IV Simpósio Paranaense de Modelagem, Simulação e Controle de Processos

ISSN: 1984-7521

Artigo: 18

Páginas: 128 - 135

ESTUDO PRELIMINAR DA VIABILIDADE ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE NANOCRISTAIS DE CELULOSE EM BIORREFINARIA DE CANA-DE-AÇÚCAR

Gustavo Batista^{1*}, Thalita J. Bondancia^{1,2}, Cristiane S. Farinas^{1,2}, Antonio J. G. Cruz¹

1 - Universidade Federal de São Carlos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química email: batistagustavo@live.com

2 – Embrapa Instrumentação - São Carlos, SP

Resumo — Os nanocristais de celulose são materiais altamente ordenados e cristalinos obtidos a partir de diversos recursos naturais. Com um campo de aplicações diversificado, porém ainda em disponibilidade limitada e com os baixos rendimentos de obtenção e isolamento, a nanocelulose apresenta mercado em forte crescimento. Este trabalho avaliou a obtenção dos nanocristais de celulose em unidade anexa à biorrefinaria de cana-de-açúcar, empregando como matéria-prima a fase sólida obtida após a hidrólise enzimática da produção de etanol de segunda geração. A metodologia de produção e a análise econômica incremental do processo foram obtidos a partir do cruzamento de dados coletados na literatura relativos ao biopolímero. A unidade proposta apresentou Valor Presente Líquido (VPL) de U\$\$ 15,29 milhões e taxa interna de retorno (TIR) de 13,72%, indicando uma oportunidade de investimento atrativa para diversificação e aumento de liquidez no setor canavieiro.

Palavras-Chave: Nanocelulose, Etanol de Segunda Geração, Biorrefinaria, Viabilidade Econômica.

Introdução

No Brasil, o processamento da cana-de-açúcar gera uma grande quantidade de resíduos agrícolas. Uma abordagem bastante interessante é a de aproveitar os próprios resíduos do processo de produção de etanol para complementar a produção nas usinas [1], uma vez que estes apresentam baixo custo e elevada disponibilidade [2]. O bagaço e a palha de cana-de-açúcar, que até o início dos anos 90 eram vistos como problemas nas usinas, hoje ganharam grande visibilidade, acarretando em um aumento no potencial econômico destes subprodutos. A consolidação da produção industrial de bioetanol de segunda geração (E2G) e de outros subprodutos baseia-se na melhoria econômica do processo.

As rotas bioquímicas para produção de E2G envolvem basicamente quatro etapas principais: pré-tratamento da biomassa, hidrólise ácida e/ou enzimática dos polissacarídeos a açúcares monoméricos, fermentação dos açúcares e finalmente a destilação/recuperação do bioetanol [3].

Os materiais lignocelulósicos apresentam uma complexa estrutura morfológica, formada basicamente a partir de três polímeros: a celulose (35 a 50%), a hemicelulose (20 a 40% em massa) e a lignina (10 a 20%). Na celulose, grande parte das estruturas apresenta-se altamente ordenada em fibras, fibrilas e microfibrilas, sendo estas chamadas de regiões cristalinas. Outras estruturas, interligadas de maneira caótica, recebem o nome de regiões amorfas. Quanto menor é o grau de cristalinidade, menor também é a organização da estrutura celular, sendo esta mais susceptível à hidrólise e à consequente formação de açúcares monoméricos como a glicose e outras hexoses [4]. O

14 e 15 de março de 2019 Curitiba - Paraná resíduo fibroso sólido da hidrólise enzimática contém celulose altamente cristalina (as enzimas degradam prioritariamente a parte amorfa do polímero) e lignina. Uma alternativa interessante para aproveitamento deste resíduo (atualmente destinado às caldeiras da biorrefinaria) é a obtenção de nanocelulose, um material de elevado valor agregado e com aplicações em diferentes setores industriais [5].

