

**Produção de etanol:  
uma opção para  
aproveitamento  
de resíduos gerados  
nas indústrias de  
reciclagem de papel**



*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
Embrapa Florestas  
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

## **Documentos 283**

### **Produção de etanol: uma opção para aproveitamento de resíduos gerados nas indústrias de reciclagem de papel**

*Patrícia Raquel Silva Zanoni  
Bruna Grosch Schroeder  
Kássia Gisele Hackbarth Heinz  
Fabrício Augusto Hansel  
Lorena Benathar Ballod Tavares  
Washington Luiz Esteves Magalhães*

## **Embrapa Florestas**

Estrada da Ribeira, Km 111, Guaraituba,

83411-000, Colombo, PR - Brasil

Caixa Postal: 319

Fone/Fax: (41) 3675-5600

[www.embrapa.br/florestas](http://www.embrapa.br/florestas)

[www.embrapa.br/fale-conosco/sac/](http://www.embrapa.br/fale-conosco/sac/)

## **Comitê Local de Publicações**

Presidente: Patrícia Póvoa de Mattos

Secretária-Executiva: Elisabete Marques Oaida

Membros: Elenice Fritzsos, Giselda Maia Rego,

Ivar Wendling, Jorge Ribaski, Luis Claudio Maranhão Froufe,

Maria Izabel Radomski, Susete do Rocio Chiarello Penteadó,

Valderes Aparecida de Sousa

Revisão editorial: Patrícia Póvoa de Mattos

Normalização bibliográfica: Francisca Rasche

Editoração eletrônica: Luciane Cristine Jaques

1ª edição - versão digital (2015)

### **Todos os direitos reservados**

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei no 9.610).

### **Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

#### **Embrapa Florestas**

---

Produção de etanol: uma opção para aproveitamento de resíduos gerados nas indústrias de reciclagem de papel [recurso eletrônico] / Patrícia Raquel Silva Zanoni ... [et al.]. Dados eletrônicos - Colombo : Embrapa Florestas, 2015. (Documentos / Embrapa Florestas, ISSN 1980-3958 ; 283)

Sistema requerido: Adobe Acrobat Reader.

Modo de acesso: World Wide Web.

<<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/item/221>>

Título da página da web (acesso em 28 mar. 2016).

1. Fonte de energia. 2. Combustível. 3. Lodo residual. I. Zanoni, Patrícia Raquel Silva. II. Schroeder, Bruna Grosch. III. Heinz, Kássia Gisele Hackbarth. IV. Hansel, Fabrício Augusto. V. Tavares, Lorena Benathar Ballod. VI. Magalhães, Washington Luiz Esteves. VII. Série.

CDD 661.82 (21. ed.)

# **Autores**

## **Patrícia Raquel Silva Zanoni**

Engenheira química, Doutora em Engenharia,  
Pesquisadora da Embrapa Florestas,  
Colombo, PR

## **Bruna Grosch Schroeder**

Bióloga, Mestranda em Engenharia Ambiental  
da Universidade Regional de Blumenau,  
Blumenau, SC

## **Kássia Gisele Hackbarth Heinz**

Bióloga, Mestranda em Engenharia Ambiental  
da Universidade Regional de Blumenau,  
Blumenau, SC

## **Fabício Augusto Hansel**

Químico, Doutor em Química Analítica, Analista  
da Embrapa Florestas, Colombo, PR

## **Lorena Benathar Ballod Tavares**

Farmacêutica, Doutora em Tecnologia Bioquímica,  
Professora da Universidade Regional de  
Blumenau, Blumenau, SC

## **Washington Luiz Esteves Magalhães**

Engenheiro químico, Doutor em Ciência e  
Engenharia de Materiais, Pesquisador da  
Embrapa Florestas, Colombo, PR



# Apresentação

Incontestavelmente, o setor de papel e celulose assume posição de destaque, tanto no cenário econômico brasileiro como mundial, uma vez que representa uma das mais importantes atividades produtivas. Entretanto, para manter a competitividade e seguir crescendo, precisa estar atento aos critérios de sustentabilidade que incluem não somente aspectos econômicos, mas também sociais e ambientais.

Diante da concorrência e das pressões socioambientais contemporâneas, as indústrias devem, regularmente, reavaliar seus processos, para evitar, tanto quanto possível, a geração de “resíduos” e, quando inevitável, garantir que sejam destinados a outros processos ambientalmente adequados.

Na atualidade, ainda é comum encontrar áreas imensas imobilizadas e repletas de resíduos sólidos gerados e dispostos por empresas de papel e celulose.

Para mudar este cenário, empresas produtoras de papel e celulose e recicladoras de papel têm constantemente procurado o auxílio da Embrapa Florestas. Uma das principais alternativas estudadas pela unidade da Embrapa tem sido a incorporação de resíduos em solos como insumo para plantios florestais, cujos resultados têm sido amplamente divulgados em publicações técnicas e científicas.

