

Tecnologias na produção de etanol de batata-doce: estudo de processos entre Brasil e China

RESUMO

Na atualidade, uma das inquietações mundiais, incluindo o Brasil, é obter respostas para diminuir a dependência energética por combustíveis de origem fóssil. A geopolítica e os resultados ambientais negativos, ocasionados pela utilização dos combustíveis fósseis, impulsionaram estudos para a geração de tecnologias alternativas em biocombustíveis renováveis. A *Ipomoea batatas* L. (Lam.) é visualizada como uma matéria-prima alternativa na geração do etanol, pois demonstra um curto ciclo de produção. Portanto, esta pesquisa pretende analisar os processos produtivos de transformação do amido em etanol existentes da batata-doce no Brasil e China, desde a recepção da biomassa até o embarque do etanol. A partir das características do estudo que foram mencionadas, para a pesquisa bibliográfica foram utilizados como fontes de dados artigos científicos e websites. A pesquisa analisou os processos industriais de transformação de etanol de batata-doce. No Brasil o processo de sacarificação ocorre por hidrólise enzimática, depois ocorre o processo de fermentação. A energia do processo da China usa como energia o carvão mineral, e o processo brasileiro utilizam energia térmica de biomassa e o petróleo. Estas diferenças nos processos industriais podem gerar balanços energéticos e ambientais diferentes.

PALAVRAS-CHAVE: Sustentabilidade; Bioenergia; Biocombustível; Sistema industrial.

Antonio Carlos Franco

francoancf@hotmail.com

orcid.org/0000-0003-1616-2648

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil.

Luciane Silva Franco

lu05-franco@hotmail.com

orcid.org/0000-0003-1913-9275

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil.

INTRODUÇÃO

Estudos para diminuir as incertezas produtivas e obter economias com a geração de emprego por meio da diversificação de atividades, são essenciais na economia. O setor energético do Brasil apresenta histórico de utilizações de fontes renováveis, hidráulica e biocombustíveis, como por exemplo, o biodiesel e etanol. Contudo, 57% da energia brasileira consumida tem origem em fontes não renováveis, sendo o petróleo e seus derivados com 37%, o gás natural com 12%, o carvão mineral com 5,6%, o urânio com 1,6% e ainda outras fontes consideradas não renováveis com 0,8%. Dos 43% de energias renováveis, 18% são da biomassa de cana-de-açúcar, 12,5% de energia hidráulica, 8% de carvão vegetal e lenha entre outras (EPE, 2018).

Tendo como foco as dificuldades ambientais, os biocombustíveis ganham relevância como possibilidade para ajudar no combate a emissão de dióxido de carbono. O problema atual dos seres humanos é agregar de forma sustentável, dois fatores essenciais para a sobrevivência, que são: a manutenção dos alimentos e a energética. No entanto, sempre que o assunto são culturas bioenergéticas, é inevitável a discussão da competição entre bioenergia e alimentos.

Várias espécies agrícolas para geração de álcool, consideradas como armazenadoras de amido e açúcares. A obtenção de álcool por meio das amiláceas, todavia é de baixa divulgação no Brasil. O etanol pode ser de culturas amiláceas ou sacaríneas, os processos são realizados a partir de matérias-primas incluídos açúcares fermentáveis ou também a partir de matérias primas amiláceas. O processo industrial de obtenção do álcool de batata-doce compreende 7 etapas: lavagem, moagem, hidratação, pré-sacarificação, sacarificação, fermentação e destilação. Contudo, nos países desenvolvidos este processo já é adotado, os Estados Unidos são conhecidos por gerarem etanol combustível da hidrólise e a fermentação do milho. O milho demonstra dificuldades de adaptação em certos climas, valores energéticos menores e por concorrer com a cadeia de alimentos dos seres humanos, apesar do seu uso como matéria-prima na geração de etanol (PIMENTEL e PATZEK, 2005).

Uma espécie de sucesso é a cana-de-açúcar, muito comum para a geração de etanol no Brasil. O país é conhecido pela utilização desta fonte renovável de energia, e assim, ela acaba prevalecendo na geração de etanol e como resultado a matriz energética brasileira é concentrada somente nesta cultura. Matérias-primas semelhantes para a geração de etanol estão em fase de pesquisa, entre estas estão a batata-doce, beterraba e a mandioca (SOBRINHO et al., 2019; MAPA, 2008). A batata-doce apresenta fatores favoráveis que contribuem para a obtenção do etanol, como uma espécie potencial para a geração de combustível, essencialmente por ser considerada como uma cultura que tem fácil adaptação aos solos de média e pouca fertilidade, por sua resistência às doenças e pragas, demonstrando ciclos pequenos de produção, por volta de 4 a 6 meses e igualmente pelo seu grau de poluição, pois não existe necessidade de queimar as suas ramas para a colheita (COELHO et al., 2008).

Distintas espécies que tem a função de armazenar amido e açúcares representam ótimas fontes para a geração de etanol. A batata-doce é um amiláceo que demonstra elevado potencial energético para a produção de álcool como combustível, pois apresentam altas quantidades de açúcares e amido como redutores. Vários são os benefícios que a batata-doce proporciona como matéria-prima na geração do etanol. Com propósitos voltados aos cuidados com o meio ambiente, o etanol é produzido em diversos países e entre estes o Brasil (NEGRÃO e URBAN, 2005).

A enzima industrial amilase, tem o objetivo de quebrar as moléculas de amido, convertendo quase aproximadamente 85% em maltose e dextrina. Descoberta por Kirchhoff esta enzima surgiu em 1811, com a função de degradar o amido (GUPTA et al., 2003). As amilases estão entre as mais fundamentais enzimas com uso industrial. Inicialmente a sua comercialização, foca-se ao setor farmacêutico, com a função de tratamento digestivo. Na atualidade, as amilases mostram utilizações na panificação, em cervejaria, na produção de etanol, entre outras (COELHO et al., 2008).

A cultura da batata-doce possui grande potencial e pode ter dupla finalidade. Alguns estudos testam perspectivas e desafios da batata-doce; como combustível (LAREO e FERRARI, 2019), na produção de etanol de batata-doce; como impacto ambiental e a eficiência energética (ZHANG et al., 2017); na utilização para a

alimentação animal (MUSSOLINE et al., 2017), processos de conversão de amido (MUSSOLINE et al., 2017), bem como análises econômicas da batata-doce (LOEBENSTEIN e THOTTAPPILLY, 2009). No entanto, no Brasil estudos da cultura da batata-doce ainda são incipientes, sendo assim o objetivo da pesquisa é analisar os processos produtivos de transformação do amido em etanol existentes da batata-doce no Brasil e China, desde a recepção da biomassa até o embarque do etanol.

