

INTERDISCIPLINARIDADE NO ENSINO NA ENGENHARIA DE ENERGIA: BIOMASSA – ÁLCOOL DE CELULOSE

Eduardo Eustáquio Ferreira Barbosa; Germano Alves Batista; Ivan Magela Corgozinho; Marcos Vinícius Eloy Xavier; Renan Veloso Gomes¹, Otávio Avelar Esteves²

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, IPUC
Av. Dom José Gaspar, 500 Coração Eucarístico
CEP: 30535-901 – Belo Horizonte – Minas Gerais

Resumo: *A Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais - PUC Minas, por meio de seu Instituto Politécnico - IPUC, assumiu o desafio de criar o curso de Engenharia da Energia, com uma concepção inovadora. Seu projeto pedagógico, que se propõe a romper paradigmas vigentes, procura incorporar significativos avanços no ensino da engenharia. Um dos aspectos fundamentais do projeto é a introdução dos “Trabalhos Acadêmicos Integradores - TAI”, que tem como objetivo central a elaboração de um projeto, que, acima de tudo, visa a articulação, a contextualização e a significação dos conteúdos estudados nas disciplinas. Os dois primeiros períodos com duração de seis meses cada, cumprem ainda o papel de promover a formação do sujeito universitário. O presente trabalho foi elaborado como resultado do TAI de um grupo de alunos do segundo período do curso, que escolheram o tema “BIOMASSA: Álcool de Celulose”. Neste documento está contido o plano de trabalho para execução do projeto, a revisão bibliográfica sobre o tema, análise de resultados obtidos em laboratório e considerações sobre os processos e métodos para produção do Álcool de Celulose.*

Palavras-Chave: *Interdisciplinaridade, Ensino da engenharia, Álcool de celulose, Hidrólise enzimática, Celulase*

1. INTRODUÇÃO

Os dias de hoje são caracterizados pelo grande crescimento populacional, a exploração indiscriminada do meio-ambiente e a evidente tendência de esgotamento das tradicionais fontes de energia. Assim, é possível prever-se que a falta de investimento no desenvolvimento de novas rotas tecnológicas pode acarretar uma forte retração econômica e a inflação em patamares altíssimos, devido à dependência excessiva por essas fontes. A biomassa se torna a protagonista dentro deste contexto, devido aos materiais lignocelulósicos serem utilizáveis, tanto para geração de eletricidade, quanto para a produção de álcool (etanol).

¹ Alunos do 2º período do curso de Engenharia de Energia da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

² Orientador e Coordenador do Curso de Engenharia de Energia da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

Como nova fonte de energia o uso dos resíduos da cana-de-açúcar, das usinas de açúcar e de álcool, também representam nova fonte de recursos financeiros. O Brasil hoje é o segundo maior produtor mundial de etanol e o maior produtor a partir da cana-de-açúcar, gerando grande quantidade de bagaço. Centros de pesquisas mundiais estão sendo criados – principalmente nos Estados Unidos – para desenvolvimento de novos processos, aumento da produtividade e redução dos custos no processo de hidrólise enzimática, para o aproveitamento deste tipo de subproduto.

A hidrólise da celulose é um processo conhecido há muitos anos. Porém, o seu uso em escala industrial a preços competitivos é a grande dificuldade, que tem inviabilizado o processo. No presente trabalho encontram-se descritos os processos de produção e uma discussão sobre a viabilidade dos mesmos e as principais barreiras para que o álcool de celulose se torne realidade em escala industrial.

Como os Trabalhos Acadêmicos Integradores – TAI, cumprem o papel de articulação, contextualização e significação dos conteúdos estudados nas disciplinas em curso no período, cria-se no estudante uma visão abrangente da questão prática do ato de “engenheirar”, quanto a preocupação que essa prática possa refletir na sociedade.

2. O CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIA

O ensino de engenharia tem encontrado sérias dificuldades em todo mundo nos dias atuais. Segundo ERTAS (2003), uma das maiores causas é o constante e acelerado desenvolvimento científico e tecnológico, que continuamente altera o objeto de trabalho da engenharia – a tecnologia. De acordo com os autores, os programas transdisciplinares são alternativas para essas dificuldades. A educação e a pesquisa devem ser transdisciplinares, por utilizar ferramentas, técnicas e métodos de diferentes disciplinas. Nesse sentido a Universidade passa a ser vista como o lugar de idéias e não como o lugar onde estão organizadas as disciplinas acadêmicas, que são manifestações do reducionismo, que por se desenvolverem circunscritas a seus próprios limites, tendem a minimizar as interações com o universo de outras áreas.

