

Avaliação do efeito da irradiação micro-ondas no caldo de cana-de-açúcar como tratamento preliminar para produção de açúcar e etanol

José Waldir de Sousa Filho¹, Marlei Barboza Pasotto¹, Nelson Diniz Velasco², Mônica Hitomi Okura¹

Abstract: The use of non-thermal irradiation technologies such as microwave may simplify the process of sugarcane juice clarification. Thus, the aim of this study was to purify sugarcane juice by microwave radiation in order to produce sugar and ethanol. The results were submitted to analysis of variance (ANOVA) followed by Tukey test with significance level 0.05. As regards the original and processed material it was analyzed for: turbidity, color, total soluble solids (Brix) and pH, as well as microbiologically. The results showed that the microwave in the tested conditions did not promote the sugarcane juice clarification and, also, it had a significant increase in ° Brix.

Keywords: Clarification, sugarcane juice, microwave.

¹ Programa de Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, 38064-200 Uberaba – MG, Brasil.

² Departamento de Engenharia Química, Universidade de Uberaba, 38055-500 Uberaba – MG, Brasil

INTRODUÇÃO

A indústria sucroalcooleira tem como produtos duas *commodities* que são relevantes para a balança comercial brasileira – açúcar e etanol. O açúcar como produto alimentício tem marcante papel na história do Brasil. O etanol, por ser um combustível oriundo de fontes renováveis de energia, é um produto da nova era da sustentabilidade, sendo reconhecido pelas vantagens ambientais, sociais e econômicas; no Brasil a matéria-prima predominante é a cana-de-açúcar (MELQUIADES *et al.*, 2012).

A busca por redução de custo e aumento de produtividade no processo industrial para produção de combustíveis renováveis tem sido foco da inovação tecnológica no setor sucroalcooleiro (ALKASRAWI; JRAI; AL-MUHTASEB, 2013). A necessidade de prover a sustentabilidade da produção de etanol da cana-de-açúcar tem sido intensificada no Brasil para otimizar o processo com relação aos resíduos e subprodutos, proporcionando ganhos ambientais (MORAES *et al.*, 2013). Além disso, o etanol se faz presente como um biocombustível com potencial para reduzir os efeitos no aquecimento global, uma vez que a mitigação na emissão de gases de efeito estufa se tornou objeto de importância mundial devido aos efeitos na alteração climática (SUN; FUJIMOTO; MINOWA, 2013).

A indústria sucroalcooleira utiliza métodos de purificação para obter o produto final. O processo de clarificação do caldo de cana durante a produção do açúcar e álcool é realizado utilizando-se um ou mais agentes químicos como leite de cal e anidrido sulfuroso; envolve aquecimento, decantação e filtração a vácuo do resíduo decantado (NOGUEIRA; VENTURINI FILHO, 2007). Dessa maneira, apresenta-se como um processo trabalhoso, que requer insumos, mão de obra e necessita de equipamentos específicos para cada etapa do tratamento.

Nesse contexto, a inovação dos métodos de tratamento do caldo de cana-de-açúcar é substancial para reduzir custo, otimizar a produção e não fomentar a geração de produtos danosos ao meio ambiente. Nesse ínterim justifica a purificação do caldo por métodos de irradiação, não térmicos, como as micro-ondas.

A irradiação micro-ondas cobre a região do espectro eletromagnético entre 1 mm e 1 m (Teixeira *et al.*, 2010). É classificada como agente não térmico de transmissão de calor, diferindo dos mecanismos usuais – condução, convecção e radiação como os raios infravermelhos. Com isso, é um processo seletivo para o tratamento de sucos, permitindo a manutenção de características como odor e sabor. Tem como substratos ideais as moléculas polares que são excitadas e acabam por romper suas ligações (CAVICCHIOLI; GUTZ, 2003). É uma alternativa que não gera resíduos, possui alta eficiência na redução do número de microrganismos e apresenta potencial para clarificar o caldo, reduzindo a turbidez e a coloração e conservando o teor de sacarose, principal objetivo do tratamento.

Dessa forma, os objetivos desse trabalho são purificar o caldo de cana-de-açúcar utilizando irradiação micro-ondas para produção de açúcar e etanol, além de identificar as melhores condições de operação – para ampliação de escala – pelo monitoramento dos parâmetros potência e tempo de exposição.

Setor sucroalcooleiro

A preocupação sobre a garantia no suprimento de petróleo e o negativo impacto que os combustíveis fósseis causam ao meio ambiente, particularmente a emissão de gases de efeito estufa, têm aumentado a pressão da sociedade pela busca de combustíveis renováveis (HANH-HÄNGERDAL *et al.*, 2006). Nesse contexto, o interesse global na produção e consumo de biocombustíveis – principalmente etanol e biodiesel – vem crescendo desde a virada do século (WALTER *et al.*, 2010). Em parte, esse interesse foi causado por preocupações ambientais devido à necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa (BALAT; BALAT; ÖZ, 2008; FURTADO; SCANDIFFIO; CORTEZ, 2010). Além da mitigação de emissões de carbono, a segurança energética e o desenvolvimento da agricultura são os principais condutores desse projeto bioenergético (TRIANA, 2011).

A conversão de biomassa em biocombustível representa uma importante opção tanto para exploração de fontes alternativas de energia como

para a redução de gases poluentes, tais como dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x) e enxofre (SO_x) (GHORBANI *et al.*, 2010). Biocombustíveis são originários de óleos vegetais, beterraba, cereais, resíduos orgânicos e processamento de biomassa (BALAT; BALAT; ÖZ, 2008). O combustível renovável mais comum hoje é o etanol, derivado de culturas como milho (amido) e cana-de-açúcar (sacarose). Quando o etanol é produzido seguindo essa rota, ele é classificado como biocombustível de primeira geração (GRAY; ZHAO; EMPTAGE, 2006; HANH-HÄNGERDAL *et al.*, 2006; SINGH; BISHNOI, 2012).

Todavia, a produção de etanol pode incluir outra fonte mais ampla de materiais com alto teor de lignina e celulose, como gramíneas perenes e resíduos agrícolas, lascas de madeira, cascas, ramos ou coprodutos como bagaço. Estas fontes são a base de biocombustíveis de segunda geração. À primeira vista, biocombustíveis de segunda geração são muito promissores, no entanto, a via tecnológica para atingir os açúcares incorporados na celulose é muito complexa e o custo ainda é restritivo para a implementação destas tecnologias em escala comercial (TRIANA, 2011).

O açúcar tem sido utilizado por séculos na produção de alimento; não somente como adoçante, mas também como ingrediente que confere cor, sabor e textura aos alimentos. A produção de açúcar no mundo é oriunda 70% de cana-de-açúcar e 30% de beterraba; na Europa esse percentual é de 98% vindo da beterraba. Na produção de açúcar bruto a partir de cana-de-açúcar, a sacarose é transformada a partir da forma solúvel na forma de cristais. Esse processo envolve as seguintes etapas: colheita de cana-de-açúcar, extração, purificação do sumo bruto, concentração e cristalização de sacarose (WOJTCZAK; BIERNASIAK; PAPIEWSKA, 2011).

Tratamento do caldo

Quantitativamente, o caldo de cana é constituído basicamente por água (80%) e sólidos totais dissolvidos (20%). Dos sólidos totais destacam-se os açúcares: sacarose (17%), glicose (0,4%) e frutose (0,2%); os não açúcares orgânicos, constituídos por substâncias nitrogenadas, gorduras, ceras, pectinas,

ácidos orgânicos e matérias corantes; e os não açúcares inorgânicos, representados pelas cinzas (OLIVEIRA *et al.*, 2007).