METODOLOGIA

A metodologia utilizada para identificar e avaliar as relações apresentadas pelos pesquisadores visa alcançar o objetivo de pesquisa proposto. Entre outros, se pretende analisar os processos produtivos de transformação do amido em etanol de batata-doce, por meio de pesquisa bibliográfica.

O estudo direciona uma postura para a metodologia qualitativa, com objetivo de agrupar assuntos mais focados em eventos sociais mencionados para esta pesquisa. Os estudos relacionados com a pesquisa qualitativa são expostos pelo motivo da riqueza em informações, conforme o contexto (GODOI e MATTOS, 2006). Os estudos qualitativos procuram especificar eventos, indivíduos e as ligações dentre as variáveis (CRESWELL, 2010).

A pesquisa é caracterizada como exploratória e descritiva, procurando objetivar e proporcionar uma interpretação geral relacionada com os acontecimentos e os eventos. Este procedimento para um estudo de natureza qualitativa apresenta uma perspectiva dedutiva, envolvendo o investigador e proporcionando interpretações com base de dados coletados (CRESWELL, 2010). A partir das características do estudo que foram mencionadas, para a pesquisa bibliográfica foram utilizados como fontes de dados artigos científicos e websites (EISENHARDT, 1989).

Para avaliar os processos relacionados é preciso descrevê-los conforme o tipo de matéria-prima utilizada na obtenção de etanol. Dessa forma, a execução deste estudo foi formulada a partir das seguintes etapas:

- ✓ Avaliação dos processos de transformação do etanol de amido de batata-doce

- ✓ Processos industriais e eficiência operacional para obtenção do etanol de batata-doce no Brasil em comparação com a China.
- ✓ Análise dos rendimentos nos países analisados.

As contribuições desta pesquisa podem ser direcionadas em redução de custos com energia e na eficiência operacional, redução no desperdício de insumos e possibilidade de investimentos a médio e longo prazo podem ser viáveis financeiramente.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

PROCESSO INDUSTRIAL DE TRANSFORMAÇÃO DO ETANOL DE AMIDO DE BATATA-DOCE NA CHINA

A matriz energética da China tem se desenvolvido com a redução da utilização do carvão, 66% até o ano de 2014 e uma previsão de 42% até o ano de 2035, e devido ao crescimento da atuação com o gás natural que praticamente será duplicado para esperados 11% da matriz energética para 2035 e um crescimento na atuação com o óleo cru de 20% para 23% (WANG, 2011).

As estimativas sobre a gestão energética na América do Norte evidenciam que até 2050 a demanda mundial energética aumentará 50% (EIA, 2020). Na China, carvão queimado é responsável pela redução de aproximadamente 36% do CO₂ (ZHOU et al., 2020). Expectativa em relação aos combustíveis fósseis que 80% das reservas globais de carvão devem ser intocadas para manter o aumento da temperatura global abaixo de 2 °C (PELLEGRINI et al., 2021).

A energia é caracterizada como a principal fonte de emissões, uma vez que 73,2% das emissões globais devido ao consumo energético (OWD, 2020). A energia total consumida no mundo, 86,6% de fontes não renováveis e apenas 13,4% de fontes renováveis (EIA, 2020).

O setor de energias renováveis está em desenvolvimento com aproximadamente 690%, também como a hidroelétrica e a nuclear com aumentos de 38% e 640% respectivamente. Com este expressivo crescimento na produção de energia nuclear, a China será encarregada em 2035 por aproximadamente 31% da produção nuclear total mundial (IEA, 2019).

Na China, a batata-doce foi detectada como uma cultura essencial para o processo de fermentação para o bioetanol, pois o país asiático concentra aproximadamente 85% da produção de batata-doce no mundo (ZHANG *et al.*, 2011). Para a geração do etanol como combustível de batata-doce, pode ser utilizada por meio do processo de secagem das raízes de batata-doce, demandando tempo, energia e mão-de-obra. As batatas-doces são cozidas até formar uma pasta, são processos frequentes para a geração de etanol combustível em indústrias e laboratórios, por meio dos processos de sacarificação e fermentação com a levedura *Saccharomyces cerevisiae*. A limitação deste processo é a utilização de raízes de batata-doce cozidas em forma de pasta, devido a elevada viscosidade e o elevado teor de sólidos (ZHANG *et al.*, 2011).

O processo de imobilização de *Saccharomyces cerevisiae* é utilizado para gerar etanol como combustível oriundo da batata-doce cozida (LEE *et al.*, 2012). Uma dificuldade no uso da batata-doce cozida é o consumo de energia na etapa de cozimento, diminuindo assim as taxas de energia gerada de etanol com o valor da energia consumida no cozimento (GOYAL *et al.*, 2005).

As culturas cruas e não cozidas durante a fermentação do etanol, apresentam tendência em reduzir gastos com energia e diminuir os valores finais do processo de fabricação. No uso de grãos de amido cru, como o milho e o arroz, ocorre o processamento de sacarificação de enzimas e a próxima etapa é a fermentação do etanol pelo *Saccharomyces cerevisiae*. Existe a possibilidade de redução no consumo de energia de 30 a 40% durante a fabricação, pois a etapa de cozimento não foi realizada (WANG, 2011). O amido da batata-doce apresenta maior dificuldade para realizar a etapa de sacarificação, devido a elevada cristalinidade e ao tamanho dos grânulos. Para superar estas dificuldades, é interessante isolar strain de *Aspergillus niger* das raízes da batata-doce com o objetivo de gerar altos níveis de enzimas para a etapa de sacarificação do amido considerado cru da batata-doce. O mosto obtido por meio das raízes de batata-doce não cozidas é tratado com strain de *Aspergillus niger* e a geração de etanol foi executada com excelente eficiência (LEE *et al.*, 2012).

Lareo e Ferrari (2019) e Kaifeng Sida (2020) afirmam que o processo de transformação do etanol de amido de batata-doce, pode ser compreendido da seguinte maneira:

- ✓ Lavagem: Nesta etapa ocorre a retirada das partículas do solo e outros resíduos que normalmente estão presentes na matéria-prima;
- ✓ Redução de tamanho: A etapa em que a matéria-prima obtida é diminuída de tamanho;
- ✓ Liquefação: A etapa onde a matéria-prima já reduzida de tamanho é misturada com a água e aquecida à temperatura de 30 °C a 45 °C, assim, esta substância é liquefeita. Esta solução obtida é também conhecida como pura;
- ✓ Diluição: Depois de obter da pasta, ele é diluído para um nível necessário de açúcares, e assim, a levedura é adicionada para que não seja destruída;
- ✓ Sacarificação: Objetivo é dissimular o amido presente na batata-doce, é indispensável utilizar a enzima α -glucoamilase para o processo de conversão do amido em açúcares fermentáveis;
- ✓ Fermentação: Com a etapa de sacarificação realizada, uma levedura é adicionada na solução para que o processo de fermentação ocorra, fazendo com que os açúcares sejam convertidos em álcool;
- ✓ Destilação: O álcool que é obtido após a fermentação é a mistura da água e do álcool, é necessário separar usando uma operação unitária chamada de destilação;
- ✓ Desidratação: Mesmo com o processo de destilação realizado, ainda existirão aproximadamente 4% de água, esta não é removida por meio da etapa de destilação, pois ocorre a formação do azeótropo e;
- ✓ Desnaturação: O álcool gerado é impróprio para o uso como bebida e ainda necessita ser processado para ser usado como combustível.