Os sistemas educacionais devem responder aos anseios contemporâneos da sociedade, criando um novo conceito de educação transdisciplinar que, mesmo baseado no reconhecimento da existência das disciplinas, crie a possibilidade de existência de uma forte conexão e interação interdisciplinar e, como resultado, propicie uma fusão multidisciplinar.

Ainda segundo os autores, este novo conceito considera que as ciências dos processos e dos projetos são as chaves para a educação transdisciplinar. O fio que une e integra todas as disciplinas consiste exatamente na idéia dos processos e dos projetos.

Essa nova metodologia de ensino atende à necessidade do estudante de avaliar as mudanças na tecnologia, tomar decisões conscientes e autônomas na apropriação dessas mudanças e, sobretudo, favorece a desejável formação integradora dos conceitos, relacionada aos aspectos da energia, pretendida no projeto pedagógico proposto.

Segundo ESTEVES (2004), as diretrizes didático-pedagógicas propostas para o Curso de Engenharia de Energia têm como referência uma concepção que seja condizente com essa nova modalidade de engenharia, uma vez que se refere a um objeto de estudos que, para ser tratado de forma ampla e global, exige uma abordagem efetivamente integradora. Acresça-se a isto o fato de se tratar de uma área de atuação emergente quanto à sua demanda e dinâmica em função das constantes alterações que o cenário mundial tem demonstrado nesse campo. A

partir desse referencial é que se propôs a concepção básica para o curso de Engenharia de Energia, na qual podem-se destacar:

- Aliar a proposição de “Trabalhos Acadêmicos Integradores - TAI” ao ensino disciplinar;
- Organizar o curso em cinco grandes “Ciclos de Amadurecimento da Formação do Aluno”, constituídas de dois períodos cada.

Os “*TAI*” representam o cerne do Projeto Pedagógico do Curso de Engenharia de Energia, em torno do quais os outros trabalhos acadêmicos da organização curricular “gravitam”, desempenhando o papel de integradores dos conhecimentos. Assim, em cada período do curso há um *TAI*, que deverá articular os conhecimentos desenvolvidos até aquele momento e enfatizar os conhecimentos trabalhados naquele período. São inseridos na estrutura curricular do curso com os objetivos de:

- Propiciar interação e integração entre os diversos campos dos conhecimentos adquiridos;
- Propiciar uma visão aplicada dos conhecimentos adquiridos;
- Contextualizar os conhecimentos adquiridos em relação às demandas sociais;
- Favorecer a articulação entre os conhecimentos teóricos e práticos;
- Estimular o desenvolvimento da autonomia do aluno;
- Desenvolver o conhecimento das técnicas de elaboração de projetos.

Para ampliar suas possibilidades e enriquecer o ambiente de trabalho, os *TAI* são ministrados simultaneamente por mais de um professor (de dois a quatro, dependendo da dimensão da turma), o que permite que os estudantes sejam expostos a vários pontos de vista, propiciando-lhes uma diversidade de visões e maior abrangência da abordagem desejável ao tema.

No âmbito dos Trabalhos Acadêmicos Integradores, as aulas formais são substituídas por: elaboração de projetos, trabalhos práticos, estudos dirigidos, experimentos, práticas investigativas, debates, seminários e práticas afins. Os docentes atuam como instrutores, tendo a função precípua de atuar como facilitadores, ao invés de se portarem como os detentores do saber. Os trabalhos são concebidos e desenvolvidos, de forma que seus objetivos sejam sempre mantidos como foco, ficando a busca da aprendizagem dos conteúdos desenvolvidos nas demais disciplinas, como consequência.

A organização curricular do curso, assim como as respectivas práticas pedagógicas, estão estruturadas em cinco grandes Ciclos de Amadurecimento da Formação do Aluno:

- Formação do Sujeito Universitário (desenvolvimento da autonomia e diversificação da linguagem);
- Constituição do Objeto da Engenharia de Energia (a energia: o que é e qual a sua importância);
- Constituição do Objeto da Engenharia (a tecnologia e os projetos na engenharia);
- Inserção da Engenharia na Sociedade (responsabilidade social e ambiental da engenharia);
- Consolidação da Formação do Engenheiro (a profissão do engenheiro).

