- $\rho L = densidade$ do caldo em kg/m^3;
- V_d = velocidade de decantação em m/s; d
- $p = diâmetro\ da\ partícula\ em\ m$;
- μ = viscosidade do caldo em Pa.s;
- g = aceleração gravitacional.

A velocidade de decantação do caldo é, em média, de 7 cm/min até que a concentração do lodo, na parte inferior, se tenha aproximado ao máximo. Logo neste instante, observa-se um decréscimo da velocidade de decantação até aproximadamente zero (HUGOT, 1977)

A capacidade do decantador dependerá de sua área, do teor de impurezas do caldo, da qualidade dos tratamentos de sulfo-defecação e do uso de auxiliares de clarificação. A capacidade não depende de sua profundidade: um decantador duas vezes mais alto conterá duas vezes mais caldo, mas levará também duas vezes mais tempo para decantar.

O trabalho eficiente dos decantadores dependerá fundamentalmente de um bom controle dos seguintes itens: pH do caldo após a calagem, temperatura do caldo, vazão de caldo

uniforme, remoção de gases incondensáveis (balão de flash) e da adição de polímero.

As impurezas sedimentadas constituem o lodo, que sofre adição de bagacilho e é destinado aos filtros rotativos, que objetivam recuperar o açúcar contido no lodo. O material retido no filtro, denominado torta, é enviado à lavoura. Um sistema de filtração é considerado eficiente quando a perda de açúcar na torta é menor que 1% e o caldo filtrado apresenta baixa turbidez.

3.4 Evaporação do Caldo da Cana

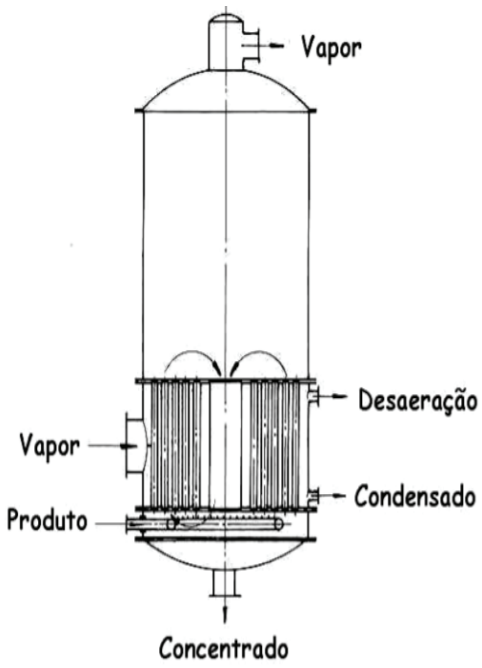
A evaporação consiste na concentração do caldo de cana mediante a eliminação de água em forma de vapor, sendo, portanto, uma operação unitária importante na usina, pois determina a eficiência energética.

Segundo Castro e Andrade (2006), a evaporação consiste na eliminação do excesso de água, por vaporização, usando o vapor d'água, como fluído de aquecimento, a fim de obter uma solução com a concentração desejada.

O vapor eliminado pelo sistema de evaporação é denominado vapor vegetal e o vapor proveniente da caldeira é o vapor vivo ou servido.

O evaporador é constituído por corpo e calandra a qual contém espelhos que sustenta o feixe tubular (Figura 3)

Figura 3 - Evaporador tubular

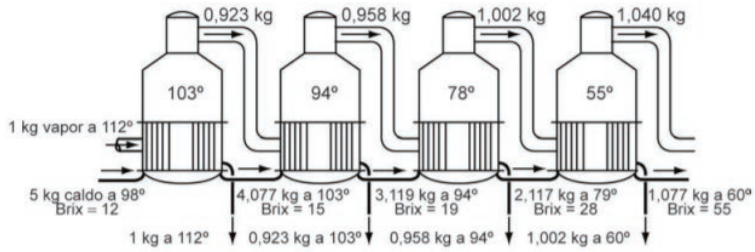


Fonte: Adaptado de HUGOT (1977)

No funcionamento do evaporador, o vapor vivo entra na calandra, cedendo calor latente de condensação e aquecendo o caldo que passa por dentro do feixe tubular. Portanto, o caldo evapora água em forma de vapor vegetal e o vapor vivo sai em forma de condensado. O caldo aquecido ascende as paredes dos tubos e escoa pelo tubo central do evaporador. O caldo deve ocupar 1/3 da altura dos tubos para favorecer a transferência de calor durante a ascensão da película em ebulição, que escoa como um filme laminar na superfície dos tubos da calandra (HUGOT, 1977).

O sistema de evaporação, utilizado pelas usinas para concentrar o caldo da cana, consiste em uma sequência de evaporadores denominada de múltiplos efeitos (Figura 4). A viabilização do funcionamento desse sistema está condicionada a redução de temperaturas e pressões nos efeitos que ocorrem de forma decrescente, decorrente da atuação do sistema de vácuo, localizado no último efeito.

Figura 4 – Sistema de evaporação de múltiplos efeitos



Fonte: HUGOT, 1977

A evaporação de múltiplo efeito foi desenvolvida por *Norbert Rillieux* na Louisiana e patenteada nos anos 1840. Ela tem tido consequências vantajosas para a indústria do açúcar e muitas outras indústrias de processo. Em decorrência dos seus estudos foram elaborados três princípios para o projeto e performance de evaporadores (REIN, 2013).

O primeiro princípio de *Riilieux* para o funcionamento de evaporadores em múltiplo-efeitos, determina que cada quilograma de vapor, usado no primeiro vaso, evaporará tantos quilogramas de água quantos forem os números de efeitos, ou seja, os vapores conseguem ser reaproveitados no aquecimento dos próximos efeitos de proporcionalmente.

O segundo princípio de *Rillieux* é relacionado com a economia do vapor causado pelo aproveitamento do vapor vegetal no aquecimento do efeito seguinte.

O terceiro princípio de *Rillieux* determina que os gases incondensáveis devem ser removidos do vapor condensado, visando a otimização da transferência de calor no processo.

Nas usinas mais modernas encontram-se caixas de evaporação do tipo "Robert" com projetos otimizados onde há execução de sangrias de vapor vegetal nas três primeiras caixas do quadruplo ou quíntuplo efeito. São utilizadas limpeza manual ou química, apresentam taxa de evaporação mais elevadas (30-40kg de vapor/ m^2) e o xarope na saída do sistema apresenta concentração mais próximas dos valores recomendados pela literatura (55 a 65 ˚Brix).