Em 2012, foram iniciadas pesquisas para avaliar outras possibilidades de aplicação, tais como a utilização de lodos gerados no tratamento de efluentes de recicladoras de papel, como matéria-prima para obtenção de etanol, já que possuem uma fração celulósica com características favoráveis a esta aplicação.

Portanto, a presente publicação mostra os resultados obtidos até o momento nos testes executados em escala laboratorial, bem como discute pontos positivos e negativos do processo.

*Sergio Gaiad*

Chefe de Pesquisa e Desenvolvimento

# Sumário

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Introdução .....</b>  | <b>9</b>  |
| <b>Princípios gerais da produção do etanol celulósico .....</b>  | <b>10</b> |
| <b>Testes de hidrólise enzimática com diferentes lodos .....</b> | <b>13</b> |
| <b>Testes de produção de etanol.....</b>                         | <b>16</b> |
| <b>Considerações gerais sobre o processo .....</b>               | <b>19</b> |
| Vantagens.....   | 19        |
| Limitações .....   | 20        |
| <b>Conclusões .....</b>  | <b>21</b> |
| <b>Agradecimentos .....</b>                                      | <b>21</b> |
| <b>Referências .....</b>   | <b>22</b> |



## Introdução

As indústrias do setor de papel e celulose produzem grande quantidade de resíduos sólidos, incluindo lodos resultantes do tratamento de efluentes. O material sólido separado por sedimentação no clarificador primário, denominado lodo primário, consiste principalmente de fibras curtas não recicláveis, finos, contaminantes e cargas usadas no processo de produção de papel (CHEN et al., 2014; LIKON; TREBŠE, 2012). A composição deste tipo de resíduo pode variar sensivelmente, conforme o tipo de processo, a matéria-prima utilizada e o produto final a ser obtido. Além disso, dependendo do processo, podem ser gerados de 20 a 400 kg de lodo seco por tonelada de papel produzido (FOELKEL, 2010). Normalmente, maiores quantidades de resíduo são geradas quando se utilizam fibras recicladas (15-30% do papel produzido, base seca), em comparação com fibras virgens (3-4%) (CHEN et al., 2014; MAHMOOD; ELLIOTT, 2006). Em geral, apresenta grandes quantidades de água e a produção do lodo úmido pode chegar a uma tonelada, por tonelada de papel produzido. Assim, o aproveitamento deste resíduo é um importante desafio para o segmento de papel e celulose (FOELKEL, 2010).

Infelizmente, uma das formas mais empregadas de destinação é a disposição em aterros industriais, próprios ou de terceiros. Muitos destes lodos são classificados como resíduos Classe IIA – não inerte, conforme a norma NBR 10004 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004), exigindo, portanto, procedimentos adequados de controle e monitoramento ambiental. Constituem um passivo ambiental permanente para as empresas, além de representarem altos custos de manutenção (seja aterro próprio ou terceirizado), enormes áreas imobilizadas e possibilidade de multas ambientais em caso de irregularidades na operação. A empresa perde, ainda, a oportunidade de agregar valor ao resíduo, pois se trata de um subproduto que poderia ser utilizado como matéria-prima para outro processo.

Algumas opções de valorização, já adotadas pelas empresas ou em desenvolvimento, incluem: processos de compostagem do lodo (LIKON; TREBŠE, 2012), incorporação em solos destinados a plantios agrícolas ou florestais (COSTA, 2007; DEDECECK et al., 2007; MAEDA et al., 2011), incineração (GAVRILESCU, 2008), processos de co-processamento e incorporação em cimento (FRÍAS et al., 2011), produtos cerâmicos (FURLANI et al., 2011), compósitos poliméricos (SON et al., 2004), uso para pavimentação de estradas (MACHADO et al., 2006), fabricação de material absorvente (LIKON; TREBŠE, 2012) e como matéria-prima para a obtenção de etanol (BALLESTEROS et al., 2002; CHEN et al., 2014; FAN et al., 2003; FAN; LYND, 2007; KANG et al., 2010, 2011; LARK et al., 1997; MARQUES et al., 2008).

Lodos primários de indústrias de papel e celulose apresentam algumas características favoráveis para a produção de etanol, como baixa quantidade de lignina e teor significativo de celulose, com maior susceptibilidade para liberação de açúcares fermentescíveis.

Motivados pela escassez de pesquisas sobre o tema no Brasil e pela demanda de empresas recicladoras de papel por melhores opções de aproveitamento de seus resíduos, foram realizados experimentos com o objetivo de avaliar em escala de laboratório a viabilidade técnica de obtenção de etanol a partir de lodos celulósicos gerados no processo de reciclagem de papel. Este documento reporta alguns resultados obtidos até o momento no contexto do projeto “Florestas energéticas: produção e conversão sustentável de biomassa em energia”, plano de ação “Produção de etanol a partir de resíduo da indústria de reciclagem de papel”.