Os nanocristais (NCCs) e nanofibras (NFCs) de celulose são materiais altamente ordenados e cristalinos, de diâmetro pequeno, comprimento alongado e elevada área superficial, obtidos a partir de grande variedade de recursos naturais. Atualmente, grande parte destes nanomateriais é produzida em escala laboratorial a partir de diversas fontes naturais. Dentre as diferentes aplicações da nanocelulose, destaca-se o uso como reforço mecânico em materiais poliméricos, resultando em aumentos significativos nas propriedades de resistência mecânica e térmica dos materiais [6, 7] e as aplicações em biomedicina [8, 9]. Entretanto, um grande desafio para a utilização de NCCs em aplicações comerciais é a sua disponibilidade limitada e os baixos rendimentos em sua obtenção e isolamento [10].

A avaliação do potencial das tecnologias de produção de E2G e de nanocelulose a partir dos resíduos da cana-de-açúcar se faz necessária em diferentes cenários. Até o melhor do nosso conhecimento, há ainda pouquíssimas plantas industriais no mundo produzindo E2G, e nenhuma produzindo nanocelulose a partir da cana-de-açúcar. A adição de novos produtos à biorrefinaria visa aumentar o potencial competitivo da tecnologia, gerando opções com retorno de investimento e de baixos impactos ambientais perante outras tecnologias de produção. Neste sentido, a produção de nanocelulose merece destaque, uma vez que este biopolímero apresenta elevado campo de aplicação e preço de mercado bastante elevado [11].

Na obtenção de celulose mais pura logo após a hidrólise enzimática do E2G, fazse necessário o emprego de algum método de deslignificação do resíduo fibroso (também conhecido como purificação ou branqueamento), uma vez que o resíduo cristalino da hidrólise costuma possuir elevados índices de lignina. Diversos compostos de baixo custo têm sido testados para a purificação de materiais lignocelulósicos com o intuito de obtenção de celulose como o hipoclorito de sódio (NaOCl) e o peróxido de hidrogênio (H₂O₂). Há também tratamentos menos agressivos ao ambiente como o organossolv a partir de solventes como o metanol e o etanol. Em alguns casos são empregadas combinações entre estes tratamentos para obtenção de celulose com maiores teores de pureza [10].

Para a geração de celulose cristalina em tamanhos nanométricos é necessária uma etapa de hidrólise subsequente à etapa de purificação. O processo mais utilizado é a hidrólise ácida, que pode ser realizada com diferentes ácidos (mais comumente o sulfúrico e o clorídrico) em diferentes proporções, usualmente com reciclo de processo. A deslignificação prévia propicia maior superfície de contato devido à remoção de substâncias amorfas, proporcionando maior eficiência no contato entre a celulose e o ácido [10]. Posteriormente são necessárias etapas para remoção do ácido e dos açúcares hidrolisados como filtração (ou centrifugação) seguida por neutralização (ou diálise). Ao fim, os nanocristais de celulose podem ser secos para possibilitar a obtenção de condições elevadas de pureza [11].

Diversos trabalhos da literatura demonstraram a viabilidade técnica da obtenção de variedades de nanocelulose a partir das mais variadas matérias-primas e por diferentes metodologias [5, 10]. Um dos primeiros estudos visando avaliar a viabilidade econômica da produção da nanocelulose a partir do conceito de biorrefinaria foi o de LEISTRITZ *et al.* [12], que analisou a produção de nanocelulose a partir de palha de

trigo como um co-produto de biorrefinaria de etanol no estado americano da Dakota do Norte. Já naquele estudo, a análise econômica indicava que a produção de nanocelulose traria uma melhoria considerável para o aproveitamento econômico da palha de trigo, largamente disponível naquela localização. O trabalho de CAMARGO et al. [13] demonstrou a viabilidade da produção de nanocristais de celulose (Fig. 1) como um co-produto de alto valor agregado no processamento do bagaço de cana-de-açúcar para a produção de E2G. O estudo determinou que restaram, após hidrólise enzimática, quantidades significativas de celulose cristalina recalcitrante (~54%). Após purificação e hidrólise ácida, estas estruturas resultaram em nanocristais estáveis a temperaturas próximas de 200 °C e com morfologia, dimensões (comprimentos de 193–246 nm e diâmetros de 14–18 nm), cristalinidade (~80 %) e características físico-químicas apreciáveis.