No múltiplo-efeito, quando a primeira caixa de evaporação é alimentada com vapor vivo em excesso, com relação ao efeito

seguinte, se faz a retirada desse excesso para abastecer outras etapas do processo e esse desvio é denominado de sangria. O vapor vegetal pode ser utilizado para o aquecimento do caldo, cozimento das massas, refinaria e na destilaria. Uma alternativa é quando a usina possui instalada, antes do múltiplo-efeito, um ou mais pré-evaporadores que consistem em evaporadores com maiores dimensões que os demais efeitos, possibilitando a geração de vapor vegetal em excesso. Em um sistema de evaporação com sangrias do vapor vegetal, além do benefício do equilíbrio térmico, existirá a economia de água na coluna barométrica que condensará o vapor vegetal do último corpo.

O aquecimento do caldo caleado ou sulfo caleado, nos trocadores de calor deve atingir a temperatura entre 105 e 115 ˚C. Se a temperatura de alimentação no sistema de evaporação for inferior a 115 °C parte da superfície disponível no pré-evaporador será destinada, exclusivamente a aquecer o caldo até 115 °C e posteriormente evaporar, reduzindo a eficiência do processo.

O caldo de cana proveniente dos trocadores de calor chega ao sistema de evaporação em múltiplo efeitos com 16 a 18 ˚Brix, elimina aproximadamente 70% da água em forma de vapor e atinge 65 a 70 ˚Brix, isso para garantir que não ocorrerá a cristalização da sacarose (cerca de 72 ˚Brix) e a evaporação seja inviabilizada por obstrução do feixe tubular (PAYNE, 1989).

Segundo HUGOT (1977), as incrustações são provenientes de matérias em suspensão no caldo devido a deficiências nos processos de decantação e filtração que se depositam principalmente no primeiro efeito; não açúcares em solução que se tornam insolúveis à medida que o caldo se concentra.

Durante o trabalho da evaporação os tubos do múltiplo efeitos acumulam sujeiras, denominadas incrustações, as quais são decorrentes da composição da cana processada, que por sua vez é afetada pelo solo, fatores climáticos e os valores do pH do caldo. É evidente que o cálcio, oriundo da clarificação do caldo, é o principal ingrediente na incrustação. Geralmente a incrustação nos efeitos iniciais consiste de cálcio e fosfato, sendo um pouco mais mole do que a incrustação nos efeitos finais que é caracterizada por concentração muito maior de sílica, sendo mais dura e mais difícil de remover (REIN, 2013).

Em média, podem-se calcular de 200 a 800g de incrustações, consideradas em matéria seca por m^2 de superfície de aquecimento; aproximadamente 50g/ m^2 ou 10 a 50g/TC (HUGOT, 1977).

Durante a operação dos evaporadores ocorre a formação de incrustações no interior dos tubos, causadas pela deposição de material dissolvido presente no caldo, que se insolubiliza pelo aumento da concentração. As incrustações formam uma capa sobre o tubo, que vai se espessando à medida que o novo material vai se depositando. O material depositado apresenta vários graus de dureza, podendo chegar a ter a consistência de uma rocha (LOPES, 2011).

O processo de limpeza dos tubos pode ocorrer das seguintes formas:

- *Mecânica:* são utilizados raspadores denominadosrasquete e chicotes flexíveis;
- *Química*: são aplicadas soluções de HCl e NaOH de 1 a 2% por 2 a 5h, realizando a lavagem eficiente em seguida;

- *Biológica*: aplica-se uma solução diluída de melaço de 15 a 20° Brix até cobrir o espelho, aguarda-se a fermentação por 15 a 20 dias, realizando-se a lavagem eficiente em seguida (CASTRO; ANDRADE, 2010).

Segundo REIN (2013), na limpeza química a soda cáustica é o produto químico mais comumente usado, ou uma mistura de soda cáustica e carbonato de sódio. Em alguns casos, nos efeitos iniciais, ela pode ser usada sozinha em concentração maior que 20 g/100 g solução, podendo ser reduzida se um agente molhante for adicionado. Têm sido relatadas soluções de soda cáustica com concentrações entre 10 e 40 g/100 g de solução. Frequentemente a limpeza com soda precisa ser seguida de uma limpeza ácida.O sistema precisa ser enxaguado cuidadosamenteou uma alta proporção de ácido será consumida na neutralização do álcali residual.

No dimensionamento do sistema de evaporação as vazões mássicas são determinadas por balanço de massa total (Equação 6), associada ao primeiro princípio de *Rillieux*, as composições mássicas (x) são determinadas por balanços parciais (Equação 7). O balanço de energia (Equação 8) é relacionado com o princípio de conservação de energia (1ª Lei da Termodinâmica - Equação 9), para quantificar a energia térmica envolvida no processo. As entalpias das soluções de sacarose podem ser quantificadas pelo calor específico, enquanto as entalpias dos vapores são determinadas em função das condições termodinâmicas (temperatura ou pressão) disponibilizadas em tabelas.

- $F = V + L$ (6)
- $F.x_F = L.x_L$ (7)
- $F.h_F + V_0.h_{V0} = V.h_V + L.h_L + C_1.h_{c1}$ (8)
- $Q = U.A.\Delta T = F.h_F + V_0.h_{V0} = V.h_V + L.h_L + C_1.h_{c1}$ (9)

Onde:

- F = alimentação do caldo (kg/h);
- V = vapor vegetal (kg/h);
- L = caldo concentrado (kg/h);
- x_F= composição mássica da alimentação (%);
- x_L composição mássica do caldo concentrado (%);
- V_0= vapor vivo (kg/h);
- C_1 = vapor condensado (kg/h);

- h_F = entalpia da alimentação do caldo (kJ/kg);
- h_{V0} = entalpia do vapor vivo (kJ/kg);
- h_V = entalpia do vapor vegetal (kJ/kg);
- h_L = entalpia do caldo concentrado (kJ/kg);
- h_{C1} = entalpia do vapor condensado (kJ/kg).

Ainda na segunda metade do século XVIII, Lavoisier demonstrou que a matéria poderia ser transformada, mas nunca criada e nem destruída. Ele descobriu que, invariavelmente, a massa das substâncias que participam de uma reação química era igual à soma das massas dos produtos gerados nesta reação. Esta descoberta deu origem à conhecida lei da conservação da massa, que na indústria química foi abreviada para "balanço de massa" ou "balanço material". Um balanço de massa de um processo contínuo é a soma exata de todos os materiais que entram, saem, acumulam ou são transformados no decorrer de um dado intervalo de tempo de operação (BRASIL, 2004).