## **Princípios gerais da produção do etanol celulósico**

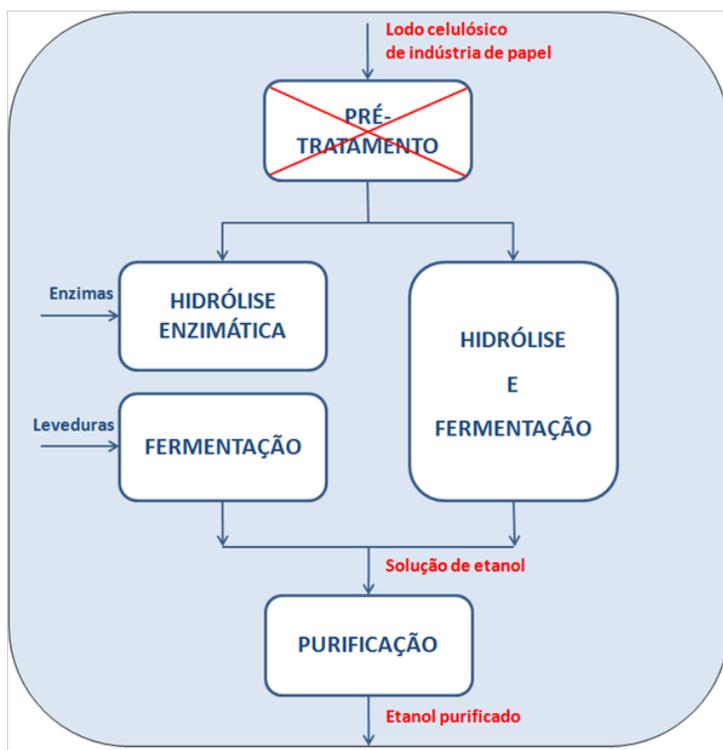
Para a produção do etanol a partir da celulose por processo biológico é necessário que esta seja exposta a enzimas celulolíticas

que promoverão a **hidrólise enzimática**. O produto de interesse desta hidrólise são os açúcares, principalmente a glicose. A seguir, estes açúcares são convertidos a etanol em um processo de **fermentação**, semelhante ao já usado na produção de etanol de primeira geração a partir da cana-de-açúcar. Por fim, processos de purificação, como a destilação, são empregados para a obtenção do produto final (GALBE; ZACCHI, 2002; JARDINE et al., 2009; TAHERZADEH; KARIMI, 2007).

Quando a origem da celulose é a madeira, é necessário que haja um **pré-tratamento** para remover a lignina e expor os hidrocarbonetos (celulose e hemicelulose, principalmente) às enzimas (MOSIER et al., 2005; WYMAN et al., 2005). O processo de polpação da madeira para a fabricação de polpa de celulose, por exemplo, pode ser considerado como um pré-tratamento.

O pré-tratamento é quase sempre efetuado em uma etapa inicial, separada da hidrólise e da fermentação. Todavia, estes dois últimos processos biotecnológicos podem ser realizados de forma independente ou combinada. Na configuração denominada **hidrólise e fermentação** separadas (**SHF** - *separate hydrolysis and fermentation*) a hidrólise da celulose e a subsequente fermentação da glicose são realizadas em diferentes etapas. Na **hidrólise e fermentação** simultâneas (**SSF** - *simultaneous saccharification and fermentation*) os dois processos são conduzidos em uma única etapa. Neste último caso, enquanto as enzimas promovem a hidrólise dos carboidratos em açúcares simples, estes já são convertidos em etanol por ação da levedura. As principais vantagens desta tecnologia são a redução de custos de equipamento e de tempo, e a diminuição da inibição das enzimas causada pela glicose, já que a conversão simultânea em etanol evita o acúmulo de açúcares no meio. A principal desvantagem do SSF em relação ao SHF, no entanto, é o fato de não ser possível operar as duas etapas (hidrólise e fermentação) em suas temperaturas ótimas (que normalmente são de 50 e 30 °C, respectivamente).

Uma das grandes vantagens da utilização de lodos celulósicos da indústria de papel é justamente o fato de que os carboidratos presentes estão mais prontamente acessíveis do que em uma madeira bruta, por exemplo. Isto porque este material já foi submetido a um tratamento prévio durante o processamento do papel, podendo tornar dispensável a etapa inicial de pré-tratamento, normalmente requerida para a produção de etanol lignocelulósico e que é uma das mais dispendiosas do processo (Figura 1).



**Figura 1.** Fluxograma para obtenção de etanol a partir de lodos celulósicos da indústria de papel.

## Testes de hidrólise enzimática com diferentes lodos

Lodos oriundos do reciclo de papel apresentam grandes variações em sua composição, o que pode impactar os rendimentos da hidrólise enzimática. Por este motivo, experimentos foram realizados para avaliar separadamente a etapa de hidrólise e verificar a influência do tipo de material testado.