Desta forma, o processo produtivo do etanol de amido de batata-doce na China apresenta tendência de desenvolvimento. E, um dos motivos é por ter a maior plantação de batata-doce do mundo, normalmente com colheitas previstas

para o mês de outono. O número de clientes locais chineses está aumentando a cada ano, motivados na instalação de uma planta de amido de etanol de batata-doce (KAIFENG SIDA, 2019).

PROCESSO INDUSTRIAL DE TRANSFORMAÇÃO DO ETANOL DE AMIDO DE BATATA-DOCE NO BRASIL

A matriz energética brasileira é bastante distinta em relação a matriz energética mundial. Mesmo com o consumo de energia com fontes não renováveis serem superiores em relação com as renováveis, são utilizadas mais fontes renováveis em relação ao resto do mundo. Somando hidráulica, derivados de cana, carvão vegetal e a lenha, e outras renováveis totalizam em 39%, praticamente quase a metade da matriz energética do Brasil (EPE, 2018).

A produção de etanol depende diretamente da geração total de carboidratos de amido com açúcares totais, aproximadamente 719 litros por megagrama de carboidratos totais. Neste contexto, aparece a necessidade de alcançar genótipos que complementem um maior percentual de geração e matéria seca, sendo possível alcançar mediante melhoramento genético (MACHADO e ABREU, 2006). Em um estudo sobre duas culturas de batata-doce no Estado do Tocantins, o resultado atingido em atividades em conjunto entre a Universidade Federal de Lavras com o professor Wilson Roberto Maluf e Universidade Federal do Tocantins foram interessantes para a geração de etanol. Estas duas culturas foram escolhidas por meio de sementes botânicas alcançadas com o cruzamento entre clones de várias regiões brasileiras no início dos anos 90 (MALUF, 1986).

Em 1993, aproximadamente 850 genótipos foram escolhidos e analisados em vários campos experimentais, entre estes as culturas de Canuanã e Palmas se evidenciaram com uma produção média de 40,56 mg ha⁻¹ e 23,75 ha⁻¹. Estas culturas foram escolhidas com aspectos e resistência a nematoides, com casca rosada e forma de raiz fusiforme, aspectos para a comercialização *in natura*. Bernardo Neto (2009) descobriu que o rendimento energético da geração de batata-doce e de etanol é estimado em 30% da totalidade de energia presente nesta cultura, justificando o fato de apenas a sacarose ser aproveitada como um insumo para esta finalidade. Zanardi et al. (2016) explicaram que para atingir o hidrolisado de batata-doce no processo brasileiro, necessita-se seguir algumas etapas, sendo elas:

- ✓ Lavagem: Inicialmente a matéria-prima é submetida à lavagem para a remoção de impurezas.
- ✓ Moagem: A batata é triturada em uma mistura com água na razão 1:1,2. A batata-doce depois de limpa, passa pelo moedor que tem a função de cortar em pedaços menores, com o objetivo de facilitar a próxima etapa do processo produtivo, o tempo médio nesta etapa pode variar entre 30 minutos e 1 hora dependendo da quantidade de batata-doce.
- ✓ A próxima etapa da moagem é a realização da abertura das células da batata-doce com o propósito de simplificar o processo de extração dos açúcares na próxima fase do processo. O equipamento industrial usado para a execução dessa tarefa é o desfibrador, formado por diversos martelos giratórios que proporcionam a moagem final da batata-doce. A batata-doce moída está adequada para entrar no processo de hidratação, contudo, para eliminar a entrada no processo de algum produto metálico, que trará dificuldades para as moendas, existe um separador magnético com a função de eliminar os produtos metálicos que não constituem o processo da quebra de algum mecanismo do moedor, desfibrador ou do setor agrícola. O processo de controle de fluxo da batata-doce para a etapa produtiva de hidratação é efetuado por intermédio do controle das velocidades das esteiras, pois estas são encarregadas pela atividade de transporte da batata-doce no setor de recepção e preparo. O processo de extração dos teores de açúcar da batata-doce pode ser feito pela moagem do próprio tubérculo.
- ✓ Hidratação: Depois do processo de moagem, esta mistura é submetida a aquecimento a 90 °C para geleificação do amido. Quando a temperatura de 90 °C foi alcançada, adicionou-se a enzima α -amilase (Termamyl 120 L[®]), na concentração de 1,5 mL kg⁻¹ de batata, e a mistura é mantida nessa temperatura por 1 hora, para o processo de hidrólise na cadeia linear do amido. Em seguida, o pH é ajustado com ácido clorídrico 1M para as condições ótimas de atuação da enzima glicoamilase, entre 4,0 e 4,5. A temperatura é reduzida para 60 °C e a enzima amiloglicosidase (AMG 300[®]) é adicionada, na concentração de 1,5 mL kg⁻¹ de batata. Essa temperatura foi mantida por 1 hora, com o objetivo que as dextrinas

produzidas pela primeira enzima possam ser hidrolisadas em monômeros de glicose. Após concluída a etapa de hidrólise, a pasta é resfriada até aproximadamente 30 °C, a concentração de sólidos solúveis é ajustada para 12 °Brix com água e o inóculo é adicionado. O pH final da pasta fica entre 4,0 e 5,0, esta é uma ótima faixa de atuação da levedura. Todo o processo de produção da pasta é conduzido na microusina de batata-doce.

- ✓ Fermentação: O processo de fermentação é realizado em uma temperatura ambiente por aproximadamente 30 horas;
- ✓ Destilação: O álcool que é alcançado é resultado da mistura de água e álcool. A matéria prima imprópria para uso como combustível é destinado para a fabricação do farelo proteico para ser usada como rações animais.