Ao final do processo de evaporação o vapor vegetal gerado é condensado, geralmente em condensadores direto, onde a água de resfriamento entra em contato com o vapor a ser condensado, esses

equipamentos são comuns em evaporadores e cozedores a vácuo. As principais vantagens da condensação de contato direto são baixo custo e a capacidade de alcançar uma diferença de temperatura menor entre os gases a serem condensados e a água de condensação, economizando água (REIN, 2013).

3.5 Flotação do xarope concentrado

A flotação é um processo de separação sólido-líquido e líquido-líquido onde os materiais em suspensão são aderidos a bolhas de ar (ou outro gás), tornando-os mais leves em que o meio em que se encontram. Os flocos formados tendem a flutuar na superfície do meio, de onde são removidos na forma de borra ou espuma. A flotação do xarope envolve as etapas principais de condicionamento, aeração, macrofloculação/separação de fases.

- *Condicionamento:* consiste no preparo das partículas presentes no meio para a flotação, através de um ou mais processos físico-químicos que tornam estas partículas hidrofóbicas, forçando a sua precipitação na forma de pequenos flocos de separação mais fácil. Para que a reação de precipitação seja bem conduzida é fundamental projetar, adequadamente, o ponto de adição de polímero, considerando a diluição e o tempo de reação, bem como a homogeneização necessária. Após o condicionamento, pode ser necessário uma etapa de aquecimento para acelerar as reações e reduzir a viscosidade do meio.

- *Aeração:* As microbolhas de ar adicionadas se unem às partículas a serem separas, tornando-as menos densas que o líquido e, portanto, propensas a flotarem. O tamanho das microbolhas é fundamental, pois bolhas muito grandes causam turbulências no meio, impedindo o contato destas com as partículas. No ideal as bolhas de ar e as partículas devem ter tamanhos semelhantes, variando entre 10 e 200 micra. Abaixo de 10 micra a flotação é muito lenta. Acima de 200 micra, as bolhas são grandes e causam turbulências no líquido, os flocos formados não flotam, ficando dispersos no meio.

- *Macrofloculação*: necessária para agrupar as partículas com as bolhas de ar, formando (macroflocos) de baixa densidade. O aumento do diâmetro da partícula pode ser obtido com adição de um agente floculante, que provoca aglomeração de várias partículas em um floco.

Nas usinas a qualidade do açúcar está diretamente ligada a eficiência na clarificação do xarope, mas a flotação não é um processo padrão. A falta de um tratamento eficaz no xarope traduz-se em um açúcar de menor qualidade, com a presença de cor maior, impurezas e pontos pretos.

Neste processo, matéria suspensa muito fina é aglomerada e forçada para a superfície por bolhas de ar pequenas. A separação por flotação não depende tanto da dimensão e da densidade relativa das partículas, sendo removidas, e sim, de suas propriedades de superfície. O processo pode ser consideravelmente melhorado através do uso de produtos químicos apropriados (REIN, 2013).

Testes com tratamento de água e refino de açúcar indicaram que flotação por ar dissolvido dá melhores resultados do que a aeração mais simples por flotação de ar disperso (SARANIN, 1972 *apud* REIN, 2013).

3.6 Cozimento

O cozimento é a operação unitária que visa o esgotamento máximo do xarope proveniente da evaporação. Usualmente esse processo é realizado em cozedores a vácuo em batelada, ou seja, um único efeito que trabalha de forma intermitente, produzindo uma massa cozida de uma solução super concentrada com 90 – 95° Brix. Para a máxima recuperação, esse processo não é realizado em um único estágio, sendo normalmente em dois ou três estágios. É indicado a utilização do sistema de duas massas só para xaropes de baixas purezas (Pz<82), em razão do menor consumo de vapor para valores aceitáveis de esgotamento (REIN, 2013).

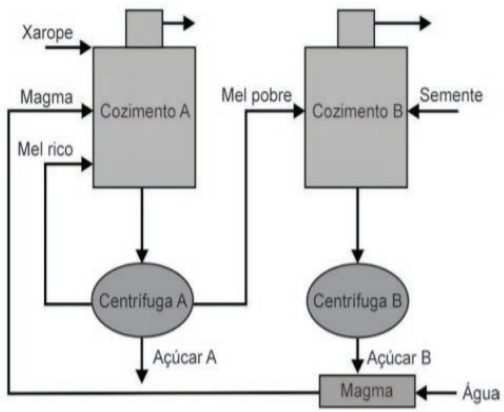
A principal vantagem do sistema de duas massas é que esse é mais simples em comparação do sistema de três massas, mas a capacidade de esgotamento é menor.

O processo de duas massas (Figura 5) é formado pelos cozimentos denominados A e C e acontece de modo que o cozimento C é alimentado por uma mistura dos méis provenientes do cozimento A e C, complementado com xarope. Ao final da operação produz o mel final e o açúcar C, esse por sua vez é misturado com água para se produzir o magma que serve como cristais base, denominado semente, para o crescimento dos cristais de açúcar A. A separação dos

cristais formados do mel ocorre em duas etapas: a primeira é retirado o excesso de mel sobre o cristais, gerando o mel pobre que segue para o próximo cozimento e em seguida é realizada uma lavagem com água, para reduzir o filme de mel e fornecer a Pol adequada ao açúcar produzido, sendo eliminado o mel rico o qual retorna para o cozedor de origem.

O cozimento A é alimentado por uma mistura entre xarope, magma e mel rico de A e essa mistura deve chegar a um grau de pureza entre 80-82 %, para que seja conseguido um máximo esgotamento num sistema de duas massas. No cozimento A é produzido o açúcar A e os méis rico e pobre de A. No sistema de duas massas o esperado é a produção de um mel final com uma pureza de 35% (REIN,2013).