No trabalho de ASSIS et al. [11] foi realizada uma análise técnico-econômica da produção de nanocristais a partir de polpa de celulose, através de dados obtidos da Planta Piloto do Laboratório de Produtos Florestais da USDA (EUA), dados de literatura e discussões com experts da área. Foram avaliados cenários greenfield (partindo de terreno vazio) ou com co-locação a uma fábrica de celulose, com ou sem recuperação do H₂SO₄ na etapa ácida de produção. O melhor cenário avaliado (sem recuperação de H₂SO₄, com co-locação) apresentou tempo de retorno estimado em 7,6 anos.

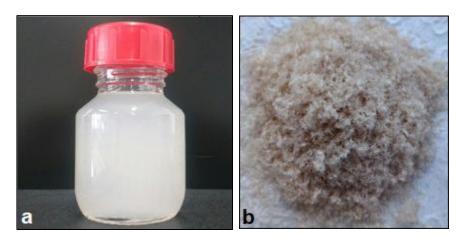


Figura 1-(a) Suspensão de nanocelulose e (b) nanocristais de celulose (NCCs) obtidos a partir de bagaço de cana-de-açúcar

Fonte: (a) arquivo próprio; (b) CAMARGO et al. [13]

Objetivo

O objetivo deste trabalho foi realizar uma avaliação preliminar da viabilidade econômica da produção de nanocristais de celulose a partir da fração sólida obtida na hidrólise enzimática do bagaço da cana-de-açúcar. A análise econômica foi do tipo incremental, sendo considerados apenas dados relativos à unidade anexa à biorrefinaria. A composição da corrente de entrada foi obtida em biorrefinaria simulada no software *EMSO* [14]. As etapas de pré-tratamento e hidrólise enzimática são empregadas na obtenção de E2G, portanto a obtenção de um composto de alto valor agregado a partir do resíduo sólido deste processo visa aumentar o retorno de investimento das biorrefinarias. Assume-se que o mercado de nanocelulose terá rápida expansão nos próximos anos [15], de forma que toda a produção será assimilada nos cenários nacional e internacional.

Metodologia

A unidade proposta para geração de nanocristais de celulose (NCCs) tem rota de processamento empregando polpação do tipo organossolv seguida de branqueamento adicional com H_2O_2 e hidrólise ácida. Dados relativos a parâmetros e rendimentos deste processo foram obtidos na literatura em diversas fontes [11, 12, 13, 16, 17, 18, 19, 20].

Descrição do Processo

A unidade de produção aqui avaliada será anexa a uma biorrefinaria de cana-de-açúcar com produção já implantada de E2G. Deste modo, haverá disponibilidade de matéria-prima, que consiste na fração sólida do bagaço de cana-de-açúcar obtido após a sequência de processamento com moagem, pré-tratamento hidrotérmico e hidrólise enzimática. A composição aproximada (em massa) da fase sólida do bagaço hidrolisado [14] é de 25,2% de celulose, 11,3% de hemicelulose, 51,5% de lignina e 12,0% de impurezas. O conteúdo em massa de água e açúcares hidrolisados nesta corrente é de 55,2%. A vazão da corrente de entrada foi fixada em 3,7 ton da fração sólida de bagaço hidrolisado por hora.