Oliveira *et al.* (2007) destacam que, por conter nutrientes orgânicos e inorgânicos, alta atividade de água, pH entre 5,0 e 5,5 e manter-se na temperatura de 25 a 30 °C, o caldo de cana constitui-se em ótimo substrato para o crescimento de grande e diversificada microbiota. Os microrganismos mais importantes em associação com o caldo são essencialmente aqueles oriundos do solo e dos vegetais, dentre os quais se destacam os fungos filamentosos e leveduriformes, e as bactérias lácticas e esporuladas.

Nas usinas, antes de ser levado às dornas de fermentação para produção do álcool ou aos cristalizadores para produção do açúcar, o caldo é direcionado ao pré-tratamento, que é um conjunto de etapas que culminam com a sua clarificação, removendo impurezas e substâncias nocivas ao processo (ARAÚJO, 2007). A clarificação do caldo de cana-de-açúcar ocorre por coagulação, floculação e precipitação dos coloides e de substâncias pigmentadas, que são eliminadas posteriormente por decantação e filtração. Floculação pode ser dirigida por mudança de pH, utilizando reagentes químicos, ou através de aquecimento (PRATI; MORETTI, 2009).

Os principais objetivos do processo de clarificação de remover coloides e partículas em suspensão, remover impurezas e aumentar o pH do caldo para minimizar a inversão da sacarose durante as etapas subsequentes do processo; incremento da pureza; separação dos não açúcares; separação de matérias estranhas como a terra, bagacilhos finos e outras substâncias solúveis que sejam prejudiciais e produzir um caldo limpo (DOHERTY, 2011; OLIVEIRA *et al.*, 2007).

A indústria do açúcar precisa encontrar métodos eficientes para clarear o caldo de cana-de-açúcar bruto, a fim de melhorar a qualidade do caldo clarificado e para reduzir ou eliminar o uso de produtos químicos. Clarificadores convencionais usam equipamentos pesados que conduzem a altos custos operacionais e a problemas ambientais associados (JEGATHEESAN *et al.*, 2008). A clarificação do caldo tem grande impacto no processo industrial, principalmente nos coeficientes de

transferência de calor nos evaporadores, na cristalização do açúcar, no rendimento do açúcar cru e na qualidade do refino (EGGLESTON; GRISHAM;

ANTOINE, 2009). A figura 3 traz a representação do tratamento convencional do caldo de cana-de-açúcar.

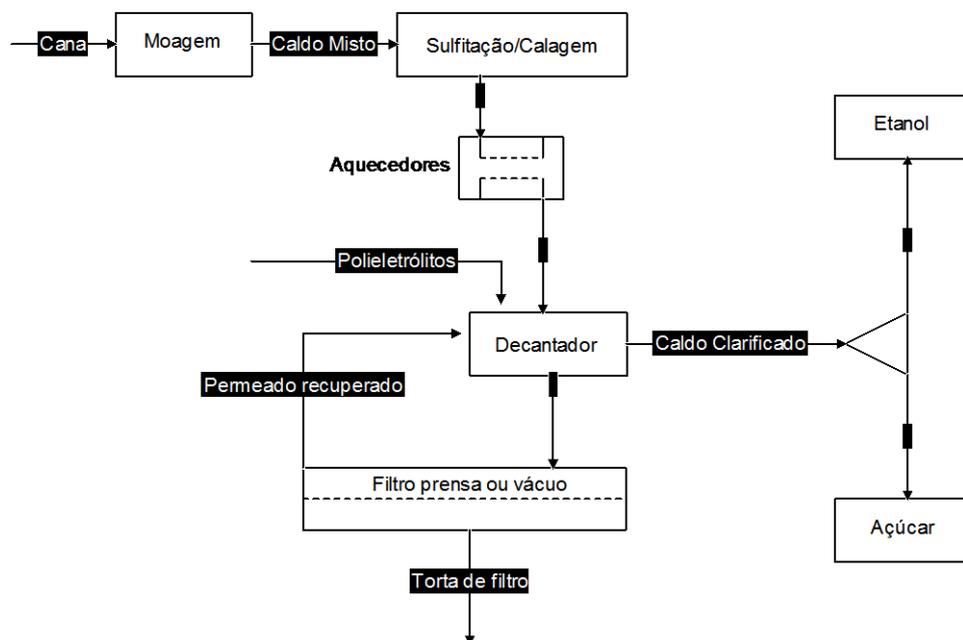


Figura 1 - Fluxograma do tratamento convencional do caldo

Micro-ondas

Jones *et al.* (2001) evidenciam que desde a Segunda Guerra Mundial tem havido grande desenvolvimento tecnológico no uso de micro-ondas para aplicações de aquecimento, pois, após esse período, percebeu-se que micro-ondas tem o potencial de prover rápida energia para aquecer os materiais. Souza e Miranda (2011) destacam que a tecnologia de irradiação de micro-ondas começou a ser desenvolvida na década de 40, possuindo um campo de aplicação bastante restrito, sendo utilizada principalmente na indústria de alimentos e polímeros. Menéndez (2009) acrescenta que, curiosamente, as aplicações industriais de micro-ondas foram iniciadas através dos fornos domésticos de micro-ondas.

Micro-ondas estão entre a radiação infravermelha e as rádio-ondas na região do espectro eletromagnético. Mais especificamente, são definidas como ondas com comprimento de onda entre 0,001 e 1 m que possuem frequência correspondente entre 300 e 0,3 GHz (APPELS *et al.*, 2012; DONG-LIANG *et al.*, 2008; MENÉNDEZ, 2009; ZIELINSKI *et al.*, 2007; ZIELINSKI; ZIELINSKA; DEBOWSKI, 2012). De acordo com Eskicioglu *et al.* (2007), micro-

ondas domésticos e geradores de micro-ondas industriais são geralmente operados na frequência de 2,45 GHz com comprimento de onda correspondente de 12,24 cm e energia de $1,02 \times 10^{-5}$ eV. Já Dong-Liang *et al.* (2008) apontam que, para fins industriais, as duas frequências mais comuns utilizadas são 0,915 e 2,45 GHz. Diferente dos tratamentos térmicos convencionais, em que calor lentamente penetra nas amostras através dos mecanismos de transferência de calor, a irradiação por micro-ondas utiliza energia eletromagnética para gerar calor que pode penetrar profundamente nas amostras (DONG-LIANG *et al.*, 2008). A energia de micro-ondas é transferida diretamente aos materiais através das suas interações moleculares com o campo eletromagnético. Aquecimento por micro-ondas é a transferência de energia eletromagnética em energia térmica (CHANDRASEKARAN; RAMANATHAN; BASAK, 2013).

A transformação da energia em calor ocorre simultânea e uniformemente ao longo de todo o volume do material quando se utiliza micro-ondas. A ação do campo elétrico da frequência de micro-ondas – que conduz ao aumento da temperatura em algumas

substâncias – é derivado das características dielétricas, ou seja, sua capacidade de conduzir eletricidade (ZIELINSKI; ZIELINSKA; DEBOWSKI, 2012). Aqueles materiais que absorvem irradiação micro-ondas são portanto chamados de dielétricos (TAHMASEBI *et al.*, 2011).