No Brasil, em estudos com o propósito de analisar a variabilidade fenotípica e a diferença genética entre clones de batata-doce, foram identificados clones com rendimentos de etanol em 7,63 m³ ha⁻¹ (MARTINS *et al.* 2012; SILVEIRA, 2007). Outros fatores vinculados com a batata-doce que favorece para o seu uso na produção do etanol é a sua forma rústica, com base a pequena demanda na utilização de insumos e a elevada produção de energia por região. Ainda a batata-doce apresenta uma adequação ideal às exigências dos distintos climas e solos do Brasil (SILVEIRA, 2008).

AVALIAÇÃO ENTRE OS PROCESSOS ANALISADOS

A China por ser a maior produtora de batata-doce no mundo, concentra aproximadamente 85% de toda batata-doce produzida, com produção anual de 118 milhões de mg. O cálculo usado para estimar a produção de etanol em litros, conforme o teor de amido da batata-doce foi:

$$1 \text{ mg de batata-doce} \\ (\text{teor de amido em quilogramas}) \times 0,51 = \text{litros etanol produzido}$$

Equação 1

O quadro abaixo foi construído com dados nos principais processos de produção do etanol de batata-doce, desta forma é possível visualizar os tipos de energia em cada processo e o rendimento de etanol que estão detalhadas nesta pesquisa (Quadro 1).

Quadro 1 - Rendimento e tipos de energia no processo

País	China	Brasil
Energia do processo	Carvão mineral (LAREO et al., 2013; ZHANG et al., 2011;)	Biomassa e petróleo (CASTRO e EMYGDIO, 2008; SILVEIRA, 2008)
Rendimento de etanol	1 mg batata-doce gera 125 kg de etanol (LAREO et al. 2013; ZHANG et al., 2011).	1 mg batata-doce gera 130 a 160 litros etanol (CASTRO e EMYGDIO, 2008; SILVEIRA, 2008)

Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

A energia utilizada para o processo em cada país é diferente: a China usa como energia o carvão mineral e o processo brasileiro utiliza energia térmica de biomassa e o petróleo (LOEBENSTEIN e TROTTAPPILLY, 2009).

Nos processos analisados da China e Brasil, as enzimas: alfa amilase e amiloglucosidade e a levedura *Saccharomyces cerevisiae* são usadas nos dois países, porém com diferentes cepas. Neste caso existem melhoramento e adaptações desta, tanto cientificamente como tecnologicamente. As enzimas alfa amilase, amiloglucosidade e *Saccharomyces cerevisiae* tem como objetivo a realização do processo de fermentação, alcançando-se o biocombustível (LOEBENSTEIN e THOTTAPPILLY, 2009).

No estudo foi analisado o tipo de energia do processo produtivo entre os países. Na China o tipo de energia utilizado é o carvão mineral, muito usado para gerar energia em usinas de etanol. A China é considerada como uma das maiores produtoras deste combustível fóssil, com reservas carboníferas autossuficientes para produzir energia para aproximadamente 100 anos (CAO et al., 2011; LOEBENSTEIN e THOTTAPPILLY, 2009). No Brasil o tipo de energia utilizado nos processos é a biomassa encarregada por aproximadamente 10% da eletricidade consumida no país e usada também como uma energia relevância no desenvolvimento de novas alternativas energéticas e o petróleo considerado a principal fonte de energia no país (SILVEIRA, 2007; SILVEIRA et al., 2008; SILVEIRA, 2008).

O rendimento de etanol nos processos produtivos dos três países, variou conforme o teor de amido. Na China aproximadamente 1 megagrama de batata-doce produz 125 kg de etanol, foi utilizado para calcular o rendimento o peso 125 kg do etanol dividido pela densidade do etanol (0,789). O rendimento do processo produtivo do etanol chinês foi estimado em 15,84% (CAO et al., 2011).

No Brasil aproximadamente 1 megagrama de batata-doce produz aproximadamente 160 litros de etanol, com rendimento do processo produtivo do etanol brasileiro foi estimado entre 13 a 16% (SILVEIRA, 2007, SILVEIRA et al., 2008).

Com uma geração relevante, a China se destaca com estudos usando a batata-doce como matéria-prima para a geração de etanol. O quadro abaixo apresenta dados sobre o processo chineses usando a batata-doce como substrato (Quadro 2).

Quadro 2 - Estudos chineses usando a batata-doce como substrato

Estudos chineses usando a batata-doce como substrato	Referência
Sacarificação e fermentação de amido de batata-doce para a geração de etanol.	ZHANG et al., 2013
A eficiência energética dos impactos ambientais e ciclo de vida na geração de etanol de batata-doce	WANG, 2011
A caracterização físico-química de amidos de batata-doce usado na indústria.	ABEGUNDE et al., 2013
Comparação do desempenho da geração de etanol em 10 variedades de batata-doce em etapas distintas de crescimento.	JIN et al., 2012
Sacarificação e fermentação simultâneas de batata-doce para a geração de etanol.	CAO et al., 2011
Aplicação de sacarificação e fermentação simultâneas (SSF) na redução da viscosidade da batata-doce.	ZHANG et al., 2011
Mudanças nos compostos voláteis de batata-doce no processo de fermentação.	CUI et al., 2010

Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

Na China o processo de sacarificação e fermentação para a geração de etanol de batata-doce é simultâneo, no Brasil é separado, o processo de sacarificação por hidrólise enzimática ocorre antes do processo de fermentação. A China também se destaca com estudos usando a batata-doce como matéria-prima para a geração de etanol, como na caracterização físico-química de amidos usada na indústria. Detectou-se uma diversidade em diâmetros médios e tamanhos em várias cultivares de batata-doce, e isto varia conforme a sazonalidade e períodos de colheita (ABEGUNDE et al., 2013).

A eficiência energética dos impactos ambientais na geração de etanol de batata-doce (WANG, 2011), a caracterização físico-química de amidos de batata-doce usado na indústria (ABEGUNDE et al., 2013); a comparação do desempenho da geração de etanol em 10 variedades de batata-doce em etapas distintas de

crescimento (JIN et al., 2012); o processo de sacarificação e fermentação simultâneas (SSF) de batata-doce para a geração de etanol (ZHANG et al., 2011; CAO et al., 2011), o uso do processo de sacarificação e fermentação simultâneas (SSF) na redução da viscosidade da batata-doce (ZHANG et al., 2011); e as mudanças nos compostos voláteis de batata-doce no processo de fermentação (CUI et al., 2010). Dados sobre o processo de produção de etanol de batata-doce com as condições do processo e os processos utilizados entre o Brasil e a China (Quadro 3).