A fase sólida do bagaço hidrolisado passa inicialmente por um tratamento organossolv com solução de etanol a 200°C em reator por 2 h. A solução etanol-água (1:1 v/v) é adicionada na proporção 1:14 (massa seca de sólido / volume de solução). Após o tratamento organossolv há a filtração da fase sólida obtida (rendimento em celulose de 95% em massa; remoção de lignina de 90% em massa). A fase líquida resultante segue para um flasheamento à pressão ambiente, em que 47% do etanol e 28% da água são recuperados para a etapa de tratamento organossolv. A corrente segue para precipitação da lignina com acidificação por H₂SO₄, com adição de água na proporção 1,5:1 m/m em relação à massa total da corrente de entrada. Há a precipitação de 65% da lignina. Posteriormente ocorre a neutralização do ácido com NaOH e precipitação de Na₂SO₄. A corrente resultante segue para uma coluna de destilação, em que 97% do etanol é recuperado no topo e segue para o reciclo do tratamento organossolv. A corrente de fundo é composta por água, lignina residual, açúcares hidrolisados e impurezas e sais dissolvidos, sendo enviada para o tratamento de efluentes.

A fase sólida filtrada após tratamento organossolv segue para purificação a 50 °C e 60 min em tanque agitado para remoção da lignina e hemicelulose residuais. Há a adição de solução de peróxido 5% (m/m) e NaOH 5% (m/m) para uma proporção de 10:1 m/m em relação à corrente de entrada. A fase sólida resultante após filtração é altamente cristalina e tem elevada pureza em celulose, porém ainda não possui características nanométricas. Considerou-se que a fase líquida proveniente do filtro é neutralizada pela fase ácida resultante da hidrólise e depois vai para tratamento de efluentes.

A hidrólise ácida da celulose cristalina é feita com a adição de H₂SO₄ 64% em massa, na proporção de 25:1 v/v em relação à corrente de entrada, a 45 °C por 45 minutos. Esta etapa tem rendimento em nanocelulose de 70%. Posteriormente há injeção de água na corrente de saída e centrifugação a 4500 rpm para separação da nanocelulose (rendimento de 98% para o nanocristal), sendo o ácido recuperado (19% em massa) enviado para reconcentração (65% em massa) e posteriormente reutilizado na hidrólise. A neutralização da corrente de produto é feita com a adição de cal, sendo removido sulfato de cálcio em decantador. A corrente de nanocelulose recebe adição de

água até 2% em massa para que os traços de ácido carregados pela nanocelulose e os açúcares hidrolisados ainda presentes sejam removidos por diálise e ultrafiltração. Posteriormente, o retentado da ultrafiltração que consiste em nanocelulose úmida (8% em massa) passa por ultrasonicação (15 min) e secagem por spray-dryer, obtendo-se ao final nanocristais com elevado grau de pureza (> 95%).

Análise Econômica do Processo

Considerou-se que o terreno para construção da unidade e a fração sólida do bagaço hidrolisado de cana possuem custo zero, uma vez que a unidade é anexa a uma planta de E2G e esta matéria-prima é um dos resíduos da hidrólise enzimática. Considerou-se ainda que a biorrefinaria possui disponibilidade de caldeiras de forma que se contabilizou apenas o custo de produção do vapor. A unidade terá operação em 200 dias / ano.

A taxa de conversão Dólar / Real utilizada foi de 1 U\$\$ = 3,70 R\$. Os custos de insumos e utilidades de processo (Tab. 1) e dos equipamentos de produção foram obtidos em diversas fontes [11, 12, 18, 21, 22] e catálogos industriais, sendo corrigidos para valores do ano de 2019 através do CE Index. Quando pertinente, valores de equipamentos foram estimados através da "Regra dos seis décimos" [23]. A maioria dos equipamentos utilizados na unidade foi cotada em aços AISI 304 e AISI 316 devido à presença de compostos ácidos e/ou alcalinos e à elevada pureza exigida para a nanocelulose. Fatores de Módulo ($F_{\rm M}$) relativos a cada equipamento foram aplicados para contemplar os custos de implantação. O capital de giro foi considerado para 40 dias.