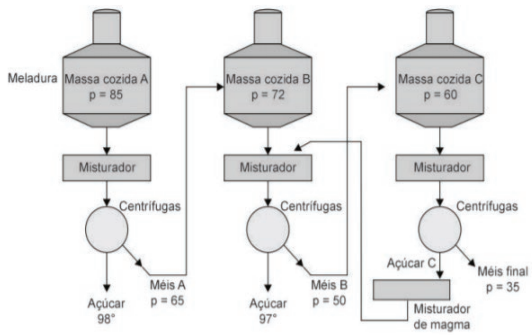
Figura 5 – Sistema de cozimento em duas e três massas, respectivamente



Fonte: LOPES, 2011

A Figura 6 ilustra um sistema de três massas onde a principal vantagem em comparação com o de duas é o esgotamento das massas com purezas maiores, logo, uma maior produção de açúcar. O processo de três massa acontece de modo que o cozimento C é alimentado por uma mistura entre mel A, B e xarope com uma pureza entre 60-70°Brix, produzindo o mel final e o açúcar C, que é misturado com água para se produzir o magma que serve de semente para o crescimento dos cristais de açúcar A e B. O sistema de cozimento em 3 massas é indicado para méis de pureza acima de 82°Z, pois consegue um maior esgotamento consequentemente uma maior produção de açúcar (REIN, 2013).

Figura 6 – Sistema de cozimento em duas e três massas, respectivamente



Fonte: LOPES, 2011

No cozedor a vácuo é realizada a concentração do xarope e mel, mantendo a temperatura entre 65° a 70°C. Quando a

supersaturação é atingida, se introduz a semente as quais se desenvolvem e essa supersaturação deve ser mantida através da alimentação de mel para que os cristais cresçam, proporcionando um cozimento de alta produtividade e cristais uniformes. As moléculas de sacarose na solução têm de migrar para o cristal e então serem incorporadas na sua estrutura. Se a concentração da solução aumentar muito haverá a formação espontânea de pequenos cristais, os quais atrapalham o crescimento ordenado dos cristais base e causam grandes problemas na drenagem durante a centrifugação.

Durante o processamento de cana-de-açúcar, os polissacarídeos (amido e dextrana) aumentam a viscosidade e diminuem ou inibem a cristalização, com aumento da perda de sacarose para o melaço. Devido à sua natureza e alta solubilidade, são difíceis de serem removidos do processo, dificultando a cristalização (GODSHALL *et al*., 1996 *apoud* ALVES, 2013).

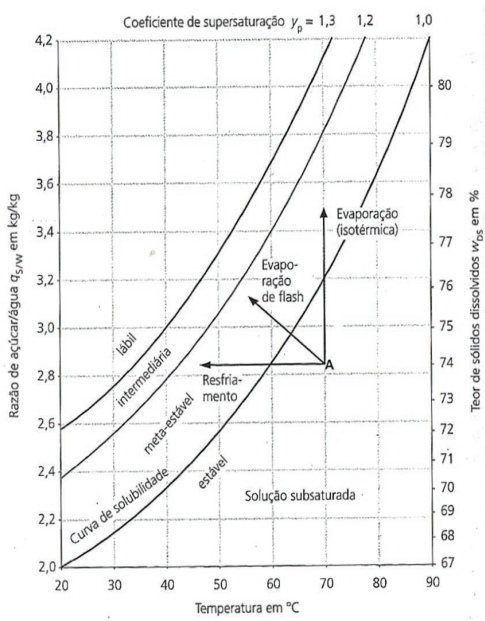
Johnson (1989) relatou que a presença de amido, independente da origem combinada ou não com altas concentrações de dextrana, exerce um efeito muito negativo no processamento do açúcar, podendo resultar em aumento sinérgico de problemas com a viscosidade. Esses efeitos podem ocorrer tanto em usinas como refinarias. A molécula de amido é insolúvel em temperatura baixa, mas quando atinge altas temperaturas (em torno de 60 ˚C) pode gelatinizar, resultando no inchaço dos cristais, que passam a ocupar maiores volumes.

Visando cristalizar a sacarose é necessário aumentar a concentração da solução acima da saturação e controlá-la operacionalmente na concentração correta, ressaltando que as soluções

encontradas no processamento de açúcar de cana são sempre impuras as quais afetam a solubilidade da sacarose (REIN, 2013).

A solubilidade de soluções pura de sacarose é mostrada na Figura 7, onde o teor de sólidos solúveis, a solubilidade da sacarose por 100 partes de água e a temperatura estão relacionados, elaborando zonas de saturação.

Figura 7- Solubilidade de sacarose pura em água em função da temperatura



Fonte: REIN, 2013

- *Zona Insaturado ou não saturada:* Não há formação espontânea dos cristais e os cristais adicionados se dissolvem;
- *Zona Metaestável:* Não há formação espontânea de cristais e as sementes adicionadas se desenvolvem uniformemente desde que sejam controladas: temperatura, pressão e adição de xarope;
- *Zona Lábil*: Há formação espontânea dos cristais e os existentes se desenvolvem rapidamente, interferindo na qualidade dos cristais formados.
- *Zona Insaturada*: Ocorre a dissolução dos cristais já formados, reduzindo o rendimento dos cristais produzidos.

Nas usinas de açúcar, o processo de cristalização é realizado pelo método de semeadura, que consiste na elevação da concentração da solução até a zona metaestável, quando se introduz no cozedor uma certa quantia de cristais de açúcar (sementes) que passarão a crescer até atingir o tamanho desejado. A quantidade de sementes a ser utilizada pode ser calculada considerando que todos os cristais inoculados se desenvolvem até o tamanho desejado e que a massa dos cristais é proporcional ao cubo de seu tamanho (LOPES, 2011).

Os cristais irregulares são classificados em:

- *Conglomerados:* são vários cristais que cresceram juntos como se fosse um só cristal, com vários ângulos e reentrâncias. Provocam a formação de cavidades com

forma geométrica indefinida, que propicia a aderência de cera, gomas e outras impurezas, as quais se tornam difíceis de serem eliminadas completamente durante a lavagem na centrifugação. Esses cristais têm uma superfície maior que os cristais normais. Após a formação dos conglomerados eles só desaparecem por dissolução.

- *Gêmeos:*consiste em dois cristais unidos em seus lados maiores. São formados quando a cristalização se faz por choque térmico ou espontaneamente ou quando as impurezas do caldo são provenientes de canas velhas.

- *Finos:* são cristais finos, alongados e menores que os normais. Operacionalmente são chamados poeira, em razão de sua aparência, quando observados nas amostras sobre a lâminas de vidro. Devido a lavagem, propicia a dissolução de mais açúcar e causam entupimento nos bicos da centrífuga (ALBUQUERQUE, 2011).

Os cristais finos se dissolvem, aumentando o volume e pureza do licor de lavagem, reduzindo a capacidade da recuperação, aumentando os custos de reprocesso e diminuindo o rendimento dos cristais. Os cristais individuais são relativamente livres de impurezas, constituindo a maior parte do açúcar, a qualidade do produto é relacionada pela quantidade de mel existente. Quanto maior a Pol do açúcar, menor quantidade de mel estará presente e, assim, a análise do açúcar como um todo se aproxima mais à dos cristais (PAYNE, 1989).