A extensão do aquecimento dielétrico é uma propriedade específica do material, que pode ser utilizada para ativar seletivamente sítios catalíticos específicos. Assim, as taxas de aquecimento muito mais elevadas podem ser atingidas com relação a quaisquer outros métodos e o aquecimento localizado oferece benefícios para o controle de processo (KRECH *et al.*, 2013).

Frequência, concentração, tempo de exposição e penetração da radiação são os principais fatores das micro-ondas que causam impacto no material dielétrico (APPELS *et al.*, 2012).

Os materiais podem ser classificados como absorvedores, condutores e isolantes de energia (TAHMASEBI *et al.*, 2011). Aqueles que interagem com as micro-ondas para produzir calor são chamados de absorventes de micro-ondas, ou materiais com alta perda dielétrica. Enquanto alguns materiais não possuem fatores que permitam a absorção de energia – são transparentes para micro-ondas, ou com baixa perda dielétrica. Excelentes absorvedores de micro-ondas são alguns óxidos inorgânicos e muitos materiais carbônicos. Por outro lado, os condutores elétricos refletem as micro-ondas, também denominados de opaco (CHANDRASEKARAN; RAMANATHAN; BASAK, 2013; KRECH *et al.*, 2013; MENÉNDEZ, 2009; SOUZA; MIRANDA, 2011). Outros fatores também afetam as micro-ondas, são eles: *design*, tamanho e geometria do forno; umidade, densidade e composição da amostra (CHANDRASEKARAN; RAMANATHAN; BASAK, 2013).

Comparado com os métodos térmicos convencionais, a irradiação micro-ondas têm muitas vantagens, tais como: não contato com a fonte de calor, transferência de energia e não de calor, rápido aquecimento, seletividade do material a ser aquecido, aquecimento de grandes volumes, início e cancelamento rápido, aquecimento do interior da

amostra e alto nível de segurança e automação na operação (MENÉNDEZ, 2009).

METODOLOGIA

Matéria-prima

O caldo de cana-de-açúcar *in natura* foi obtido comercialmente na cidade de Uberaba – MG proveniente da safra de 2013. Após extração, o caldo foi filtrado e acondicionado em vidros previamente esterilizados, sendo armazenados à temperatura de -15° C para conservação. Em todos os experimentos o volume utilizado foi de 50 mL.

Delineamento experimental

Para o delineamento experimental deste trabalho, foi utilizado o inteiramente casualizado com 4 repetições no esquema fatorial 3x3. Foram analisados dois fatores – potência e tempo de exposição. Tendo três níveis de variação cada um, foi atribuído (-1) para o menor nível e (+1) para o maior. Os dados foram submetidos à análise de variância, com o uso do teste F, que satisfizeram as pressuposições de independência, homocedasticidade e normalidade, seguido do teste de Tukey. O *software* utilizado para análise dos dados e para elaborar a matriz do planejamento experimental fatorial com pontos centrais, foi o STATISTICA 8.0 (Stat-Soft, Tulsa, OK, USA).

A homocedasticidade foi verificada pelo teste de Levene, enquanto a normalidade pelo teste de Kolmogorov-Smirnov. Para os dados que indicaram violação desses critérios para o uso da ANOVA foi utilizado o procedimento de transformação de dados; para as análises que continuaram a violar os critérios para ANOVA foi utilizado análise de variância não paramétrica, com a utilização do teste de Kruskal-Wallis. Para os casos em que o teste F apresentou significância, foi verificada a ocorrência de interação entre os fatores. O nível de significância adotado em todos os testes foi de 5%.

Unidade experimental – Micro-ondas

O equipamento utilizado na pesquisa foi um forno micro-ondas caseiro convencional, marca BRASTEMP Maxi, modelo BMS35ABHNA 30 L,

dimensões externas de altura, largura e profundidade de 300 x 539 x 420 mm. Possui potência variando de 0 a 900 W.

Procedimento experimental

As metodologias empregadas para as análises de turbidez, sólidos solúveis (°Brix), pH, e cor no caldo de cana-de-açúcar, descritas em Consecana (2006), foram baseadas nos métodos recomendados pela ICUMSA - *International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis*. No experimento laboratorial, foram realizadas análises físico-químicas e microbiológicas do caldo clarificado pelo método de micro-ondas. O caldo de cana-de-açúcar *in natura* foi analisado seguindo as mesmas metodologias do caldo clarificado.

Sólidos solúveis totais (°Brix)

°Brix é uma escala de graduação centesimal que corresponde ao teor de sacarose em soluções puras. Em se tratando de caldo de cana, que é uma solução impura de sacarose por conter outros sólidos dissolvidos, o teor de sacarose é aparente. Grau Brix corresponde, em termos práticos, à porcentagem em massa de sólidos solúveis no caldo (CONSECANA, 2006). Esta análise é essencial para expressar os resultados, pois permite que comparações sejam feitas sem possíveis influências de diluição ou concentração. As análises foram realizadas em refratômetro de bancada da INSTRUTHERM modelo RTA - 100.

Determinação de pH

A leitura do pH foi realizada em pHmetro digital HANNA *Instruments Brasil* modelo pH 21. O equipamento foi calibrado com soluções de calibração de pH 4,01 e 10,01.

Determinação de Turbidez

Por definição, turbidez é a interferência à passagem da luz através da água, causada por partículas insolúveis de solo, matéria orgânica, microrganismos e outros materiais, que desviam e/ou absorvem os raios luminosos que penetram na água (MAGALHÃES; FERREIRA; MORETTI, 2009). A medida da turbidez fornece uma ideia da eficiência da separação do material insolúvel e coloidal presente no

caldo de cana-de-açúcar. Maior intensidade de dispersão da luz representa maior turbidez. A leitura da turbidez dos caldos de cana-de-açúcar foi realizada em turbidímetro HANNA *Instruments Brasil* modelo HI - 93703. A unidade para turbidez é dada em Unidades Nefolométricas de Turbidez (NTU).

Determinação do índice de Cor ICUMSA

No setor sucroalcooleiro, a análise de cor é de grande importância econômica, haja vista que o melhor preço é conseguido para açúcares com menor valor de cor. Quanto mais baixo esse índice, mais claro ou mais branco é o açúcar. A medida de cor ICUMSA é a expressão do índice de absorvância de uma solução açucarada multiplicada por 1.000. O caldo de cana é primeiramente diluído a 1 °Brix. A leitura da absorvância foi realizada em espectrofotômetro BIOSPECTRO modelo SP-220 Luz UV e Visíveis faixa 200 a 1000 nm, com cubeta de quartzo de 1 cm a 420 nm, tendo água destilada como branco.

Determinação número de microrganismos – Fungos e Bactérias

Os métodos *pour plate* – ou semeadura por derramamento, disseminação ou método em profundidade – e *spread plate* – ou espalhamento – são métodos de contagem em placas. O método *pour plate* é aquele em que o meio nutritivo, ágar, é mantido no estado líquido a 50 °C, e é derramado sobre a placa de Petri contendo a amostra que é então misturada ao meio lentamente. Dessa forma, o microrganismo se desenvolve por todo o meio de cultura (TORTORA; FUNKE; CASE, 2010). Essa técnica pode ser realizada para se obter colônias isoladas ou para contagem de colônias em placa determinando o número de UFC (unidades formadoras de colônias) (OKURA; RENDE, 2008). A amostra original é submetida a uma série de diluições para reduzir suficientemente a população microbiana para obter colônias separadas quando plaqueadas (WILLEY; SHERWOOD; WOOLVERTON, 2008).