A amostra de Lodo 1 (Figura 2), utilizada para os ensaios de produção de etanol, foi coletada na estação de tratamento de efluentes de uma empresa de Santa Catarina que produz papéis da linha higiênica (*tissue*) a partir de aparas de papel reciclado. Este subproduto apresenta elevado teor de umidade, 33% de carboidratos e 58% de compostos inorgânicos, provavelmente relacionados às cargas utilizadas na fabricação de papel, como carbonato de cálcio, caulim, talco, dióxido de titânio, e metais das tintas de impressão (FAN; LYND, 2007; MARQUES et al., 2008). Além do Lodo 1, foram submetidas a estes testes outras duas amostras, Lodo 2 e resíduo fibroso (Figura 3), provenientes de tratamento de efluentes de uma segunda empresa de reciclagem de papel, também localizada em Santa Catarina. Na tabela são apresentadas as características físico-químicas do Lodo 1 (SCHROEDER, 2014; SCHROEDER et al., 2015) e dos outros resíduos.



Foto: Patrícia Raquel Silva Zanoni

**Figura 2.** Amostra de lodo coletado na Empresa 1 de reciclagem de papel (Lodo 1).

**Tabela 1.** Características físico-químicas dos resíduos de reciclagem de papel testados.

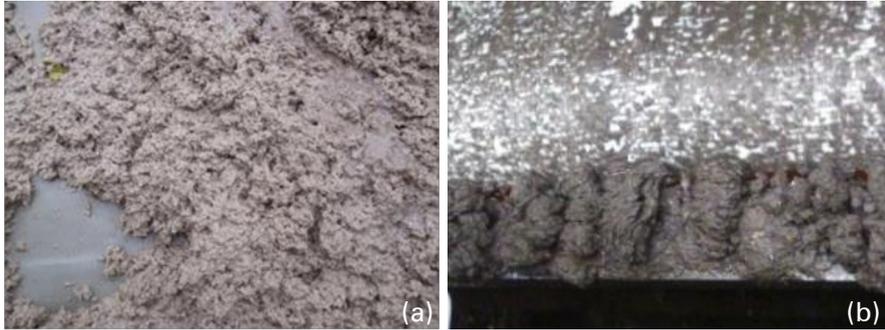
| Análise                             | Lodo 1       | Lodo 2      | Resíduo fibroso |
|-------------------------------------|--------------|-------------|-----------------|
| % massa, base seca                  |              |             |                 |
| Umidade (base úmida)                | 66,3         | 82,0        | 91,8            |
| Cinzas totais                       | 57,7         | 36,5        | 8,3             |
| <i>Cinzas insolúveis em ácido</i>   | 11,8         | -           | -               |
| <i>Cinzas solúveis em ácido</i>     | 45,9         | -           | -               |
| Extrativos                          | 3,5          | -           | -               |
| Lignina solúvel                     | 0,4          | -           | -               |
| Lignina/material orgânico insolúvel | 7,4          | -           | -               |
| Carboidratos                        | 33,5         |             |                 |
| <i>Glucana / glicose</i>            | 27,8 / 30,88 | 23,8 / 26,4 | 40,2 / 44,7     |
| <i>Xilana/xilose</i>                | 5,7 / 6,52   | 1,4 / 1,6   | 3,5 / 4,0       |

Fonte: Heinz (2015) e Schroeder (2014).

Destaca-se principalmente a diferença entre os teores de cinzas dos três tipos de resíduos. Para padronização, todas as amostras foram testadas com o mesmo teor de umidade (corrigido por filtração a vácuo quando necessário) e em concentrações de sólidos que correspondessem à mesma concentração de açúcares máxima.

Nestes experimentos, foi realizada somente a etapa de hidrólise enzimática (sem fermentação), com duas dosagens de enzima: 6% e 30% (massa de enzima/massa de holocelulose). A última representa a condição de excesso de enzima para fornecer uma indicação da quantidade máxima possível de ser hidrolisada enzimaticamente.

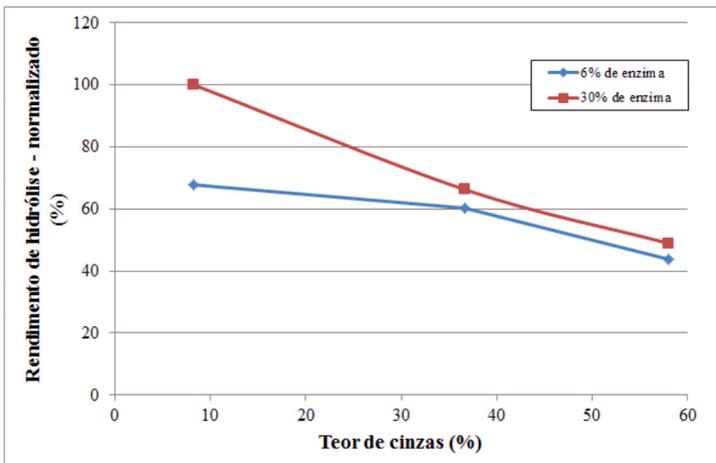
Fotos: Kássia Gisele Hackbarth Heinz



**Figura 3.** (a) Resíduo fibroso e (b) Lodo 2, coletados na Empresa 2.

Os rendimentos da hidrólise variaram sensivelmente para os diferentes tipos de resíduos, sobretudo para a condição de maior dosagem de enzima (Figura 4). Rendimentos crescentes foram obtidos conforme o teor de cinzas diminuiu entre os resíduos, atingindo valor máximo para o material que continha o menor teor de compostos inorgânicos (resíduo fibroso).