Os falsos cristais são formados quando outros já cresceram. Para evitar essa formação: manter constante o vácuo e a pressão do vapor, evitar entrada de ar por junta mal vedada, evitar a introdução de xarope ou mel frios e a evaporação muito rápida (ALBUQUERQUE, 2011).

Após o crescimento dos cristais nos cozedores a massa é descarregada nos cristalizadores, que atua como um tanque reserva da massa cristalizada a ser enviada para a separação na centrífuga.

3.7 Centrifugação

O produto da cristalização é uma suspensão de cristais de sacarose no mel, sendo necessário a separação dessas duas fases. Portanto, o objetivo da centrifugação é fazer a separação física dos cristais desenvolvidos na massa cozida, por meio de força centrífuga (processo físico). O bom desempenho das centrífugas de açúcar é conseguido quando a massa possui cristais com granulometria uniforme e °Brix adequado.

Basicamente, as centrífugas utilizadas no setor açucareiro são constituídas por um cesto cilíndrico com a parede perfurada, acoplado a um motor de velocidade variável, protegido por um cesto externo.

No processo de separação dos cristais são utilizadas centrífugas de acordo com o tipo de açúcar a ser produzido:

- *Centrífugas automáticas:* funciona em batelada, normalmente utilizadas para operar açúcar comercial, ou seja, a massa de primeira numa operação em duas massas e as massas de primeira e de segunda numa operação em três massas.

- *Centrífugas contínuas:* seu uso apresenta benefícios operacionais com relação a economia de tempo e de mão de obra. No entanto, as máquinas contínuas possuem certos problemas de difícil solução, que têm impedido sua plena adoção no caso de açúcares comerciais. Um dos principais problemas é a quebra de cristal pelo seu impacto na parede em alta rotação e a erosão que ocorre no trajeto dos cristais ao longo da tela até a saída (LOPES, 2011).

Após o processo de centrifugação, os méis rico e pobre retornam ao processo para serem devidamente esgotados e viabilizar economicamente o processo de esgotamento e os cristais de açúcar são encaminhados a secagem.

3.8 Secagem do açúcar

O açúcar que sai da centrífuga apresenta um teor elevado de umidade que prejudica a sua fluidez, tornando difícil a sua manipulação, além de tornar o produto susceptível de sofrer uma deterioração microbiológica. O açúcar úmido também apresenta uma grande tendência a empedrar e amarelar. Dessa forma, a operação de secagem consiste num abaixamento da umidade do açúcar até um ponto que ela seja compatível com a estocagem, ou seja, a umidade inicial de 0,5 a 1% deve ser baixada a 0,1% ou menos, dependendo do tipo de açúcar (LOPES, 2011).

A secagem é uma das mais antigas e complexas operações unitárias e menos entendida, devido à dificuldade e deficiência da

descrição matemática dos fenômenos envolvidos de transferência simultânea de calor, massa e quantidade de movimento nos sólidos, baseado em extensiva observação experimental e operacional (MENON; MUJUMDAR, 1987).

Um sólido úmido é seco através da passagem de uma corrente de ar atmosférico aquecido pelo sólido úmido a uma temperatura e umidade fixas, por uma combinação de transferências de calor (para evaporar o líquido) e massa (para remover a umidade de dentro do sólido), reduz a quantidade de água presente no corpo-sólido (FOUST, 2008).

Na fabricação do açúcar, a secagem é a última operação unitária. Ela ocorre após a remoção do excesso de umidade dos cristais na centrifugação e está diretamente relacionada com a preservação da qualidade durante o armazenamento. Porém, nem sempre tem a devida atenção no processo produtivo do açúcar, podendo causar perdas na qualidade do produto final que vai para o mercado como o empedramento e formação de cor no seu armazenamento.

É importante considerar que a cana-de-açúcar é o principal fator para produção de um açúcar de qualidade, assim como as etapas antecedentes a secagem. A qualidade do açúcar não é estabelecida na etapa final do processo, a secagem apenas preserva as características e boa estabilidade do produto no armazenamento onde a umidade e temperatura tem papel importante.

A qualidade do produto seco, a quantidade de energia gasta e o tempo utilizado no processo de secagem são parâmetros primordiais para a rentabilidade do bem submetido a esta operação. Os fenômenos de transferência de calor, remoção de umidade e alterações de

dimensões, cor, sabor, resistência mecânica e outros, envolvidos em uma operação de secagem são complexos (PACHECO, 2010).

Na secagem, os cristais devem dispor de aporte calórico para evaporar a água contida na estrutura e promover migração da água para superfície. O que faz a umidade relativa nas superfícies dos cristais se tornarem maior que a umidade relativa do ar circunvizinho. Sendo assim, o fluxo de vapor de água ocorrerá da superfície dos cristais para o ar. Recebendo esse vapor, a temperatura do ar reduz, pois parte do calor do ar será utilizada para manter a massa de vapor em suspensão. O reumedecimento da massa de cristais deve-se ao fato de o ar circunvizinho apresentar umidade relativa maior que a umidade relativa sobre a superfície dos cristais. Nesse caso, o fluxo de vapor será do ar, causando a condensação. Durante o armazenamento os cristais podem absorver parte da água condensada, aumentando o seu teor de água e a atividade aquosa do ambiente, propiciando o desenvolvimento de fungos e bactérias (SILVA, 2013).

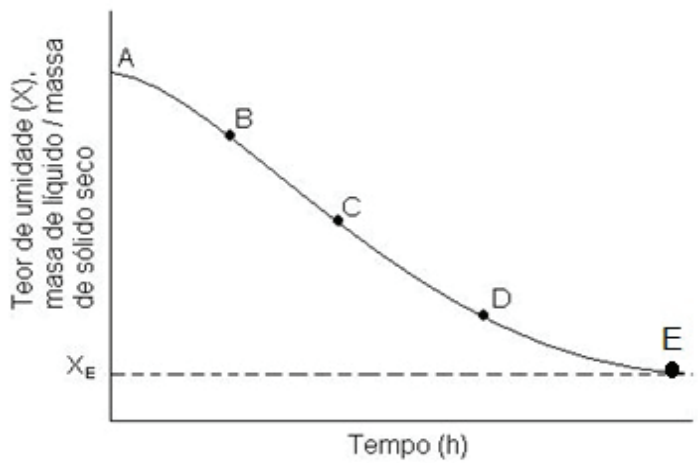
De acordo com Merheb, (2009) o resfriamento e a secagem do açúcar são realizados em um secador, composto por um tambor metálico através do qual passa, em contracorrente, um fluxo de ar succionado por um exaustor. O açúcar deve sair do secador com temperatura entre 30 e 40 °C e umidade na faixa de 0,03 % a 0,04 %, assim o açúcar está pronto para ser enviado ao ensacamento. O ar que passa pelo secador arrasta consigo uma pequena quantidade de pó de açúcar, sendo, necessária à lavagem desse ar para recuperação do açúcar arrastado, retornando-o posteriormente para o processo.