TD 1 1 1	T 7 1	1	•	. 11 1 1	/11 1	1 ~
Tabela I =	- Valores	ectimados	para insumos.	ulfillidades e	modulos de	nroducao
I abcia i	v aioics	Commados	para mounios.	, ummaaacs c	miodulos de	produção

Insumos e Utilidades de Processo				
Insumo	Custo Estimado			
	(U\$\$ / ton)			
Etanol	617			
H_2SO_4	92			
NaOH	391			
H_2O_2	1622			
CaO	135			
Utilidade	Custo Estimado			
Água (25° C)	0,68 U\$\$ / ton			
Vapor	19 U\$\$ / ton			
Eletricidade	0,12 U\$\$ / kWh			

Os cálculos termodinâmicos do processo foram realizados no software *ThermoSolver*[®] empregando-se o modelo NRTL. As constantes termodinâmicas de compostos ausentes no banco de dados do programa foram estimadas como sendo as da água devido às baixas concentrações destes nas correntes de processo.

Há uma grande disparidade entre os valores listados para o preço de mercado da nanocelulose em diversas fontes. Neste trabalho adotou-se um preço de mercado mais conservador (5000 U\$\$ / ton para nanocelulose 95% em massa) condizente com os valores preço mínimo de atratividade obtidos por ASSIS et al. [11]. Os preços de venda dos subprodutos obtidos na unidade proposta (como o Na_2SO_4 e o $CaSO_4$) não foram contabilizados.

Resultados e Discussão

As figuras a seguir ilustram os custos estimados para utilidades e insumos de processo (Fig. 2) e dos módulos de produção (Fig. 3) da unidade de nanocelulose proposta. Também estão descritos os valores estimados para o capital investido para a implantação da unidade (Tab. 2) e o balanço operacional (Tab. 3).

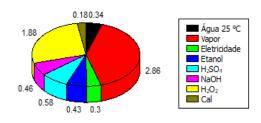


Figura 2 – Custo anual estimado das utilidades e insumos de processo (em U\$\$ milhões)

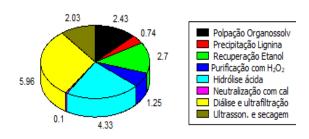


Figura 3 – Custo estimado dos módulos de produção (em U\$\$ milhões)

Tabela 2 – Descrição do capital investido

Descrição	U\$\$ milhões		
Custo total equip. (C_{TE})	27,41		
Cap. total depreciável (CD)	31,52		
Cap. total não-deprec. (CN)	1,58		
Capital de giro (CG)	1,96		
Capital total investido (CTI)	35,05		

Tabela 3 – Balanço operacional

Descrição	U\$\$ milhões	
Descrição	por ano	
Receita bruta	24,20	
Impostos	ICMS/IPI/PISCO	
Receita líquida	16,80	
Custos de produção	9,80	
Lucro Bruto	7,00	
Depreciação (10 anos)	0,1 * CD	
Resultado operacional	3,85	
IR	15% + adicionais	
Saldo Líquido	6,06	
Valor Presente Líquido	15,29 milhões	
TIR (15 anos de operação)	13,72%	

A produção anual de nanocristais de celulose da unidade proposta, anexa à uma biorrefinaria de E2G, é de aproximadamente 1300 ton / ano. Verifica-se na Fig. 2 o elevado custo em vapor e H_2O_2 para a unidade proposta. Grandes quantidades de vapor são requeridas nas etapas de recuperação de etanol e de ácido sulfúrico, enquanto que o peróxido apresenta elevado custo de aquisição. Na Fig. 3 é possível analisar que os custos de implantação das unidades de hidrólise ácida (principalmente devido à centrífuga e ao reconcentrador de H_2SO_4) e de diálise e ultrafiltração (que exigem manutenção constante e possuem elevados custos de aquisição e fatores F_M) são os mais significativos em termos de C_{TE} . Na Tab. 2 foram contabilizados U\$\$ 7,83 milhões (40% dos custos de módulo) para estimar os custos de tubulações e transportadores (todos em aço AISI 316), bombas, etc. Foram computados também os valores de manutenção, seguro, mão-de-obra, tratamento de efluentes, etc. para cálculo do CTI.