Dependendo da tecnologia e da matéria-prima empregada pela indústria, as características do resíduo podem variar sensivelmente e, conseqüentemente, podem afetar diferentemente a digestibilidade enzimática dos materiais.



**Figura 4.** Rendimentos normalizados de hidrólise para resíduos com diversos teores de cinzas. Fonte: Heinz (2015)

## Testes de produção de etanol

Os testes para obtenção de etanol foram realizados em escala laboratorial apenas para o Lodo 1, caracterizado anteriormente (Tabela 1).

Foram usados frascos do tipo Erlenmeyer acoplados a válvulas *air-lock* contendo água, que impedem a entrada de ar e permitem a saída do gás carbônico gerado durante a fermentação (Figura 5). Duas configurações de processo foram testadas: **hidrólise e fermentação separadas (SHF)** e **hidrólise e fermentação simultâneas (SSF)**.

Como agente de fermentação, foi utilizada a levedura *Saccharomyces cerevisiae* JP1, adquirida comercialmente da empresa AEB Bioquímica Latino Americana S/A na forma liofilizada. A hidrólise foi promovida por um coquetel enzimático doado pela empresa Novozymes Latin America, que consiste em uma mistura de celulases,  $\beta$ -glicosidases e hemicelulase (SCHROEDER, 2014; SCHROEDER et al., 2015).