Os experimentos realizados foram para análise de fungos e bactérias. Para contagem de fungos foi utilizado o método *spread plate* tendo como meio de cultura o PDA – *potato dextrose ágar* – e para

contagem de bactérias os dois métodos *spread* e *pour plate*, utilizando meio de cultura – PCA – *plate count ágar*.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para °Brix, pH e Cor, que apresentaram distribuição normal, é possível realizar ANOVA. Embora a normalidade da variável dependente seja um requisito, os testes F realizados na ANOVA são robustos em relação a essa pressuposição (CALLEGARI-JACQUES, 2003; HAIR *et al.*, 2009).

Análises físico-químicas

°Brix

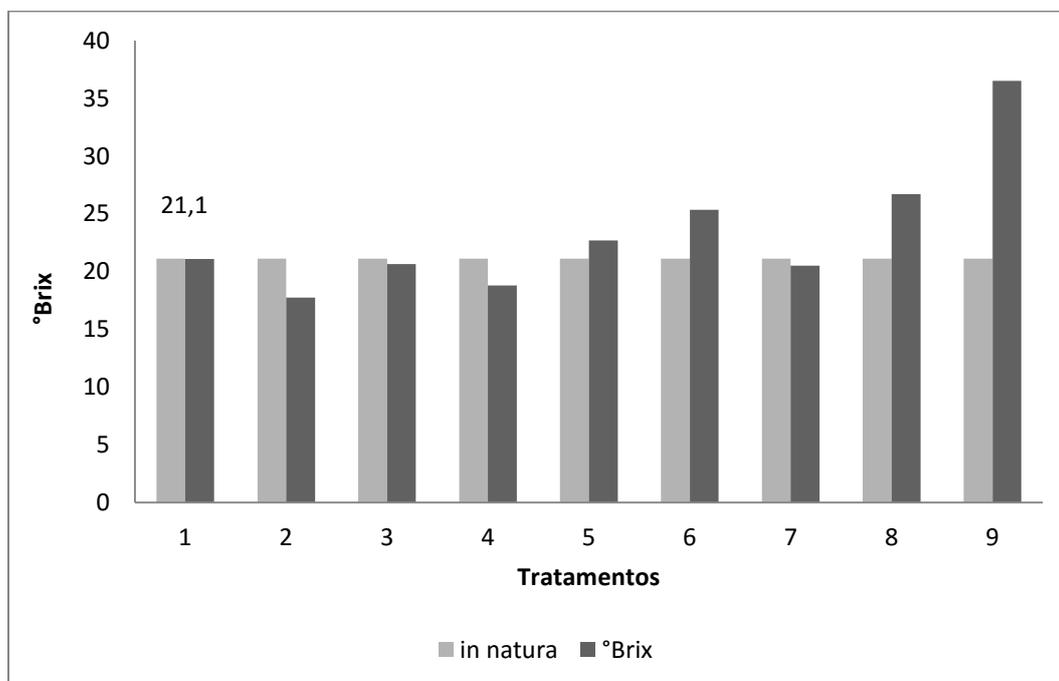


Figura 2. Média °Brix x tratamentos

O efeito dielétrico provocado pelas micro-ondas em moléculas polares como a água ocasiona o aquecimento dos materiais e a evaporação quando se excede a temperatura de ebulição da substância. O °Brix, sendo a razão entre a quantidade de açúcar e a massa da solução, tem seu valor elevado pela evaporação da água, consequentemente concentrando o caldo. De acordo com a Tabela 1, o tratamento por micro-ondas eleva a temperatura de amostra tanto com

Assim, pode-se realizar análise de variância para comparar as médias dessas variáveis, ainda que suas distribuições se desviem da normal, mas desde que o pressuposto de homogeneidade de variâncias seja também observado. As variáveis que apresentaram homogeneidade de variâncias foram: °Brix e pH. Como as demais variáveis não atenderam aos pressupostos – normalidade e homogeneidade de variância – utilizou-se o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis.

a potência quanto para o tempo de exposição. Com base nos dados apresentados nas potências 600 e 900 W, o °Brix aumenta com tempo de exposição às micro-ondas, conforme Figura 2. Dessa forma, esses tratamentos não são indicados para clarificação do caldo de cana-de-açúcar, haja vista, que promovem a concentração do suco. E, como o intuito é manter o °Brix próximo ao valor inicial – 21,1 –, os tratamentos que atenderam esse quesito e que não possuem

diferenças significativas entre si, são 1, 3 e 7, sendo que 1 e 3 são correspondentes à potência de 300 W e tempos respectivos de 1 e 3 min, enquanto o tratamento 7 refere-se à 900 W e 1 min.

Experimentos	Potência (W)	Tempo de exposição (min)	Varição Temperatura da amostra (°C)
1	300	1	41
2	300	2	69,7
3	300	3	81,2
4	600	1	75,8
5	600	2	84
6	600	3	89,5
7	900	1	87,2
8	900	2	88
9	900	3	93,7

Tabela 1. Variação temperatura da amostra após tratamento por micro-ondas

pH

O pH no caldo *in natura* foi de 5,07. De acordo com a Figura 3, o tratamento com a potência de 900 W foi o único que apresentou queda do pH com aumento do tempo de exposição. Essa acidificação da amostra pode ser devida à degradação de compostos, o que necessita de mais estudos para determinação das moléculas que estão sofrendo alterações.

Para as outras potências não houve uniformidade na variação do pH. Dessa forma, não se observa uma relação entre essas potências e seus respectivos tempos de exposição e o pH do caldo submetido a micro-ondas.

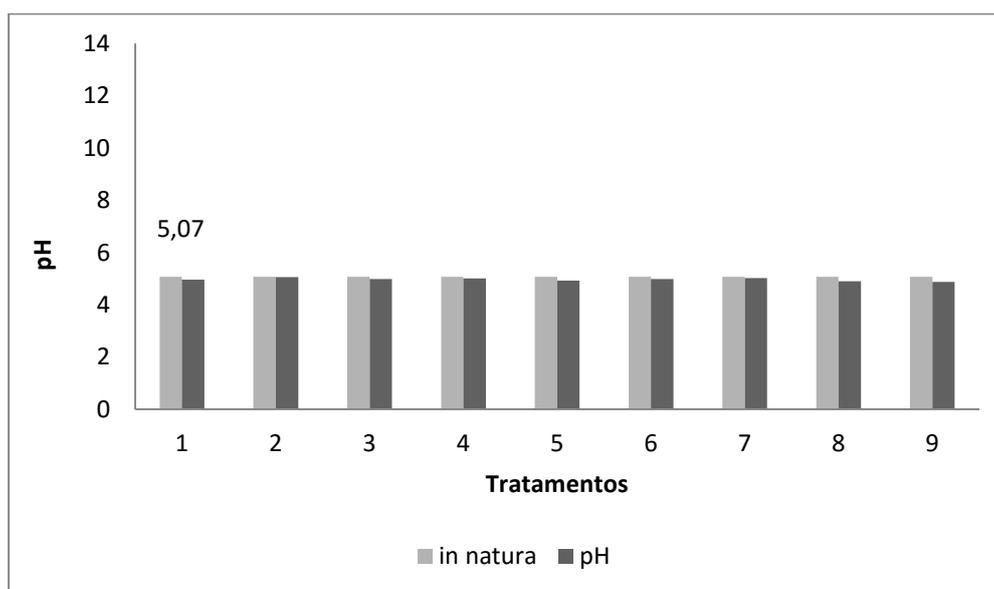


Figura 3. Média pH x tratamentos

Cor

O índice de cor do caldo *in natura* foi de 216,1. Como um dos objetivos da clarificação é a obtenção de um caldo com coloração reduzida, os tratamentos com menor índice de cor são os mais indicados. De acordo com a Figura 4, o tratamento 5 – 600 W e 2 min – foi o que apresentou o menor índice de cor,

sendo estatisticamente diferente somente dos tratamentos 3 e 4. O tratamento 3 corresponde à combinação de potência e tempo respectivamente de 300 W e 3 min e o tratamento 4 de 600 W e 1 min. Apenas com a variável cor não se pode concluir estatisticamente qual combinação potência e tempo é a melhor para a clarificação.