A eficiência da transferência de energia (calor) do ambiente para evaporar a umidade superficial depende das condições externas,

temperatura, umidade do ar, fluxo e direção de ar, área de exposição do sólido (forma física) e da pressão. A transferência de massa (umidade) do interior para a superfície do material e sua subsequente evaporação ocorrem em decorrência do primeiro processo. O movimento interno da umidade no material sólido é função da natureza física do sólido, sua temperatura e conteúdo de umidade.

O processo de transferência de calor e massa do sólido manifesta-se sob um comportamento típico, que pode ser observado na curva de secagem. Cadasólido possui uma curva característica (PARK, et. al, 2007). Entretanto, em geral, possuem uma curva de secagem bem definida, decrescente ao longo do período da secagem, comoo ilustrado na Figura

Figura 8 - Curva característica de secagem com teor de umidade em função do tempo



Fonte: FOUST *et al.*, 2008

Avaliando a Figura 8 salientamos:

- *Trecho AB:* onde a umidade do sólido é maior que a umidade do ar contido no sistema de secagem, possibilitando o início da transferência da água que está contida no sólido. No caso do açúcar, o calor que proporciona a evaporação da água contida no sólido é proveniente do açúcar que sai da centrífuga com uma temperatura (75 – 70 °C), o qual é suficiente para provocar a evaporação da água do sólido (FOUST, et. al, 2008).

- *Trecho BC:* é o período de taxa constante onde a temperatura do sólido é igual a ambiente, sendo caracterizado pela velocidade de secagem inalterada com a diminuição do teor de umidade. O calor é transferido para a superfície de secagem do sólido basicamente por convecção (FOUST, et. al, 2008).

Em linhas gerais, a temperatura do sólido e a velocidade de secagem podem aumentar ou diminuir para chegarem às condições de regime permanente. Nesse regime, as temperaturas no interior do sólido tendem a ser iguais à temperatura de bulbo úmido do gás, permanecendo estáveis e a taxa de secagem também permanece constante (FOUST et. al, 2008).

- *Trecho CDE:* período de taxa decrescente, a taxa de secagem depende das características de difusão e capilaridade do sólido. Inicia quando a umidade do sólido atinge a umidade crítica, que corresponde à umidade possível de ser removida sem alterar a estrutura do sólido (FOUST, et. al, 2008).

Este trecho pode ser dividido em duas zonas: zona de secagem não-saturada e zona em que o fluxo interno de água controla o processo. Além desse ponto, a temperatura da superfície eleva-se e a taxa de secagem cai rapidamente (FOUST et. al, 2008).

O ponto X_E (Ponto E) é chamado de umidade de equilíbrio, a qual garante a preservação das características do sólido seco durante o armazenamento. A taxa de secagem aproxima-se de zero, num certo teor de umidade de equilíbrio, que é o menor teor de umidade atingível no processo de secagem (FOUST et. al, 2008).

Para os trechos CD e DE Podemos salientar:

- *Zona de superfície de secagem não saturada (trecho CD):* neste estágio, a superfície do sólido apresenta áreas secas que se ampliam na proporção em que a secagem prossegue. Consequentemente, a taxa de secagem diminui uma vez que a mesma é relativa a toda a área do sólido em contato com o ar. A evaporação ocorre na superfície do sólido e a resistência à difusão interna do líquido é pequena comparada com a resistência para remover o vapor da superfície. A temperatura do sólido aumenta, pois recebe do ar a mesma quantidade de calor que corresponderia ao período de taxa constante, sem, no entanto, ocorrer igual evaporação. Ou seja, parte da energia que era utilizada para a evaporação na fase anterior, acaba sendo utilizada para elevar a temperatura do sólido (FOUST, et. al, 2006). No caso do açúcar esta etapa pode interferir negativamente na cor do açúcar.

- *Zona em que o fluxo interno de água controla a operação (Trecho DE):* caracteriza-se pelo fato do fluxo interno de água controlar a taxa de secagem. Os fatores que influenciam a taxa de secagem são os mesmo que afetam a difusão da água através de sólidos. Observa-se que a umidade do ar não tem efeito na taxa de secagem, mostrando que esta depende da resistência a difusão da água (FOUST, et. al, 2008).

Cadasólido possui uma curva característica de secagem quese manifesta sob um comportamento típico (PARK, et. al, 2007).

A secagem de açúcar bruto é necessária na maioria dos casos por duas razões (REIN, 2013):

- Obter um açúcar com características necessárias ao manejo, ou seja, assegurar que ele se torne e permaneça com fluidez adequada livre e tenha as qualidades físicas e estéticas demandadas pelo mercado.

- Reduzir a probabilidade de perda de sacarose ou formação de cor, via degradação química ou microbiológica.

Como orientação na prevenção da deterioração, o açúcar que deve ser seco abaixo da umidade limite, determinado pelo fator de segurança f de acordo com a Equação 10.

- (10)

Hugot (1977) afirma que se o f for maior do que 0,3, o açúcar se deteriorará rapidamente e sugere que o fator de segurança do

açúcar seja mantido abaixo de 0,3 para, caso exista, a deterioração ocorra lentamente. Porém, o valor do fator de segurança varia conforme alguns países. Na Índia, um valor de 0,22 é usado para açucares brancos ou refinados, enquanto 0,20 é recomendado para açúcar bruto. A prática na África do Sul é empregar 0,23 para todos os tipos de açúcar.

3. REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE F. M. **Processo de fabricação do açúcar**. Pernambuco: Editora Universitária UFPE, 3 ed, 2011.

ALVES, F. V. **Influência do amido e da dextrana nas análises tecnológicas do caldo de cana**. 2012. 108p. Dissertação (Mestrado em Ciências). Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

CASTRO, S. B. & ANDRADE, S. A. C. **Tecnologia do Açúcar.** Recife: Editora Universitária/UFPE, 2007.