A Tab. 3 indica que a unidade proposta é economicamente atrativa para investimento na conjuntura atual, com Valor Presente Líquido (VPL) de U\$\$ 15,29 milhões e taxa interna de retorno de 13,72%, valor este superior à taxa mínima de atratividade de 7,5% baseada na rentabilidade atual do Tesouro Direto Nacional (4,5%). Uma vez que o potencial consumidor dos nanocristais de celulose tende a crescer nos próximos anos devido às aplicações já destacadas deste biopolímero em diversas áreas (e consequentemente deverá aumentar também o seu preço de mercado), destaca-se a oportunidade de investimento junto às usinas e biorrefinarias de cana-de-açúcar para potencial melhoria de rentabilidade de negócio.

Conclusões

Uma vez que o mercado de nanocristais de celulose está em clara expansão, estão sendo conduzidos estudos das diferentes metodologias e variáveis de processo a fim de consolidar e otimizar o processo produtivo. Este trabalho indica que a implantação de uma unidade de produção de nanocelulose, anexa à biorrefinaria de cana, apresentaria elevada atratividade de mercado (TIR de 13,72%), utilizando-se do resíduo de bagaço hidrolisado. Destaca-se ainda a oportunidade para aumento de lucratividade e robustez do setor canavieiro a partir deste promissor biopolímero.

Agradecimentos

À FAPESP (Processo 2016/10636-8) e ao CNPq (140761/2017-9).

Referências

- 1. F.F. Furlan, Desenvolvimento de ambiente integrado para simulação e otimização estática da produção de etanol a partir de bagaço de cana-de-açúcar por rota bioquímica. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos. 2012.
- 2. R. R. Resende, C. Rodrigues, A. L. Woiciechowski, L. A. J. Letti, S. G. Karp, F. D. Goelzer, K. C. A. Solbral, J. D. Coral, T. S. Campioni, M. A. C. Maceno, C. R. Soccol, Biotecnologia Aplicada à Agro&Indústria: Fundamentos e Aplicações Capítulo 8: Materiais lignocelulósicos como matéria-prima para a obtenção de biomoléculas de valor comercial. Editora Blucher. 2014.
- 3. R. Muktham, S. K. Bhargava, S. Bankupalli, A. S. Ball. A review on 1st and 2nd generation bioethanol production Recent progress. Journal of Sustainable Bioenergy Systems. 2016, Ed. 6, págs. 72-92.
- 4. Y. H. P. Zhang, L. R. Lynd. Toward an aggregated understanding of enzymatic hydrolysis of cellulose: Non complexed systems. Biotechnology and Bioengineering. 2004, v. 88, p.797-824.
- 5. T. J. Bondancia. Aproveitamento da biomassa de cana-de-açúcar para obtenção de nanocelulose por rota enzimática. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos (em curso).
- 6. K. Li, J. Huang, D. Xu, Y. Zhong, L. Zhang, J. Cai. Mechanically strong polystyrene nanocomposites by peroxide-induced grafting of styrene monomers within nanoporous cellulose gels. Carbohydrate Polymers. 2018, vol. 199, pg. 473-481.
- 7. Z. Wang, L. Mo, S. Zhao, J. Li, S. Zhang, A. Huang. Mechanically robust nacremimetic framework constructed polypyrrole-doped graphene/nanofiber nanocomposites with improved thermal electrical properties. Materials & Design. 2018, volume 155, pg. 278-287.
- 8. J. Nsor-Atindana, H. D. Goff, W. Liu, M. Chen, F. Zhong. The resilience of nanocrystalline cellulose viscosity to simulated digestive processes and its influence on glucose diffusion. Carbohydrate Polymers. 2018, vol. 200, pg. 436-445.
- 9. Y. Xiao, L. Rong, B. Wang, Z. Mao, H. Xu, Y. Zhong, L. Zhang, X. Sui. A light-weight and high-efficacy antibacterial nanocellulose-based sponge via covalent immobilization of gentamicin. Carbohydrate Polymers. 2018, volume 200, pg. 595-601.