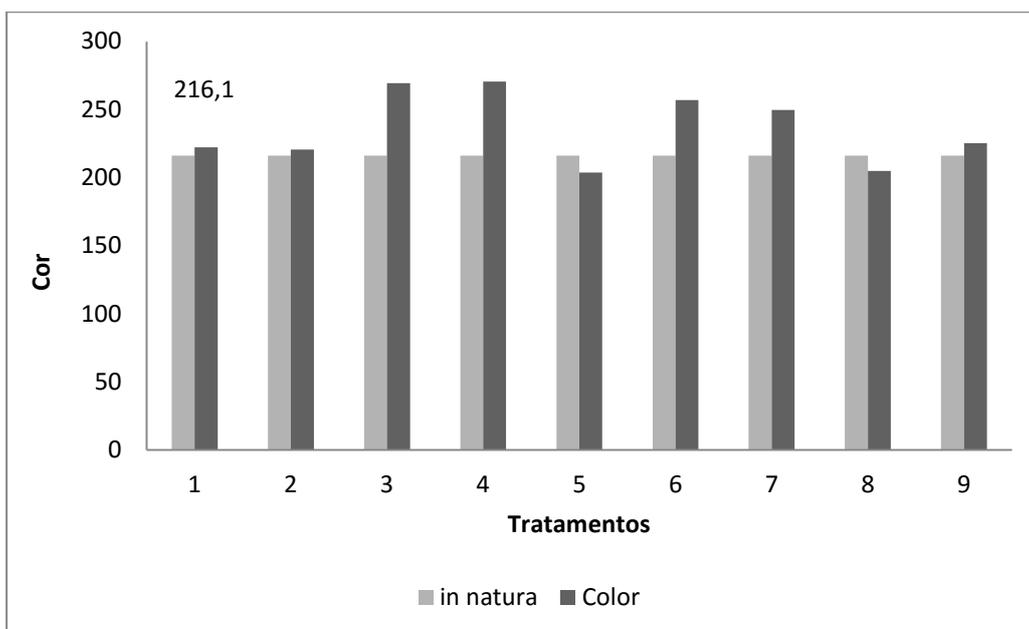


Figura 4. Média Cor x tratamentos

Turbidez

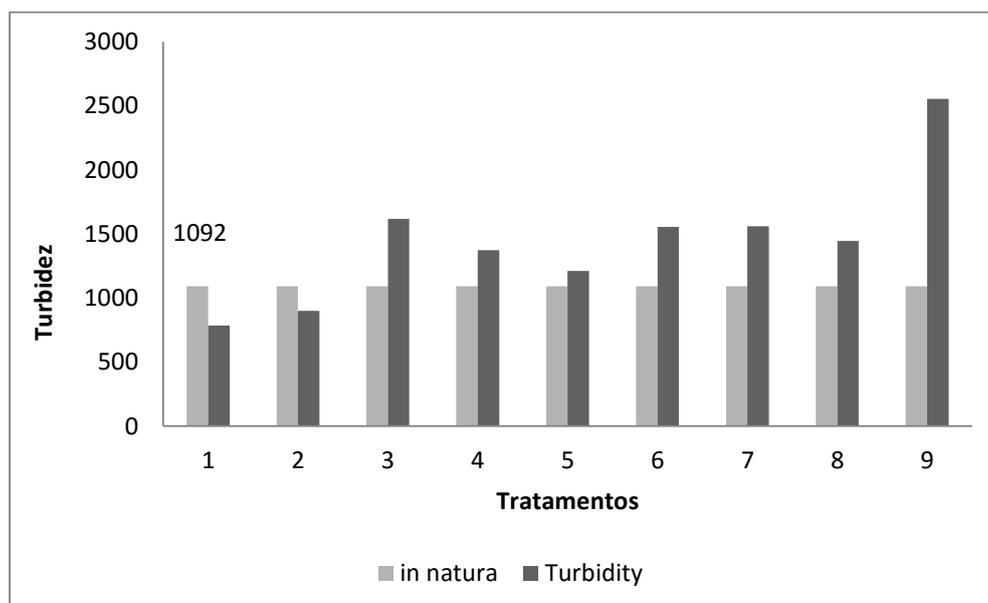


Figura 5. Média Turbidez x tratamentos

A turbidez do caldo *in natura* foi de 1.092 e um dos objetivos da clarificação do caldo de cana-de-açúcar é a redução dos valores de turbidez. Com isso, de acordo com a Figura 5, os tratamentos mais indicados seriam 1 e 2 com potência comum de 300 W e tempo de exposição de 1 min e 2 min, respectivamente. Como não há significativa diferença estatística entre os tratamentos, com exceção do tratamento 9, não se pode concluir somente pela variável turbidez qual seria o melhor tratamento para a clarificação do caldo de cana-de-açúcar.

Análises Microbiológicas

No caldo *in natura* não foi identificada contaminação por fungos. De acordo com a Figura 6, nos tratamentos 1, 2, 7 e 9 houve contagem de colônias de fungos, com isso deduz-se que a contaminação se deu durante o experimento em laboratório. De maneira geral, não há diferença estatística entre os tratamentos.