CASTRO, S. B.; ANDRADE, S. A. C. **Engenharia e Tecnologia Sucroalcooleira**. Departamento de Engenharia Química. 2006.

CONSECANA, Conselho de Produtores de Cana de açúcar, Açúcar e Etanol do Estado de São Paulo. **Manual de instruções**. 6aed. São Paulo: 2015. 80p.

COPERSUCAR. **Manual de Controle Microbiológico da Usina de Açúcar e Álcool**. Piracicaba, 1993. 10p. (Caderno-Série Industrial, 5).

FIQUEIREDO, P. **Breve história da cana-de-açúcar e do papel do instituto agronômico no seu estabelecimento no Brasil.** In: DINARDO-MIRANDA, L.L; VASCONCELOS, A.C.M de; ANDRADE LANDELL, M.G de. Cana-de-açúcar. Campinas: Instituto Agronômico, 2008. p.31-41.

FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. 2ed. **Princípios das operações unitárias**. Rio de Janeiro: Ed. Guanabara Dois/LTC, 670p. 2008.

GALO, N.P. **Controle de qualidade da cana-de-açúcar para industrialização**.2013,42p. Monografia (Pós-Graduação em Gestão do Setor Sucroenergético – MTA). Universidade Federal de São Carlos - Centro de CiênciasAgrárias.Pós-Graduação em Gestão Do Setor Sucroenergético – MTA. Sertãozinho-SP:2013

HAMERSKI, F. **Estudo de variáveis no processo de carbonatação do caldo de cana- de- açúcar.** 2009. 150p.Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

HUGOT, E. **Manual da Engenharia Açucareira**. Vol 1. Editora Mestre Jou. São Paulo. 1977.

ISENMANN, A. F. **Operações Unitárias na Indústria Química**. 2ª Edição. Timóteo (MG). 2013.

JOHNSON, T. P. **Experience with starch and dextran in a refinery. In: American Society of Sucarcane Technologists**, 1989. New Orleans. Resumos. 1989. New Orleans: Midland Research Publication, 1989. p. 7-11.

LOPES, C. H. **Tecnologia de Produção de Açúcar de Cana.** EDUFSCAR. 2011.

MANTELATTO, P. E. **Estudo do processo de cristalização de soluções impuras de sacarose por resfriamento**. Dissertação (Mestrado em Ciências Exatas e da Terra) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.

MENEGETTI, C. C.; MEZAROBA, S.; GROFF, A. M. Fatores relacionados ao cultivo da cana-de-açúcar. In: IV **Encontro de Engenharia de Produção Agroindustrial – Fecilcam.** Campo Mourão, 2010.

MENON, A. S., MUJUMDAR, A. S. **Drying of solids: principles, classification, and selection of dryers**: Handbook of Industrial Drying. New York: Marcel Dekker Inc., 1987.

MERHEB, G. A. **Estudo do processo de cristalização de sacarose a partir de soluções provenientes de cana-de-açúcar por resfriamento controlado**. 2009. 198p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

NOVACANA. **Como é feito o processamento da cana-de-açúcar nas usinas**. Disponível em https://www.novacana.com/usina/como-e-feito-processamento-cana-de-acucar. Acesso em 30 de abril de 2020.

OLIVEIRA, S. F. A. **Avaliação Energética da Biomassa da Cana-de-Açúcar em Diferentes Indústrias Sucroenergéticas**. Dissertação de Mestrado. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos – São Paulo, 2014.

PACHECO, C. R. F. **Apostila de conceitos básicos de secagem**, São Paulo, Departamento de Engenharia Química da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010.

PARK, K. J.; ANTONIO, G. C.; OLIVEIRA, R. A.; PARK, K. J. B. **Apostila de conceitos de processo e equipamentos de secagem**. Campinas, CT&EA – Centro de Tecnologia e Engenharia Agroindustrial, 2007.

PAYNE, J. H. **Operações unitárias na produção de açúcar de cana**. Ed. Nobel:STAB, São Paulo, 1989.

REIN, P**. Engenharia do Açúcar da Cana**. Berlin.2013

RIBEIRO, C. A. F.; BLUMER, S.A.G.; HORII, J. **Fundamentos de Tecnologia Sucroalcooleira. 1ª Parte. Tecnologia do açúcar.** Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba. 1999.

SANTOS, F.; BORÉM, A. **Cana-de-açúcar: do plantio à colheita**. Viçosa, MG: UFV, 2016.

SILVA, L. C. **Troca de Calor e Massa no Processamento de Grãos**. Universidade Federal do Espírito Santo. Grãos Brasil: Da Semente ao Consumo, Ano X, nº 58, Jan/Fev. de 2013.

SILVA, R.B.; PORTO, A.G.; WOLQUIND, C.S.; SILVA, F. S.; DA SILVA, F.T.C. Aplicação da produção mais limpa no processo de clarificação do caldo de cana para produção de açúcar. **Gepros, gestão da produção, operação e sistemas**, n. 1, p 59-71, 2009**.**

TADINI, C. C.; TELIS, V.R.N.; MEIRELLES, A.J.A.; FILHO, P.A.P. **Operações Unitárias na Indústria de Alimento**s. Vol 1. 1ª Edição. Rio de Janeiro, LTC, 2018.

SOBRE A ORGANIZADORA

1. Laís Campos Teixeira de Carvalho Gonçalves

Doutora em Biotecnologia pela Universidade Federal da Paraíba (2017). Mestre em Biologia Celular e Molecular pela Universidade Federal da Paraíba (2012).Graduada em Ciências Biológicas, Licenciatura e Bacharelado, pela UniversidadeFederal da Paraíba (2010). Atualmente é Professora Adjunta do Departamento de Tecnologia Sucroalcooleira da Universidade Federal da Paraíba. Atua na área de microbiologia aplicada à bioprocessos e desenvolvimento de bioprodutos, como enzimas, além de biocombustíveis, aditivos alimentares e antibióticos.

SOBRE OS AUTORES

1. Anderson Aldelyan Ramalho De Sousa

Graduado em Tecnologia em Produção Sucroalcooleira pela Universidade Federal da Paraíba (2019). Atua na área de empacotamento do bagaço da cana de açúcar para facilidade do transporte e armazenando.