Quadro 3 - Processo de produção de etanol de batata-doce

País	Processo utilizado	Condições do processo	Referência
China	Pré-sacarificação (cozimento), sacarificação e fermentação simultâneas	amilase, convertendo em maltose e dextrina. 50 °C/ 2 h, pH: 4,5 - 4,8 e amilase: 6,4 mL	CAO et al., 2011
		Enzimas: α-amilase e glucoamilase pH: 5; 30 °C. Glucoamilase: 1,6 AGU* g ⁻¹ e α-amilase: 0,12 KNU g ⁻¹ e tempo entre 0 a 3 horas.	ZHANG et al., 2011; SURMELY, 2003
	Hidrólise enzimática	Temperatura de 85 °C e pH 5,2	JIN et al., 2012
Brasil	Hidrólise enzimática	Pré-sacarificação: 94 °C/2h. Sacarificação: 60 °C/1h; pH:5	PAVLAK et al., 2011; SANTANA et al., 2013
		Liquefação: 90 °C/ 1h; Sacarificação: 60 °C/1h, pH: 5; <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	SOUZA, 2005

* AGU: concentração de enzima indispensável para o processo de hidrólise em 1 micromol de maltase por minuto

Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

No Brasil, praticamente quase todo o parque industrial é focado para a geração de etanol a base de cana-de-açúcar. O processo industrial para a obtenção do etanol no Brasil é o processo de sacarificação por hidrólise enzimática e após ocorre o processo de fermentação. O processo de pré-sacarificação ocorre com uma temperatura de 94 °C por 2 horas e o processo de sacarificação com temperatura de 60 °C por 1 hora, o consumo de energia é menor em comparação ao processo mencionado por Souza (2005); processo de pré-sacarificação ocorre com uma temperatura de 90 °C por 1 hora e o processo de sacarificação com temperatura de 60 °C por 1 hora (SANTANA et al. 2013; PAVLAK et al. 2011; SOUZA, 2005). O processo industrial do Brasil utiliza a

hidrólise enzimática e a fermentação (SOUZA, 2005). Na China o processo de sacarificação e fermentação são simultâneas (CAO *et al.* 2011; ZHANG *et al.* 2011).

As diferenças encontradas na literatura no processo industrial brasileiro é o uso de hidrólise enzimática com o processo de pré-sacarificação a uma temperatura de 94 °C por 2 horas e sacarificação a 60°C por 1 hora (PAVLAK *et al.* 2011; SANTANA *et al.* 2013) e o processo de pré-sacarificação ocorre a uma temperatura de 90 °C por 1 hora e sacarificação a 60 °C por 1 hora (SOUZA, 2005).

RENDIMENTOS DOS PAÍSES ANALISADOS

A produção de uma cultura é com base em processos químicos, físicos, biológicos e fisiológicos, sendo estes determinados pelos parâmetros ambientais, como água, clima e o solo e por fatores genéticos. Neste contexto, novas cultivares vem sendo estudadas com o objetivo de se obter plantas de alta produtividade, apresentando raízes tuberosas com elevadas concentrações de amido, procurando o uso energético da cultura para a geração de etanol (DIAS, 2010).

Brasil

Em pesquisas realizadas no sul do Brasil, identificou-se valores de consumo de água na cultura do milho entre 393 até 735 mm ao longo e todo o ciclo da cultura (KÖPP *et al.*, 2015). Os valores médios por ciclo do milho estão em 650 mm, e esta pesquisas foi realizada por sistemas híbridos convencionais. Pesquisas com milho crioulo são em baixo número, pois são encontrados somente com pequenos agricultores. No Brasil, de maneira geral, a pesquisa é voltada para o agronegócio (BERGAMASCHI, 2006).

A disponibilidade hídrica é um aspecto fundamental na obtenção de altas produtividades da cultura do milho, normalmente cultivado em áreas com precipitação varia de 300 a 5.000 mm anuais, pois a quantidade de água consumida por uma planta de milho ao longo do seu ciclo está aproximadamente em 600 mm. Apenas dois dias de “stress” hídrico no florescimento, reduzem o rendimento em acima de 20%, e entre quatro a oito dias reduzem em cerca de 50% (ALVES *et al.*, 2013).

O rendimento do milho em sistemas de plantio exclusivo e consorciado na região semiárida do Nordeste brasileiro, demonstrou uma lâmina de irrigação correspondente a 125% da evapotranspiração de referência (ET_o) produziu valores de produção de 3.860,0 kg ha⁻¹ e de 3.476,67 kg ha⁻¹ para as lâminas totais de 499,1 mm e 558,3 mm em sistemas de plantios exclusivo e consorciado (SOUZA, 2005).

Em pesquisas realizadas na região produtora de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, todas as atividades de demanda hídrica, aspectos edafoclimáticos são fundamentais para realizar os cálculos sobre a necessidade hídrica de cada cultura, com valores de consumo de água de 1780 mm por ciclo (TEODORO et al., 2009). Os parâmetros locais são essenciais para a determinação da produção da cultura da cana-de-açúcar e os valores do seu coeficiente de cultivo sugeridos pela FAO, não são adequados para as regiões tropicais, com valores de 1686 mm por ciclo (SILVA et al., 2014).

Pesquisas sobre duas variedades de batata-doce analisou o ambiente controlado, o consumo de água variando até 450 mm por ciclo. O consumo de água médio para a cultura da batata-doce é de 500 mm por ciclo, o estudo avaliou 10 variedades na região central do Brasil. (SILVEIRA et al., 2008). A demanda hídrica da batata-doce é de cerca de três vezes menor que a da cana-de-açúcar em relação a produtividade de etanol pelo volume de água consumida ao longo do ciclo das culturas (DIAS, 2010).

A batata-doce demonstra uma ótima geração de biomassa para se obter álcool combustível, vinculada com o baixo custo de rusticidade e geração (SILVEIRA, 2008). Em média a cultura da batata doce produz de 120 a 199 litros de etanol por megagrama de raiz, e levando em consideração a produção da raiz, se obteve entre 4615 até 10467 litros de etanol por hectare com a batata-doce (SILVEIRA, 2007). Pesquisas realizadas no Uruguai os valores de rendimento de etanol de batata-doce de 2990 a 4790 litros por hectare (LAREO e FERRARI, 2019).

A geração de etanol na cana-de-açúcar é estimada em 90 litros por megagrama e considerando as características produtivas, existe a possibilidade de produzir 6000 litros de etanol por hectare (SOCCOL et al., 2010).

A cultura do milho demonstra uma capacidade para gerar até 400 litros de etanol por megagrama, tendo em consideração a média do Brasil, se pode gerar aproximadamente 2500 litros por hectare de etanol. Estas culturas apresentam subprodutos e fatores específicos de geração que necessitam serem considerados no processo de produção do biocombustível (MANOCHIO et al., 2017). Importante salientar que cada cultura demonstra necessidades e características específicas.