Foto: Patrícia Raquel Silva Zanoni

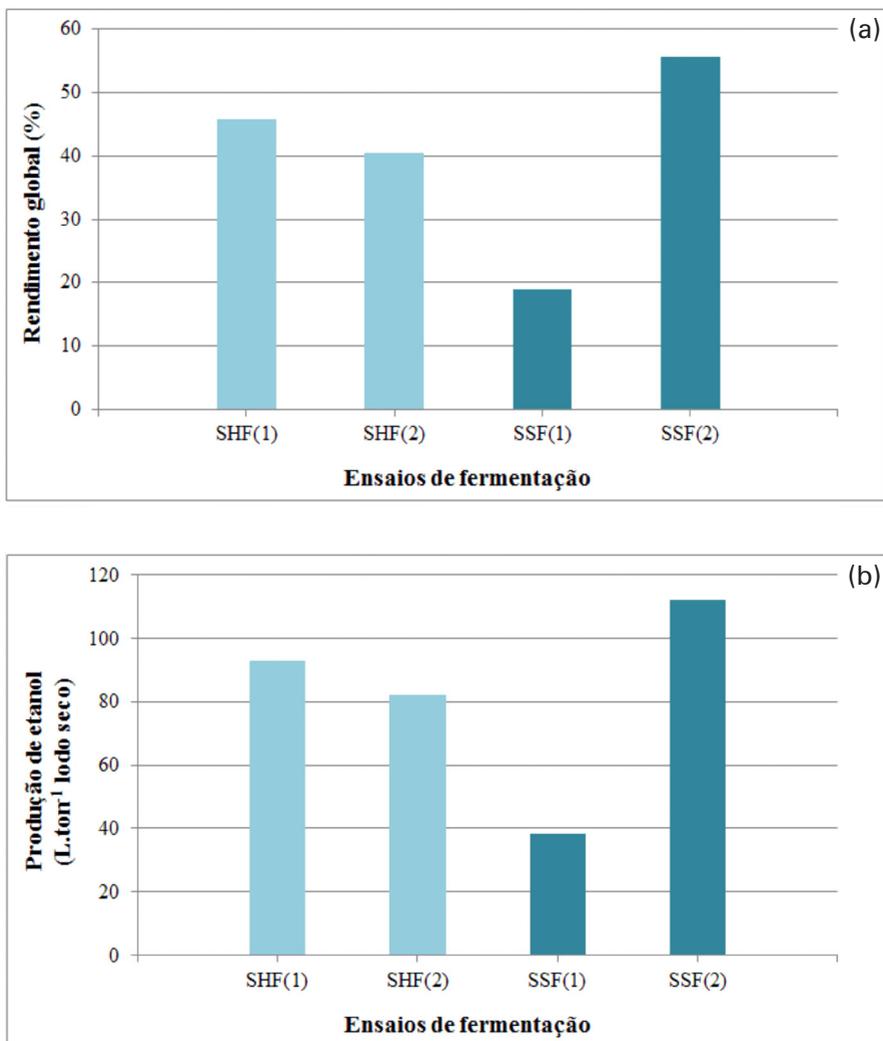


**Figura 5.** Fermentação etanólica em frascos agitados com válvula *air-lock*.

Na Figura 6a são apresentados os rendimentos globais da produção de etanol para as diferentes condições testadas, considerando o processo completo (hidrólise e fermentação). Tal valor representa quanto de etanol foi produzido na prática em relação ao máximo possível de ser obtido se todos os açúcares fossem convertidos integralmente. O melhor desempenho foi obtido utilizando a configuração de hidrólise e fermentação simultâneas em presença de tampão – SSF(2). Além de maior rendimento, esta estratégia permitiu menores tempos globais de processo, quando comparados aos resultados do SHF em condições similares - SHF(2). Além disso, os resultados indicaram que não é necessária suplementação nutricional para que o lodo possa ser fermentado, já que não houve diferença estatisticamente significativa entre SHF(1) e SHF(2), conforme teste t-Student ( $p > 0,05$ ).

Com base no melhor resultado obtido nestes testes preliminares, estima-se que poderiam ser obtidos 129 L de etanol por ton de lodo seco proveniente da indústria de reciclagem de papel (Figura 6b). Obviamente, trata-se apenas de uma aproximação, já que se limita às condições testadas neste estudo e ao tipo de lodo utilizado.

A etapa limitante do processo é a hidrólise enzimática, cuja eficiência provavelmente é afetada pelo elevado teor de compostos inorgânicos no lodo. A presença de substâncias alcalinas (como carbonato de cálcio) eleva o pH do meio para valores acima da faixa ótima recomendada para ação das enzimas, prejudicando o rendimento da hidrólise. Além disto, alguns compostos inorgânicos podem formar complexos com as enzimas, causando sua desativação (CHEN et al., 2014; KANG et al., 2010, 2011).



**Figura 6.** (a) Rendimentos globais e (b) Produção de etanol em diferentes condições testadas. SHF(1) - Hidrólise e fermentação separadas, com tampão e com suplementação nutricional; SHF(2) - Hidrólise e fermentação separadas, com tampão e sem suplementação nutricional; SSF(1) - Hidrólise e fermentação simultâneas, sem tampão e com suplementação nutricional; SSF(2) - Hidrólise e fermentação simultâneas, com tampão e sem suplementação nutricional.

## Considerações gerais sobre o processo

### Vantagens

- Por ter sido submetido ao processo de fabricação de papel, o material dispensa pré-tratamento, uma das etapas mais dispendiosas da produção de etanol a partir de biomassas lignocelulósicas;
- Redução do impacto ambiental associado à disposição destes lodos em aterro. Após os processos de hidrólise e fermentação, ainda restará material sólido a ser destinado, porém em menor quantidade do que o resíduo original, já que parte da fração orgânica terá sido convertida. Além disso, o material residual apresenta, em geral, menor capacidade de retenção de água, o que resulta em menor volume a ser disposto;
- Benefícios econômicos para as empresas do setor, pois há diminuição de gastos com disposição do lodo (seja em aterro próprio ou terceirizado) e agregação de valor ao subproduto (“resíduo”);
- Produção de um biocombustível que, em substituição aos combustíveis fósseis, promove a redução das emissões de gases de efeito estufa gerados na combustão. É importante destacar que para o Brasil a motivação principal da tecnologia seria a destinação do resíduo e não o aumento da produção de etanol propriamente dita, pois a quantidade de biocombustível que seria possível obter é pequena em relação à produção atual do país. No entanto, esta tecnologia poderia representar um aumento expressivo na produção alcooleira em regiões sem tradição neste setor, mas com elevada capacidade de produção de papel e celulose, tais como Ásia e Europa;
- Além da obtenção de etanol, a hidrólise enzimática de resíduos do setor de papel e celulose poderia ser realizada com o objetivo de gerar açúcares para a obtenção de outros produtos químicos de maior valor agregado;
- A reciclagem de papel apresenta forte apelo ambiental. Portanto, melhorias na destinação dos resíduos gerados em sua operação contribuiriam para aumentar a sustentabilidade do processo.

## Limitações

- A presença de elevados teores de substâncias inorgânicas no lodo pode reduzir o rendimento do processo, além de exigir maiores volumes de reatores. Por este motivo, é provável que lodos provenientes de processos de reciclagem que utilizam aparas de papel marrom (ondulado e kraft) permitam maiores conversões do que os de aparas brancas. Outra opção é realizar um tratamento prévio para remoção das cinzas do lodo, utilizando, por exemplo, operações de neutralização (MARQUES et al., 2008) e/ou peneiramento (CHEN et al., 2014; KANG et al., 2011). Entretanto, é preciso fazer uma análise financeira para verificar se os custos adicionais seriam compensados pelo aumento de rendimento do processo;
- Além da grande heterogeneidade deste tipo de matéria-prima, sua geração é descentralizada e, considerando a hipótese de instalação de uma central de processamento deste resíduo em etanol, a viabilidade do processo dependeria fortemente do custo de transporte. Um agravante é a alta capacidade de retenção de umidade deste resíduo, podendo chegar a 700 kg de água por ton de lodo úmido;
- Com exceção da etapa do pré-tratamento, o processo estaria sujeito às limitações atuais da produção de etanol lignocelulósico, tais como: custo das enzimas hidrolíticas, dificuldades na fermentação das pentoses e restrições de rendimento de hidrólise e fermentação em condições de alta concentração de açúcares e de etanol;
- Contínuas melhorias têm sido adotadas pelas indústrias do setor de papel e celulose para reduzir perdas nos processos. Portanto, há tendência de diminuição da fração celulósica nos resíduos gerados. Por outro lado, há também tendência de aumento do percentual de reciclagem de papel no mundo.