- 10. L. A. Camargo. Obtenção de nanocristais de celulose a partir do resíduo da produção de etanol do bagaço de cana-de-açúcar pela rota enzimática. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Química, Universidade Federal de São Carlos. 2015.
- 11. C. A. Assis, C. Houtman, R. Phillips, E. M. Bilek, O. J. Rojas, L. Pal, M. S. Peresin, H. Jamel, R. Gonzalez. Conversion Economics of Forest Biomaterials: Risk and Financial Analysis of CNC Manufacturing. Biofuels, Bioproducts & Biorefining: Modeling and Analysis. 2017, vol. 11, pg. 682-700.
- 12. F. L. Leistritz, D. M. Senechal, M. D. Stowers, W. F. Mcdonald, C. M. Saffron, N. M. Hodur. Preliminary Feasibility Analysis for na Integrated Biomaterials and Ethanol Biorefinery Using Wheat Straw Feedstock. Agribusiness & Applied Economics Report No. 590. Department of Agribusiness and Applied Economics, Agricultural Experiment Station, North Dakota State University. 2006.
- 13. L. A. Camargo, S. C. Pereira, A. C. Correa, C. S. Farinas, J. M. Marconcini, L. H. C. Mattoso. Feasibility of Manufacturing Cellulose Nanocrystals from the Solid Residues of Second-Generation Ethanol Production from Sugarcane Bagasse. BioEnergy Research. 2016, vol. 9, Ed. 3, pg. 894–906.
- 14. F. F. Furlan, C. B. B. Costa, G. C. Fonseca, R. P. Soares, A. R. Secchi, A. J. G. Cruz, R. C. Giordano. Assessing the production of first and second generation bioethanol from sugarcane through the integration of global optimization and process detailed modeling. Computers and Chemical Engineering. 2012, Ed. 43, págs. 1-9.
- 15. T. Santi. Nanotecnologia: a oportunidade de crescimento do setor de celulose no mercado. Revista O Papel. Novembro de 2017.
- 16. K. Marabezi. Deslignificação de bagaço de cana-de-açúcar: reações, isolamento e utilização de ligninas. Tese de Doutorado. Departamento de Físico-Química. Instituto de Química. Universidade de São Paulo. 2014.
- 17. J. I. Botello, M. A. Gilarranz, F. Rodríguez, M. Oliet. Recovery of Solvent and By-Products from Organosolv Black Liquor. Separation Science and Technology. 2006, Ed. 34, vol. 12, págs. 2431-2445.
- 18. L. T. Savignon, V. L. Gonçalves. Estudo de viabilidade técnica e econômica da produção de nanocelulose. Projeto Final de Curso de Graduação. Departamento de Engenharia Química e de Petróleo. Escola de Engenharia da Universidade Federal Fluminense. 2016.
- 19. F. G. R. Higa, E. B. Tambourgi, A. A. M. Giannetti. Aplicação do peróxido de hidrogênio como reforço da deslignificação do bagaço de cana-de-açúcar. Exacta. 2012, v. 10, n. 2, p. 281-288.
- 20. F. V. Ferreira, M. Mariano, S. C. Rabelo, R. F. Gouveia, L. M. F. Lona. Isolation and surface modification of cellulose nanocrystals from sugarcane bagasse waste: From a micro- to a nano-scale view. Applied Surface Science. 2018, vol. 436, págs. 1113-1122.
- 21. H. P. Loh, J. Lyons, C. W. White III. Process Equipment Cost Estimation: Final Report. DOE/NETL-2002/1169. Departamento de Energia dos Estados Unidos. 2002.
- 22. M. S. Peter, K. D. Timmerhaus, R. E. West. Plant Design and Economics for Chemical Engineers. McGraw-Hill Book, 5a Ed., 2003.
- 23. R. Turton, R. C. Bailie, W. B. Whiting, J. A. Shaeiwitz. Analysis, Synthesis and Design of Chemical Processes. 2nd Ed. Prentice Hall, New Jersey, EUA, 2003, pág. 977.