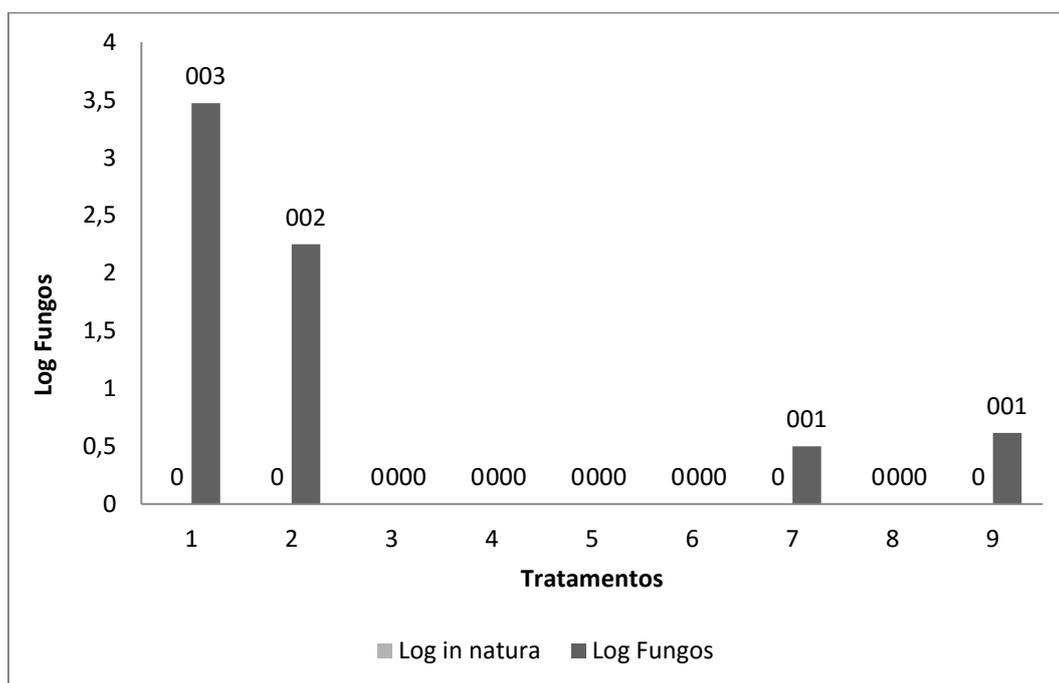


Figura 6. Média Fungos x tratamentos

De acordo com as Figuras 7 e 8, as bactérias aeróbias facultativas (Pour) foram eliminadas nos tratamentos 5 e 6, ambos com 600 W de potência e, respectivamente, 2 e 3 min de tempo de exposição, enquanto as aeróbias (Spread) foram eliminadas no tratamento 6. Como o intuito é a esterilização parcial

ou total do caldo, haja vista que o Log Bactérias inicial foi de 7,43 o tratamento por micro-ondas pode ser utilizado para clarificação do caldo de cana-de-açúcar, uma vez que diminuem consideravelmente o número de bactérias no caldo.

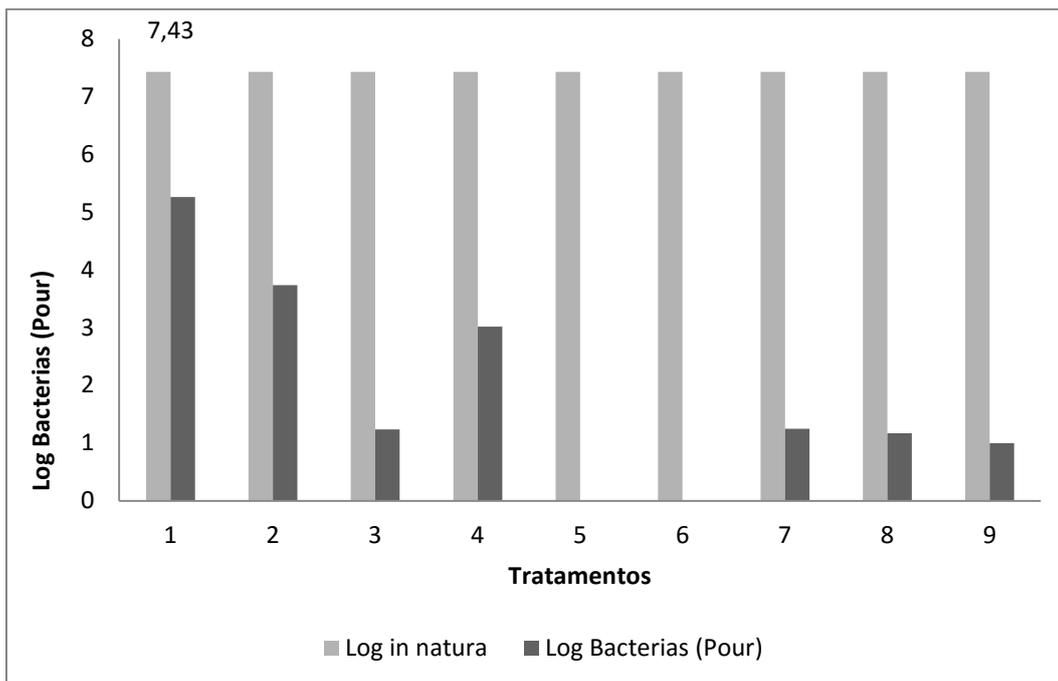


Figura 7. Média Log Bactérias (Pour) x tratamentos

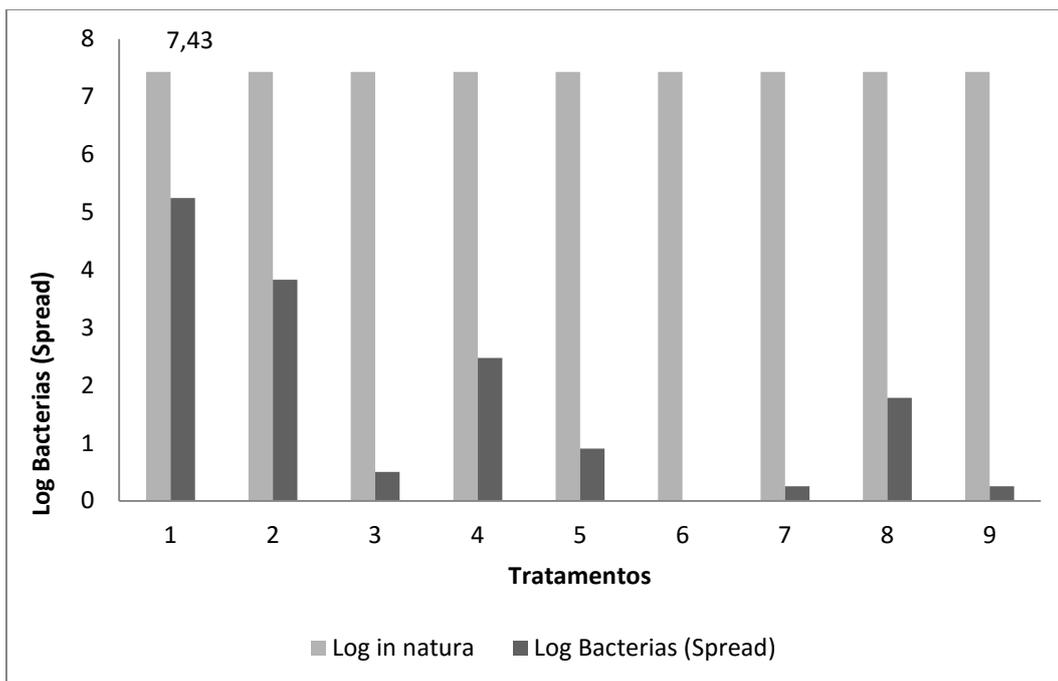


Figura 8. Média Log Bactérias (Spread) x tratamentos

Discussão das análises físico-químicas e microbiológicas nos tratamentos

De acordo com a Tabela 2, o tratamento 5 apresentou as melhores condições para o tratamento do caldo por micro-ondas. Esse tratamento corresponde à potência de 600 W e tempo de exposição de 2 min, em que, em relação ao caldo *in*

natura, a variação do °Brix foi insignificante, o pH sofreu redução significativa, a cor e a turbidez não apresentaram variação significativa, não há contaminação por fungos e por bactérias aeróbias e, em relação às facultativas, houve contaminação mas sem relevância estatística.