China

A hidrólise enzimática do amido e a geração de etanol a partir de uma variedade de batata-doce desenvolvida para a bioenergia apresentam altos rendimentos de amido. O processo de secagem da batata-doce ocorreu com uma temperatura entre 55 °C a 95 °C, não afetou o teor de açúcar e a eficiência da hidrólise enzimática do amido (LAREO e FERRARI, 2019).

O processo de sacarificação e fermentação simultânea do etanol para a razão de matéria seca de batata-doce em água foi de aproximadamente 1:8 a 1:2 (p/v). Uma avaliação da batata-doce fresca apresentou concentrações de etanol entre 38 a 45 g L⁻¹, com um tempo de fermentação de 16 horas e conversão de açúcar praticamente 100%. Os altos rendimentos de etanol foram encontrados para condições de gravidade muito alta (VHG). A batata-doce chinesa é considerada uma matéria-prima atraente para o etanol combustível, pois é possível obter até 4800 litros de etanol por hectare (LAREO e FERRARI, 2019).

A batata-doce na China é vista como um substrato promissor para a fermentação do bioetanol, com um alto rendimento de amido por unidade de terra cultivada em relação a lignocelulose, e os açúcares fermentáveis estão intimamente correlacionados com o teor de amido (LEE et al., 2012). A cultura da batata-doce tem diversos benefícios, como o crescimento em terras não tradicionais, a tolerância à solução salina-alcálica, a resistência à seca e a capacidade de crescimento em solos considerados pobres (XU et al., 2003; HUANG et al., 2006). O teor de amido de batata doce em seus tubérculos é estimado em 20% a 30%, tendo como base úmida, fazendo dos tubérculos uma fonte ideal de açúcares fermentáveis para várias utilizações e aplicações (ZHANG et al., 2011). Síntese comparativa entre a batata-doce na China e no Brasil (Tabela 1).

Tabela 1 - Características da batata-doce China e Brasil

Aspectos analisados	China	Brasil
População em milhões de habitantes	1394	210
Área agrícola per capita (ha)	0,1	1,8
Produção de batata-doce por ano (milhões de megagramas)	118	0,5
Quilograma batata-doce per capita	88.7	2,7
Área plantada (1000 ha)	6000	44
Ração animal (% total)	42%	Muito pouco
Amido e derivados (% total)	34%	Muito pouco
Consumo <i>in natura</i> (% total)	27%	Praticamente 100%
Quilograma <i>in natura</i> per capita	23%	2,7

Fonte: SILVA et al., 2019; LEE et al., 2012 ; ZHANG et al., 2011

O quadro foi construído para descrever sobre o potencial da batata-doce entre os países analisados. A produção do Brasil de aproximadamente 0,5 milhões de megagramas de batata-doce por 44 hectares retrata como uma cultura negligenciada, pois apresenta um enorme potencial. A produção chinesa é aproximadamente 7 vezes maior que a brasileira, retrata aproximadamente 200 vezes a geração do Brasil de batata-doce, ocupando uma área plantada de aproximadamente 6 milhões de hectares plantados anual. A produção brasileira de cana-de-açúcar ocupa uma área plantada de aproximadamente 7,8 milhões de hectares.

Na China a área de plantação com a batata-doce está estimada em 1/3 da área de plantação, com estimados 2 milhões de hectares. Aproximadamente 80% destes números poderiam ser alcançados via rotação com a cana-de-açúcar, por meio da renovação de canaviais em cada 5 anos, e essa geração teria como destino a produção dos biocombustíveis. A produção média de 40 megagramas por hectare de raízes e 50 megagramas por hectare em matéria verde, possibilitam serem atingidos com clones melhorados já existentes e com implantação de práticas na agricultura adequadas. Estes números poderiam ser atingidos em um prazo médio de 4 a 6 anos, mas o potencial da cultura da batata-doce é ainda maior, com clones geram aproximadamente 100 milhões de megagramas por hectare (LIMA e SILVA, 2019).

CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo analisar os processos produtivos de transformação do amido em etanol existentes da batata-doce no Brasil e China, desde a recepção da biomassa até o embarque do etanol. As práticas existentes

de qualificar as etapas do processo produtivo para transformar o amido em etanol foram analisadas e discutidas mediante uma revisão teórica de literatura.

O processo produtivo de transformação do amido em etanol é composto por 6 etapas de produção, desde a entrada da batata-doce, passando pela lavagem – redução do tamanho dos grãos (moagem) – sacarificação – fermentação – destilação – desidratação, até a obtenção do etanol, e do farelo proteico. No cenário global, as práticas de transformação do amido de etanol de batata-doce estão concentradas em aplicações industriais, publicações acadêmicas em periódicos e websites de fabricantes.

Identificou-se na literatura que o processo de transformação do etanol chinês, a sacarificação e fermentação são simultâneas. A China também se destaca com estudos usando a batata-doce como matéria-prima para a geração de etanol, como na caracterização físico-química de amidos de batata-doce usado na indústria. O processo industrial no Brasil de etanol a base de batata-doce, utiliza o processo de sacarificação por hidrólise enzimática, depois ocorre o processo de fermentação, destilação até a obtenção do etanol. No Brasil praticamente quase todo o parque industrial é focado para a geração de etanol a base de cana-de-açúcar. O processo de fermentação no estado sólido (FES) gerou um complexo enzimático por meio da atividade amilolítica, e atividades de enzima acessórias, capacitadas para hidrolisar praticamente todo o amido na forma granular (não gelatinizado). O processo industrial de sacarificação e fermentação simultâneas (SSF) demonstrou dispensar a dependência de esterilização, peneiramento ou moagem da matéria-prima, ajuste de pH e qualquer adição de fonte de nitrogênio. O processo de sacarificação e fermentação simultâneas (SSF) apresentou vantagens em aspectos de rendimento, e vantajoso em aspectos econômicos.

A origem da energia nos processos de transformação é diferente no Brasil e na China, o que pode levar a balanços energéticos e ambientais diferentes. O processo de transformação em etanol de amido da batata-doce apresenta-se como robusto, e as variedades na qualidade final das culturas podem influenciar no rendimento do etanol durante o processo produtivo.

Esta análise demonstrou os potenciais impactos reduzidos em termos da sustentabilidade, como a utilização das práticas adequadas ambientalmente na planta industrial, os comportamentos ambientais amigáveis ao meio ambiente

podem se tornar vantajosos, como mitigar fatores de mudanças climáticas e combustível proveniente de fonte renovável.

As contribuições desta pesquisa podem ser direcionadas em redução de custos com energia e na eficiência operacional, redução no desperdício de insumos e possibilidade de investimentos a médio e longo prazo podem ser viáveis financeiramente. Fatores como a eficiência dos equipamentos que compõem o processo produtivo na transformação do etanol de amido da batata-doce, vantagens econômicas e competitivas podem surgir. O aporte destina-se à geração de renda, atividades remuneradas e uso de tecnologias limpas, proporcionando oportunidade para o desenvolvimento econômico, social e ambiental.