2. Angela Lima Menêses de Queiroz

Pós-doutora (2019), Doutora (2017) e Mestre (2013) em Ciência e Tecnologia de Alimentos pela Universidade Federal da Paraíba. Graduada em Engenharia de Alimentos pela Universidade Federal da Paraíba (2009). Atualmente é Técnica de laboratório/área no Laboratório de Operações Unitárias do Departamento de Tecnologia Sucroalcooleira, Universidade Federal da Paraíba.

3. Cláudia Gouveia Rodrigues

Doutora em Engenharia de Processos pela Universidade Federal de Campina Grande (2016). Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos pela Universidade Federal da Paraíba (2011). Graduada em Engenharia de Alimentos pela Universidade Federal da Paraíba

(2008). Atualmente é Técnica de Laboratório da Universidade Federal da Paraíba. Atua na área de ciência e tecnologia de alimentos, com ênfase na utilização de plantas do semi-árido para aproveitamento integral em alimentos.

4. Danielle Christine Almeida Jaguaribe

Pós-Doutorado em Catálise Heterogênea no Departamento de Engenharia Química da Universidade de Aberdeen, Escócia (2016 a 2017). Pós-Doutorado em Processos Catalíticos no Departamento de Engenharia Química da UFPE (2004 a2007). Doutora em Físico-Química pela Universidade Federal da Paraíba (2002 a 2004). Pesquisadora no Departamento de Engenharia Química da Universidade de Coimbra (1998 a 2002). Mestra em Engenharia Química pela Universidade Federalde Campina Grande (1995 a 1997). Atualmente é Professora da Universidade Federal da Paraíba (2012 -), atuando na área de Fenômenos de Transporte,Processos Químicos, Energias Renováveis e Catálise Heterogênea.

5. Eline Araújo Andrade

Tecnóloga em Produção Sucroalcooleira pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Pós-graduanda em Produção e Logística. Atualmente, é Analista de PCP/Suprimentos de matéria-prima na empresa de Bebidas Minalba Brasil.

6. Erika Adriana de Santana Gomes

Pós-doutora pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2011), na área de Recuperação Avançada de Petróleo. Doutora e Mestre pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2005) e (2009) na área de Tecnologia de Tensoativos.Graduada em Engenharia Química pela Universidade Católica de Pernambuco(2001). Professora Adjunta do Departamento de Tecnologia Sucroalcooleira da Universidade Federal da Paraíba desde 2012. Experiência nas áreas de: microbiologia industrial e de fermentação, tecnologia de tensoativos e microemulsões, modelagem matemática de sistema termodinâmico, operações unitárias para produção de açúcar e etanol, padronização da qualidade da rapadura, melado e açúcar.

7. Joelma Morais Ferreira

Pós-Doutorado em Engenharia Química pela Universidade Federal de Pernambuco(2010), doutorado em Engenharia de Processos pela Universidade Federal de Campina Grande (2006), mestrado em Engenharia Química pela Universidade Federal da Paraíba(2001). Professora do quadro docente permanente (dedicação exclusiva) do Departamento de Tecnologia em Produção Sucroalcooleira da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) e Co-Orientadora do Programa de Pós-Graduação de Engenharia Química, da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Coordenadora do Curso de Graduação de Tecnologia em Produção Sucroalcooleira da UFPB (2016-2020). Tem experiência em Operações Unitárias e na área de Meio Ambiente,

atuando principalmente nos seguintes temas: Adsorção, Biossorção, Metais Pesados, Corantes, Hidrocarbonetos, Biadsorventes, Adsorventes, Planejamento Experimental, Controle de Qualidade de Águas e Tratamento de Efluentes Industriais.

8. Liana Filgueira Albuquerque

Doutora (2009) e mestre (2005) em Engenharia Química pela UniversidadeFederal do Rio Grande do Norte (UFRN), com ênfase em tratamento de efluentes industriais. Graduada (1991) em Engenharia Química pela Universidade Católicade Pernambuco (UNICAP). Fez pós-doutorado na UFRN em parceria com o Centrode Pesquisas Leopoldo Américo Miguez de Mello (CENPES/PETROBRAS) na análise de dados termodinâmicos para recuperação do monoetilenoglicol em plataformas offshore. Antes de iniciar a carreira acadêmica, atuou na área decontrole de qualidade do Engarrafamento Pitú; consultoria ambiental em diversas indústrias (Indústrias Becker - produtos de limpeza, Cachaça Samanaú, MarsChocolate, Potiporã - beneficiadora de camarão e outras) e área técnica do órgão ambiental do Estado do Rio Grande do Norte – IDEMA. Foi docente e coordenadora do curso de Engenharia Ambiental da UNICAP de 2010 a 2013. Atualmente, é professora adjunta do Departamento de Tecnologia Sucroalcooleira (DTS), no Centro de Tecnologia em Desenvolvimento Regional (CTDR) da UFPB, onde exerceu a função de chefe de departamento de 2016 a 2020 e atua na área ambiental, tecnologia de cachaça e ciência do bem-estar.

9. Márcia Aparecida Cezar

Doutora (2007) e Mestre (2003) em Agronomia (Proteção de Plantas) pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP). Graduada (2000)em Engenharia Agronômica pelo Centro Regional Universitário (CREUPI). Bolsista de Desenvolvimento Científico e Tecnólogico (2008) FUNCAP/CNPQ pela Universidade Federal do Ceará (UFC) no laboratório de virologia vegetal no departamento de Fitotecnia. Professor Adjunto da Universidade Federal de Campina Grande no Curso de Agronomia (2009-2014) a frente das disciplinas Microbiologia Geral, Fitopatologia Geral e Fitopatologia Agrícola. De 2015 até o momento é Professor Associado II da UFPB, no Departamento de Tecnologia Sucroalcooleira do CTDR/ UFPB, atua com diagnose de doenças da cana-de-açúcar,métodos alternativos de controle de doenças.

10. Solange Maria de Vasconcelos

Graduada em Engenharia Química pela Universidade Federal de Pernambuco(2004). Mestre (2007) e Doutora (2012) em Engenharia Química, na área de Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos, pela Universidade Federal de Pernambuco. Atualmente, é Docente Adjunta C – Nível II do Departamentode Tecnologia Sucroalcooleira da Universidade Federal da Paraíba, atuando nas áreas de Microbiologia Industrial e Tecnologia das Fermentações. Temexperiência nas áreas de pré-tratamento e hidrólise enzimática da biomassa de cana-de-açúcar.

editora filiada à
Associação Brasileira
das Editoras Universitárias

Este livro foi diagramado pela Editora
da UFPB em Novembro de 2020,
utilizando a fonte Myriad Pro.