Variável	<i>in natura</i>	Tratamento 5
°Brix	21,1	22,7
pH	5,07	4,92
Turbidez	1092	1210
Cor	216,1	203,8
Log Fungos	0	0
Log Bactérias (Pour)	7,43	0
Log Bactérias (Spread)	7,43	0,91

Tabela 2. Composição caldo de cana-de-açúcar *in natura* e tratamento 5

Com relação ao parâmetro °Brix para o tratamento 5, não houve alteração significativa, no entanto, para os demais tratamentos com o aumento do tempo de exposição e da potência aplicada, diretamente ligada à temperatura, houve aumento significativo. Resultado que está de acordo com o encontrado no trabalho com aquecimento de pasta de maçã (GERARD; ROBERTS, 2004); em estudo para desidratação de abacaxi (BOTHÁ; OLIVEIRA; AHRNÉ, 2011); em descongelamento de bordo (AIDER; HALLEUX, 2007); sobre os efeitos das micro-ondas em sucos de romã e amoras pretas em que houve aumento significativo no °Brix deixando esses sucos concentrados (FAZAEI; YOUSEFI; EMAM-DJOMEH, 2011); com pasteurização de maçãs por micro-ondas (CAÑUMIR et al., 2001); e com concentração por evaporação de suco de romã por micro-ondas, sendo que houve aumento significativo no °Brix de 20 a 65 ° (MASKAN, 2004).

O pH sofreu redução significativa, não tendo sido encontrado um paralelo na literatura. No entanto, houve redução não significativa do pH no trabalho com pasteurização de maçãs por micro-ondas (CAÑUMIR et al., 2001).

A cor não sofreu alteração significativa para o tratamento 5, resultado também verificado em desidratação de cascas de cítricos (GHANEM et al., 2012); em descongelamento de bordo por micro-ondas (AIDER; HALLEUX, 2007). Mas nos tratamentos com maiores tempos de exposição e também os com potência de 600 W e 900 W houve aumento da coloração. Esse aumento de cor também foi encontrado em trabalhos com sucos de maçã (CAÑUMIR et al., 2001); com suco de romã (MASKAN, 2004); com o escurecimento da fruta kiwi

por secagem por micro-ondas (MASKAN, 2000); e em estudo para desidratação de abacaxi (BOTHÁ; OLIVEIRA; AHRNÉ, 2011). De forma geral, houve aumento da turbidez do caldo tratado em relação à turbidez do caldo *in natura*. Houve aumento significativo da turbidez com a elevação da temperatura causada pelo tratamento com micro-ondas tendo como substrato pasta de maçã (GERARD; ROBERTS, 2004).

Quanto às análises microbiológicas, a tecnologia por micro-ondas se mostrou eficiente na redução no número de microrganismos. Outros autores também verificaram essa capacidade de inativação como efetiva esterilização de *Escherichia coli* 25922 em cidra de maçã com micro-ondas em fluxo contínuo (GENTRY; ROBERTS, 2004); redução de *Saccharomyces cerevisiae* e *Lactobacillus plantarum* em suco de maçã (TAJCHAKAVIT; RAMASWAMY; FUSTIER, 1999); com pasteurização de sucos de maçãs por micro-ondas sendo eficiente na inativação de *E. coli* (CAÑUMIR et al., 2001).

Pode-se concluir que micro-ondas, apesar de não ser um tratamento que promova a redução da cor e da turbidez de forma significativa, é uma forma de clarificação do caldo de cana de açúcar que requer um pré-tratamento do caldo como, por exemplo, a decantação com o uso de polieletrólitos eliminando a calagem e a sulfitação do processo de clarificação. Como há aumento do °Brix com a potência e o tempo de exposição, é evidente que está ocorrendo a concentração do caldo o que pode indicar que micro-ondas pode ser utilizado para concentrar o caldo antes dos cristalizadores.

CONCLUSÃO

O tratamento do caldo de cana-de-açúcar por micro-ondas não promoveu a redução da cor e da turbidez de forma significativa, além de promover o aumento do °Brix, o que acarreta perdas no processo produtivo.

Para ser utilizado para clarificação do caldo de cana de açúcar, micro-ondas necessita de um pré-tratamento do caldo como, por exemplo, a decantação com o uso de polieletrólitos eliminando a calagem e a sulfitação do processo de clarificação. Dessa forma, não é um método alternativo para substituir a clarificação convencional do caldo de cana-de-açúcar para produção de açúcar e etanol.

REFERÊNCIAS

1. MELQUIADES, F.L. et al. Direct Determination of Sugar Cane Quality Parameters by X-ray Spectrometry and Multivariate Analysis. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Campinas, p. 10755-10761. 05 out. 2012.
2. ALKASRAWI, M.; JRAI, A. A.; AL-MUHTASEB, A. H.. Simultaneous saccharification and fermentation process for ethanol production from steam-pretreated softwood: Recirculation of condensate streams. **Chemical Engineering Journal**, Muscat, p. 574-579. 13 abr. 2013.
3. MORAES, B.S. et al. Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane biorefineries in Brazil from energy, environmental, and economic perspectives: Profit or expense?. **Applied Energy**, São Paulo, p. 825-835. 4 set. 2013.
4. SUN, X.; FUJIMOTO, S.; MINOWA, T.. A comparison of power generation and ethanol production using sugarcane bagasse from the perspective of mitigating GHG emissions. **Energy Policy**, Hiroshima, p. 624-629. 5 mar. 2013.
5. NOGUEIRA, A.M.P.; VENTURINI FILHO, W.G.. Clarificação de Caldo de Cana por Micro e Ultrafiltração: Comprovação de Viabilidade Técnica em Experimentos Preliminares. **Brazilian Journal of Food Technology**, p. 57-62. 29 mar. 2007.
6. TEIXEIRA, E.F. et al. O uso de aparelhos de Micro-ondas domésticos em aulas experimentais de química orgânica: Nitração de salicilaldeído. **Química Nova**, Rio de Janeiro, p. 1603-1606. 9 ago. 2010.
7. CAVICCHIOLI, A.; GUTZ, I.G.R.. O uso de radiação Ultravioleta para o pré-tratamento de amostras em análise inorgânica. **Química Nova**, São Paulo, p. 913-921. 15 abr. 2003.
8. HANH-HÄNGERDAL, B. et al. Bio-ethanol – the fuel of tomorrow from the residues of today. **TRENDS in Biotechnology**, Lund, p. 549-556. 16 out. 2006.
9. WALTER, A. et al. Sustainability assessment of bio-ethanol production in Brazil considering land use change, GHG emissions and socio-economic aspects. **Energy Policy**, Campinas, p. 5703-5716. 03 set. 2010.
10. BALAT, M.; BALAT, H.; ÖZ, C.. Progress in bioethanol processing. **Progress in Energy and Combustion Science**, Trabzon, p. 551-573. 28 jan. 2008.
11. FURTADO, A.T.; SCANDIFFIO, M. I. G.; CORTEZ, L. A. B.. The Brazilian sugarcane innovation system. **Energy Policy**, Campinas, p. 156-166. 15 out. 2010.