## **Conclusões**

É tecnicamente viável produzir etanol a partir de lodos coletados no processo de reciclagem de papel, porém são necessários estudos adicionais para otimização do processo, visando ao aumento do rendimento, produtividade e concentração do produto final. Além disso, testes em maior escala são necessários para validar os resultados laboratoriais obtidos. Por fim, devem ser conduzidas avaliações da viabilidade ambiental e da viabilidade financeira/econômica do processo, em comparação com as demais opções disponíveis para destinação e aproveitamento destes lodos.

A presente tecnologia enquadra-se no atual conceito de biorrefinarias, em que se pretende maximizar o aproveitamento dos insumos, para a obtenção de produtos químicos, energia e materiais, e minimizar os impactos econômicos e ambientais associados à geração de resíduos.

## **Agradecimentos**

À FAPESC, pela concessão de bolsa de mestrado; e ao CNPq, pela concessão de bolsas de produtividade, de mestrado e de iniciação científica durante a realização desta pesquisa.

À empresa Novozymes, pela doação da enzima utilizada para hidrólise.

Às assistentes Tiélidy de Lima e Dayanne Mendes e às estagiárias Eloá Ramos, Alexandra Dominguez e Bruna Pugsley, pelo apoio nos ensaios laboratoriais.

# Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 2004. 71 p.

BALLESTEROS, M.; OLIVA, J. M.; MANZANARES, P.; NEGRO, M. J.; BALLESTEROS, I. Ethanol production from paper material using a simultaneous saccharification and fermentation system in a fed-batch basis. **World Journal of Microbiology & Biotechnology**, Oxford, v. 18, n. 6, p. 559-561, 2002. DOI: 10.1023/A:1016378326762.

CHEN, H.; HAN Q.; DANIEL, K.; VENDITTI, R.; JAMEEL, H. Conversion of industrial paper sludge to ethanol: fractionation of sludge and its impact. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, Clifton, v. 174, p. 2096-2113, 2014. DOI: 10.1007/s12010-014-1083-z.

COSTA, E. R. O. **Alterações químicas no solo e na água de percolação após aplicação de resíduos de fábrica de papel reciclado em *Pinus taeda* L.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

DEDECECK, R. A.; BELLOTE A. F. J.; MENEGOL O. Influence of residue management and soil tillage on second rotation eucalyptus growth. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 74, p. 9-17, 2007.

FAN, Z.; LYND, L. R. Conversion of paper sludge to ethanol, II: process design and economic analysis. **Bioprocess and Biosystems Engineering**, v. 30, n. 1, p. 35-45, 2007. DOI: 10.1007/s00449-006-0092-x.

FAN, Z.; SOUTH, C.; LYFORD, K.; MUNSIE, J.; WALSUM, P. VAN; LYND, L. R. Conversion of paper sludge to ethanol in a semicontinuous solids-fed reactor. **Bioprocess and Biosystems Engineering**, v. 26, n. 2, p. 93-101, 2003. DOI: 10.1007/s00449-003-0337-x.

FOELKEL, C. Resíduos sólidos industriais do processo de fabricação de celulose e papel de eucalipto. Parte 03: Lodos & Lodos. In: EUCALYPTUS OnLine Book & Newsletter. 2010. Disponível em: <[http://www.eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT20\\_LODOS.pdf](http://www.eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT20_LODOS.pdf)>. Acesso em: 25 jun. 2015.

FRÍAS, M.; VEGAS, I.; VILLA, R. V. de la; GIMÉNEZ, G. Recycling of waste paper sludge in cements: characterization and behavior of new eco-efficient matrices, In: KUMAR, S. (Ed.). **Integrated waste management**. [S.l.]: InTech, 2011. p. 301-318. DOI: 10.1680/adcr.2008.20.1.23.

FURLANI, E.; TONELLO, G.; MASCHIO, S.; ANEGGI, E.; MINICHELLI, D.; BRUCKNER, S.; LUCCHINI, E. Sintering and characterisation of ceramics containing paper sludge, glass cullet and different types of clayey materials. **Ceramics International**, Faenza, v. 37, p. 1293-1299, 2011. DOI: 10.1016/j.ceramint.2010.12.005.

GALBE, M.; ZACCHI, G. A review of the production of ethanol from softwood. **Applied Microbiology and Biotechnology**, Clifton, v. 59, n. 6, p. 618-28, 2002. DOI: 10.1007/s00253-002-1058-9.