Technologies in the production of sweet potato ethanol: study of processes between Brazil and China

ABSTRACT

Currently, one of the world's concerns, including Brazil, is to obtain answers to reduce energy dependence on fossil fuels. Geopolitics and negative environmental results, caused by the use of fossil fuels, have boosted studies for the generation of alternative technologies in renewable biofuels. *Ipomoea potatoes L. (Lam.)* is seen as an alternative raw material in the generation of ethanol, as it demonstrates a short production cycle. Therefore, this research intends to analyze the productive processes of transformation of starch into ethanol existing in sweet potatoes in Brazil and China, from the reception of biomass to the shipment of ethanol. Based on the characteristics of the study that were mentioned, for bibliographic research, scientific articles and websites were used as data sources. The results analyzed the industrial processes for transforming sweet potato ethanol. In Brazil, the saccharification process occurs by enzymatic hydrolysis, then the fermentation process occurs. China's process energy uses mineral coal as energy, and the Brazilian process uses biomass thermal energy and oil. These differences in industrial processes can generate different energy and environmental balances.

KEYWORDS: Sustainability; Bioenergy; Biofuel; Industrial System.

REFERÊNCIAS

- ABEGUNDE, O. K. et al. Physicochemical characterization of sweet potato starches popularly used in Chinese starch industry. **Food Hydrocolloids**, n. 33, p. 169-177, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.03.005>
- ALVES, V. B. et al. Milho safrinha consorciado com *Urochloa ruziziensis* e produtividade da soja em sucessão. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 12, n. 3, p. 280-292, 2013. <https://doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v12n3p280-292>
- BERGAMASCHI, H. Deficit hídrico e produtividade na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, n.2, p.243-249, 2006. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2006000200008>
- BERNARDO NETO, O. **Integração das principais tecnologias de obtenção de etanol através do processamento de celulose (2ª geração) nas atuais usinas de processamento de cana-de-açúcar (1ª geração)**. 2009. 137 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Área de Concentração em Engenharia de Sistemas) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, 2009.
- BONILLA, E. B. P.; BRAGA, C. A. S.; BRAGA, M. J. Diversificação agropecuária no Brasil: Conceitos e aplicações em nível municipal. **Revista de economia e agronegócio**, v. 18, n. 2, 2020. <https://doi.org/10.25070/rea.v18i1.9501>
- CAO, Yinxu et al. Simultaneous saccharification and fermentation of sweet potato powder for the production of ethanol under conditions of very high gravity. **Frontiers of Chemical Science and Engineering**, v. 5, n. 3, p. 318-324, 2011. <https://doi.org/10.1007/s11705-010-1026-3>
- CASTRO, L. A. S. de.; EMYGDIO, B. M. Batata-doce para produção de biocombustível. Artigo em Hypertexto. Disponível em:< www.infobibos.com/Artigos/2009_4/BatataDoce/index.htm>. Acesso em 2 jul. 2020.
- CRESWELL, J. W. **Projeto de pesquisa: métodos qualitativo, quantitativo e misto**. Porto Alegre: Artmed, 2007.
- COELHO, N. S. et al. A biodegradabilidade da blenda de poli(β -hidroxibutirato-covalerato)/amido anfótero na presença de microrganismos. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 18, n. 3, p. 270-276, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0104-14282008000300014>

CUI, L., LIU, C., LI, D. Changes in volatile compounds of sweet potato tips during fermentation. **Agricultural Sciences in China**, v. 9, p. 1689-1695, 2010.
[https://doi.org/10.1016/S1671-2927\(09\)60267-4](https://doi.org/10.1016/S1671-2927(09)60267-4)

DIAS, L. Culturas bioenergéticas para a produção de etanol. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, p. 10-15, 2010.

EISENHARDT, K. M. Building theories from case study research. **Academy of Management Review**, v. 14, n. 4, p. 532-550, 1989.
<https://doi.org/10.5465/amr.1989.4308385>

EIA, 2020. Country analysis executive summary: China. Disponível em:<
https://www.eia.gov/international/content/analysis/countries_long/China/china.pdf> Acesso em 28 dez. 2021.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional, 2018. Disponível em:< <http://epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2018>> . Acesso em 2 dez. 2020.

GODOI, C. K.; MATTOS, P. L. de. **Entrevista qualitativa: instrumento de pesquisa e evento dialógico**. In: GODOI, C.K.; BANDEIRA-DE-MELLO, R.; BARBOSA DA SILVA, A. (Org.). Pesquisa qualitativa em estudos organizacionais. São Paulo: Saraiva, 2006.

GOYAL, K. et al. Dehydration-induced tps gene transcripts from an anhydrobiotic nematode contain novel spliced leaders and encode atypical GT-20 family proteins. **Biochimie**, v. 87, n. 6, p. 565-574, 2005.
<https://doi.org/10.1016/j.biochi.2005.01.010>

GUPTA, P. et al. Microbial α -amylases: A biotechnological perspective. **Process Biochemistry**, v. 38, n. 11, p. 1599-1616, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(03\)00053-0](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(03)00053-0)

IEA. **World Energy Outlook**. Disponível em:<<https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2019.pdf>> Acesso em 13 dez.2020.

JIN, Y. et al. Comparison of ethanol production performance in 10 varieties of sweet potato at different growth stages. **Acta Oecologica**, n. 44, p. 33-37, 2012.
<https://doi.org/10.1016/j.actao.2012.05.008>

KAIFENG SIDA. **Starch Processing Line**. 2020. Disponível em:<
<http://cnstarchmachine.com/starch-processing-machine-line>>. Acesso em 10 dez. 2020.

LAREO, Claudia; FERRARI, Mario D. **Sweet potato as a bioenergy crop for fuel ethanol production: perspectives and challenges**. In: Bioethanol Production from Food Crops. Academic Press, 2019. p. 115-147. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813766-6.00007-2>

LAREO, C. et al. Evaluation of sweet potato for fuel bioethanol production: hydrolysis and fermentation. **Springerplus**, v. 2, n. 1, p. 493, 2013. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-493>

LEE, Pin-Rou et al. Effects of sequentially inoculated *Williopsis saturnus* and *Saccharomyces cerevisiae* on volatile profiles of papaya wine. **Food Research International** , v. 45, n. 1, p. 177-183, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.10.011>

LIMA E SILVA, Luis Felipe et al. Energy and budget balances for sweet potato-based ethanol production. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** , v. 54, p. 1-9, 2019. <https://doi.org/10.1590/s1678-3921.pab2019.v54.26521>

LOEBENSTEIN, Gad. **The sweetpotato** , Gad Loebenstein: George Thottappilly editors. 2009. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9475-0>

MACHADO, C. M. M.; ABREU, F. R. E. Produção de álcool combustível a partir de carboidratos. **Revista de Política Agrícola** , v. 3, n. 15, p.64-78, 2006.