12. TRIANA, C.A.R.. Energetics of Brazilian ethanol: Comparison between assessment approaches. **Energy Policy**, Bogotá, p. 4605-4613. 01 maio 2011.
13. GHORBANI, F. et al. Cane molasses fermentation for continuous ethanol production in an immobilized cells reactor by *Saccharomyces cerevisiae*. **Renewable Energy**, Noor, p. 503-509. 14 ago. 2010.
14. GRAY, K. A.; ZHAO, L.; EMPTAGE, M.. Bioethanol. **Current Opinion in Chemical Biology**, San Diego, p. 141-146. 7 mar. 2006.
15. SINGH, A.; BISHNOI, N.R.. Optimization of ethanol production from microwave alkali pretreated rice straw using statistical experimental designs by *Saccharomyces cerevisiae*. **Industrial Crops and Products**, Haryana, p. 334-341. 20 jan. 2012.
16. WOJTCZAK, M.; BIERNASIAK, J.; PAPIEWSKA, A.. Evaluation of microbiological purity of raw and refined white cane sugar. **Food Control**, Lodz, p. 136-139. 12 out. 2011.
17. OLIVEIRA, A.C.G. et al. Efeitos do processamento térmico e da radiação gama na conservação de caldo de cana puro e adicionado de suco de frutas. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Piracicaba, p. 863-873. 05 ago. 2007.
18. ARAÚJO, F. A. D.. Processo de clarificação do caldo de cana pelo método da bicarbonatação. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, dez. 2007.
19. PRATI, P.; MORETTI, R.H.. Study of clarification process of sugar cane juice for consumption. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, São Pedro, p. 776-783. 25 set. 2009.
20. DOHERTY, W. O. S.. Improved Sugar Cane Juice Clarification by Understanding Calcium Oxide-Phosphate-Sucrose Systems. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Brisbane, p. 1829-1836. 15 fev. 2011.
21. JEGATHEESAN, V. et al. Performance of ceramic micro and ultrafiltration membranes treating limed and partially clarified sugar cane juice. **Journal of Membrane Science**, Townsville, p. 69-77. 17 nov. 2008.
22. EGGLESTON, G.; GRISHAM, M.; ANTOINE, A.. Clarification Properties of Trash and Stalk Tissues from Sugar Cane. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, New Orleans, p. 366-373. 12 ago. 2009.
23. JONES, D. A. et al. Microwave heating applications in environmental engineering —a review. **Resources, Conservation and Recycling**, Nottingham, p. 75-90. 18 jun. 2001.
24. SOUZA, R.O.M. A.; MIRANDA, L.S.M.. Irradiação de Micro-Ondas Aplicada à Síntese Orgânica: Uma História de Sucesso no Brasil. **Química Nova**, Rio de Janeiro, p. 497-506. 31 jan. 2011.
25. MENÉNDEZ, J.A.. Microwave heating processes involving carbon materials. **Fuel Processing Technology**, Oviedo, p. 1-8. 28 ago. 2009.
26. APPELS, L. et al. Influence of microwave pre-treatment on sludge solubilization and pilot scale semi-continuous anaerobic digestion. **Bioresource Technology**, Heverlee, p. 598-603. 10 nov. 2012.
27. DONG-LIANG, L. et al. In situ hydrate dissociation using microwave heating: Preliminary study. **Energy Conversion and Management**, Guangzhou, p. 2207-2213. 21 mar. 2008.
28. ZIELINSKI, M. et al. Influence of microwave radiation on bacterial community structure in biofilm. **Process Biochemistry**, Olsztyn, p. 1250-1253. 10 maio 2007.

29. ZIELINSKI, M.; ZIELINSKA, M.; DEBOWSKI, M.. Application of microwave radiation to biofilm heating during wastewater treatment in trickling filters. **Bioresource Technology**, Olsztyn, p. 223-230. 5 out. 2012.
30. ESKICIOGLU, C. et al. Athermal microwave effects for enhancing digestibility of waste activated sludge. **Water Research**, Ottawa, p. 2457-2466. 23 abr. 2007.
31. CHANDRASEKARAN, S.; RAMANATHAN, S.; BASAK, T.. Microwave food processing—A review. **Food Research International**, Chennai, p. 243-261. 21 fev. 2013.
32. KRECH, T. et al. Microwave radiation as a tool for process intensification in exhaust gas treatment. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, Jena, p. 31-36. 10 fev. 2013.
33. TAHMASEBI, A. et al. Experimental study on microwave drying of Chinese and Indonesian low-rank coals. **Fuel Processing Technology**, Anshan, p. 1821-1829. 30 jun. 2011.
34. CONSECANA. **Manual de Instruções**. Piracicaba: Consecana, 2006.
35. MAGALHÃES, A.M.; FERREIRA, M.D.; MORETTI, C.L.. Comparação entre dois métodos para avaliar a eficácia de limpeza durante o beneficiamento de tomates. **Engenharia Agrícola**. Jaboticabal, p. 699-704. dez. 2009.
36. TORTORA, G.J.; FUNKE, B.R.; CASE, C.L.. **Microbiology: an introduction**. 3. ed. San Francisco: Prentice, 2010.
37. Okura, M.H.; Rende, J.C.; *Microbiologia: Roteiro de aulas práticas*. 1th ed., Tecmedd: Ribeirão Preto, 2008.
38. WILLEY, J.M.; SHERWOOD, L.M.; WOOLVERTON, C.J.. **Microbiology**. 7. ed. New York: Mcgraw-hill, 2008.
39. Callegari-Jacques, S.M.; *Bioestatística: princípios e aplicações*. 1th ed., Artmed: Porto Alegre, 2003.
40. HAIR, J.F. et al. **Análise multivariada de dados**. 6.ed. Porto Alegre: Bookman, 2009. 688 p.
41. GERARD, K. A.; ROBERTS, J. S.. Microwave heating of apple mash to improve juice yield and quality. **LWT – Food Science and Technology**, Geneva, p. 551-557. 17 dec. 2004.
42. BOTHA, G.E.; OLIVEIRA, J.C.; AHRNÉ, L.. Quality optimisation of combined osmotic dehydration and microwave assisted air drying of pineapple using Constant power emission. **Food and Bioproducts Processing**, Pretoria, p. 171-179. 09 Fev. 2011.
43. AIDER, M.; HALLEUX, D.. Passive and microwave-assisted thawing in maple sap cryoconcentration technology. **Journal of Food Engineering**, Québec, p. 65-72. 08 Ago. 2007.
44. FAZAELI, M.; YOUSEFI, S.; EMAM-DJOMEH, Z.. Investigation on the effects of microwave and conventional heating methods on the phytochemicals of pomegranate (*Punica granatum L.*) and black mulberry juices. **Food Research International**, Tehran, p. 568-573. 16 Mar. 2011.
45. CAÑUMIR, J.A. et al. Pasteurisation of Apple Juice by Using Microwaves. **LWT – Food Science and Technology**, Chillán, p. 389-392. 27 Ago. 2001.
46. MASKAN, M.. Production of pomegranate (*Punica granatum L.*) juice concentrate by various heating methods: colour degradation and kinetics. **Journal of Food Engineering**, Gaziantep, p. 218-224. 24 Dec. 2004.

47. GHANEM, N. et al. Microwave dehydration of three citrus peel cultivars: Effect on water and oil retention capacities, color, shrinkage and total phenols content. **Industrial Crops and Products**, Sfax, p. 167-177. 06 Mar. 2012.
48. MASKAN, M.. Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying. **Journal of Food Engineering**, Gaziantep, p. 169-175. 11 Set. 2000.
49. GENTRY, T.S.; ROBERTS, J.S.. Design and evaluation of a continuous flow microwave pasteurization system for apple cider. **LWT – Food Science and Technology**, Geneva, p. 227-238. 25 Mai. 2004.
50. TAJCHAKAVIT, S.; RAMASWAMY, H. S.; FUSTIER, P.. Enhanced destruction of spoilage microorganisms in apple juice during continuous flow microwave heating. **Food Research International**, Quebec, p. 713-722. 06 Mar. 1999.