GAVRILESCU, D. Energy from biomass in pulp and paper mills. **Environmental Engineering and Management Journal**, v. 7, p. 537-546, 2008.

HEINZ, K. G. H. **Produção de enzimas celulolíticas por fungo isolado de resíduo da reciclagem de papel e hidrólise de biomassas celulósicas**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Regional de Blumenau, Blumenau.

JARDINE, J. G.; DISPATO, I.; PERES, M. R. **Considerações sobre o bioetanol lignocelulósico para subsidiar a elaboração de conteúdo da árvore do conhecimento Agroenergia**. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2009. 28 p. (Embrapa Informática Agropecuária. Documentos, 95). Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/631725>>.

KANG, L.; WANG, W.; LEE, Y. Y. Bioconversion of kraft paper mill sludges to ethanol by SSF and SSCF. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, Clifton, v. 161, n. 1-8, p. 53-66, 2010. DOI: 10.1007/s12010-009-8893-4.

KANG, L.; WANG, W.; PALLAPOLU, V. R.; LEE, Y. Y. Enhanced ethanol production from deashed paper sludge by simultaneous saccharification and fermentation and simultaneous saccharification and co-fermentation. **BioResources**, v. 6, p. 3791-3808, 2011. DOI: 10.15376/biores.6.4.3791-3808.

LARK, N.; XIA, Y.; QIN, C.; GONG, C. Production of ethanol from recycled paper sludge using cellulase and yeast, *Kluyveromyces marxianus*. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 12, n. 2, p. 135-143, 1997. DOI: 10.1016/S0961-9534(96)00069-4.

LIKON, M.; TREBŠE, P. Recent advances in paper mill sludge management, In: SHOW, K-Y. (Ed.). **Industrial Waste**. [S.l.]: InTech, 2012. p. 73-90. Disponível em: <<http://www.intechopen.com/books/industrial-waste/papermill-sludge-as-valuable-raw-material>>. Acesso em: 25 jun. 2015.

MACHADO, C. C.; PIRES, J. M. M.; PEREIRA, R. S.; FONTES, M. P. F.; LIMA, D. C. de. Comportamento Químico e Ambiental de Resíduos Sólidos em Pavimentos de Estradas Florestais. **Scientia Florestalis**, Piracicaba, n. 70, p. 131-136, 2006.

MAEDA, S.; SILVA, H. D. da; COSTA, E. R. O.; BOGNOLA, I. A. **Aplicação de lodo celulósico em plantios de pinus**. Colombo: Embrapa Florestas, 2011. 6 p. (Embrapa Florestas. Comunicado Técnico, 283). Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/898070>>.

MAHMOOD, T.; ELLIOTT, A. A review of secondary sludge reduction technologies for the pulp and paper industry. **Water Research**, New York, v. 40, p. 2093-2112, 2006. DOI: 10.1016/j.watres.2006.04.001.

MARQUES, S.; ALVES, L.; ROSEIRO, J.; GIRIO, F. Conversion of recycled paper sludge to ethanol by SHF and SSF using *Pichia stipitis*. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 32, n. 5, p. 400-406, 2008. DOI: 10.1016/j.biombioe.2007.10.011.

MOSIER, N.; WYMAN, C.; DALE, B.; ELANDER, R.; LEE, Y. Y.; HOLTZAPPLE, M., et al. Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. **Bioresource Technology**, v. 96, n. 6, p. 673-86, 2005. DOI:10.1016/j.biortech.2004.06.025.

SCHROEDER, B. G. **Estudo de aplicação de lodo de reciclagem de papel em processo de produção de etanol lignocelulósico**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Regional de Blumenau, Blumenau.

SCHROEDER, B. G.; ZANONI, P. R. S.; MAGALHÃES, W. L. E.; HANSEL, F. A.; TAVARES, L. B. B. Evaluation of biotechnological processes to obtain ethanol from recycled paper sludge. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, Online first, 2015. DOI:10.1007/s10163-015-0445-0.

SON, J.; YANG, H. S.; KIM, H. J. Physico-mechanical properties of paper sludge-thermoplastic polymer composites. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, v. 17, p. 509-522, 2004. DOI: 10.1177/0892705704038471.

TAHERZADEH, M. J.; KARIMI, K. Enzyme-based hydrolysis processes for ethanol from lignocellulosic materials: a review. **BioResources**, v. 2, n. 4; p. 707-738, 2007.

WYMAN, C. E.; DALE, B. E.; ELANDER, R. T.; HOLTZAPPLE, M.; LADISCH, M. R.; LEE, Y. Y. Coordinated development of leading biomass pretreatment technologies. **Bioresource Technology**, v. 96, n. 18, p. 1959-66, 2005. DOI:10.1016/j.biortech.2005.01.010.

**Embrapa**

---

**Florestas**

Ministério da  
**Agricultura, Pecuária  
e Abastecimento**

GOVERNO FEDERAL  
**BRASIL**  
PÁTRIA EDUCADORA