MALUF, W. R.; AZEVEDO, S. M.; CAMPOS, V. P. Heritability of root-knot nematode (*Meloidogyne spp.*) resistance in sweet potatoes. **Journal of Genetics and Breeding** , v. 50, p. 161-165, 1996.

MANOCHIO, C. et al. Ethanol from biomass: A comparative overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** , v. 80, p. 743-755, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.063>

MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Culturas- Brasil: Produtividade média de Lavouras Temporárias e Permanentes. Disponível em:< <http://www.agricultura.gov.br>>. Acesso 05 ago. 2020.

MARTINS, E. C. A. et al. Variabilidade fenotípica e divergência genética em clones de batata doce no estado do Tocantins. **Revista Ciência Agronômica** , v. 43, n. 4, p. 691-697, 2012. <https://doi.org/10.1590/S1806-66902012000400010>

MUSSOLINE, Wendy A. et al. Agronomic productivity, bioethanol potential and postharvest storability of an industrial sweetpotato cultivar. **Industrial Crops and Products** , v. 95, p. 96-103, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.10.013>

MUSSOLINE, Wendy A.; WILKIE, Ann C. Feed and fuel: the dual-purpose advantage of an industrial sweetpotato. **Journal of the Science of Food and Agriculture** , v. 97, n. 5, p. 1567-1575, 2017. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7902>

NEGRÃO, L. C. P.; URBAN, M. L. P. Álcool como “commodity” internacional. **Economia e Energia**, n. 47, p. 8 -18, 2005.

OWD, 2020. Global Greenhouse Gas Emissions by Sector [WWW Document]. Emiss. by Sect. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/emissions-by-sector>>. Acesso em 28 dez. 2021.

PAVLAK, M. C. M.; ABREU-LIMA, T. L.; CARREIRO, S. C. Estudo da fermentação do hidrolisado de batata-doce utilizando diferentes linhagens de *Saccharomyces cerevisiae*. **Química Nova**, v. 34, n. 1, p. 82-86, 2011.
<https://doi.org/10.1590/S0100-40422011000100016>

PELLEGRINI, Lorenzo et al. Institutional mechanisms to keep unburnable fossil fuel reserves in the soil. **Energy Policy**, v. 149, p. 112029, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.112029>

PIMENTEL, D., PATZEK, T. W. Ethanol production using corn, switchgrass, and wood; biodiesel production using soybean and sunflower. **Natural Resources Research**, v. 14, n. 1, p. 56- 76, 2005. <https://doi.org/10.1007/s11053-005-4679-8>

SOCOL, C. R. et al. Bioethanol from lignocelluloses: Status and perspectives in Brazil. **Bioresource Technology**, v. 101, p.4820- 4825, 2010.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.067>

SANTANA, W. R. et al. Identificação agronômica de genótipos de batata-doce em banco de germoplasma para fins industriais de etanol carburante. **Tecnologia & Ciência Agropecuária**, v. 7, n. 1, p. 31-34, 2013.

SILVA, M. de A. et al. Potencial produtivo da cana-de-açúcar sob irrigação por gotejamento em função de variedades e ciclos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 3 p. 241-249, 2014.
<https://doi.org/10.1590/S1415-43662014000300001>

SILVEIRA, M. A. et al. **A cultura da batata-doce como fonte de matéria-prima para o etanol**. Boletim Técnico UFT. Palmas: UFTO, 2008. 38 p.

SILVEIRA, M.A. (Coord.). **Cultura da batata-doce como fonte de matéria-prima para o etanol**. Palmas: UFTO, 2007. 64 p.

SOBRINHO, Oswaldo Palma Lopes et al. A cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) e o manejo da irrigação. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 12, n. 4, p. 1605-1625, 2019. <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2019v12n4p1605-1625>

SOUZA, A. F. B. C. **Avaliação do processo de hidrólise e fermentativo de biomassa de batata-doce (*Ipomoea batatas* (L.) Lam) por meio de células**

imobilizadas para produção de etanol. 2005. 91 p. Dissertação (Mestrado em Ciências do Ambiente) – Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2005.

TEODORO, I. et al. Crescimento e produtividade da cana-de-açúcar em cultivo de sequeiro nos tabuleiros costeiros de Alagoas. **STAB**, v. 27, n. 4, p. 46-49, 2009.

WANG, Z. Application of simultaneous saccharification and fermentation (SSF) from viscosity reducing of raw sweet potato for bioethanol production at laboratory, pilot and industrial scales. **Bioresource Technology**, n. 102, p. 4573-4579, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.12.115>

ZANARDI, M. S.; COSTA JUNIOR, E. F. Tecnologia e perspectiva da produção de etanol no Brasil. **Revista Liberato**, v. 17, n. 27, p. 01-118, 2016. <https://doi.org/10.31514/rliberato.2016v17n27.p20>

ZHANG, Liang et al. Application of simultaneous saccharification and fermentation (SSF) from viscosity reducing of raw sweet potato for bioethanol production at laboratory, pilot and industrial scales. **Bioresource technology**, v. 102, n. 6, p. 4573-4579, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.12.115>

ZHANG, Peng et al. Starch saccharification and fermentation of uncooked sweet potato roots for fuel ethanol production. **Bioresource technology**, v. 128, p. 835-838, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.10.166>

ZHANG, Jun et al. Life cycle energy efficiency and environmental impact assessment of bioethanol production from sweet potato based on different production modes. **PLoS One**, v. 12, n. 7, p. e0180685, 2017. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0180685>

ZHOU, Weijian et al. Fossil fuel CO₂ traced by radiocarbon in fifteen Chinese cities. **Science of the Total Environment**, v. 729, p. 138639, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138639>

Recebido: 22 mar. 2021

Aprovado: 28 dez. 2021

Publicado: 30 dez. 2021.

DOI: 10.3895/rbta.v15n2.13969

Como citar:

FRANCO, A. C.; FRANCO, L. S. Tecnologias na produção de etanol de batata-doce: estudo de processos entre Brasil e China **R. bras. Tecnol. Agroindustr.**, Francisco Beltrão, v. 15, n. 2, p. 3724-3748, jul./dez. 2021. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/rbta>>. Acesso em: XXX.

Correspondência:

Antonio Carlos Franco

Rua Doutor Washington Subtil Chueire, 330, Jardim Carvalho, Ponta Grossa- PR, Brasil. CEP: 84017-220

Direito autorial: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