As práticas educativas adotadas nos *TAI* e nas demais disciplinas são centradas na elaboração de projetos, devidamente adequados aos respectivos *Ciclos de Amadurecimento da Formação do Aluno*, onde se inserem. Os temas serão voltados para a área de energia, devendo envolver conteúdos das disciplinas do curso desenvolvidas até aquele Ciclo, com ênfase àquelas que estiverem sendo ministradas naquele período (no caso dos autores deste trabalho: Álgebra Linear, Cálculo II, Ciência e Tecnologia dos Materiais, Filosofia II, Física II, Fundamentos de Bioquímica, Técnicas de Programação).

Os alunos dos TAI de cada período são subdivididos em grupos com no máximo cinco componentes e os temas a serem abordados são de livre escolha dos alunos, porém devem abranger as disciplinas do período que está sendo lecionado.

Ao fim, os projetos do TAI não devem apresentar uma subdivisão das disciplinas abordadas, pois isso aparece espontaneamente durante a execução do projeto, o TAI age como integrador das disciplinas e mostra ao aluno a função prática dos conteúdos abordados.

3. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

O primeiro passo antes de iniciar o projeto foi definir o tema, “*Biomassa – Álcool de Celulose*”, e as diretrizes a serem seguidas na sua execução.

3.1. Justificativa

A crescente demanda por energia no país faz com que alertemos e nos conscientizemos que é preciso buscar outras fontes de energia, além das hidrelétricas e do petróleo. Por esses motivos propusemos neste projeto, o qual tem como meta gerar energia a partir de uma fonte limpa e renovável, a obtenção de álcool a partir da celulose, uma vez que este insumo pode ser obtido de várias matérias-primas como: o milho, a madeira e o bagaço de cana, esta, fartamente disponível no Brasil. Essa tecnologia já vem sendo desenvolvida no País em algumas instituições de pesquisas e estima-se que em 2009 já se poderá começar a produção industrial de álcool de celulose em larga escala. Estima-se também que a produção de etanol poderá até dobrar em uma mesma área de plantio, e que essa produção irá substituir cerca de 10% da gasolina de todo o mundo. Vendo que se tratava de um futuro promissor, iniciamos a elaboração de um pequeno projeto para lidar com essa extração, aprendermos como funcionam o processo global e cada etapa desta produção.

3.2. Objetivos

- **Objetivo Geral:** Conhecer o processo de obtenção de álcool a partir da celulose.
- **Objetivos Específicos:**
 - Conhecer a viabilidade do processo,
 - Detalhar as etapas do processo,
 - Observar vantagens e desvantagens do processo,
 - Realizar um quadro comparativo entre o álcool de cana-de-açúcar e o álcool de celulose,
 - Avaliar possíveis otimizações do processo.

3.3. Metodologia de Trabalho em Equipe

Projetos em equipe requerem divisão de tarefas e busca para que todos contribuam para realização eficaz do mesmo. Embora essa divisão deva levar em conta as características pessoais de cada componente equipe, no caso particular do TAI, cujo maior objetivo é o aprendizado, é fundamental que se proponham estratégias que permitam socializar as

oportunidades. Assim, para a realização da pesquisa científica e a obtenção de conhecimento dos assuntos referentes ao projeto grupo idealizou o “*Método Cíclico de Pesquisa*”, Figura 1.

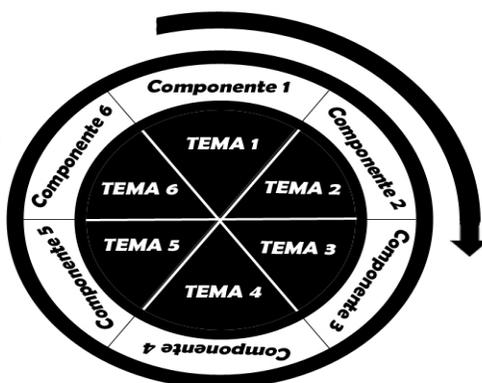


Figura 1 – Método Cíclico de Pesquisa

Este método consiste na divisão da pesquisa em “*n*” temas a serem pesquisados individualmente, onde “*n*” é o número de componentes da equipe. Na programação da execução do projeto, com prazo de conclusão estabelecido em um cronograma de atividades, enfatiza-se a fase de pesquisa, com destaque no cronograma.

Em cada semana um integrante do grupo fica responsável por um tema. Como objetivo do método é o aprendizado de todos e conscientização de que cada componente é responsável por todo o projeto, ao final de cada semana realiza-se uma exposição sobre os conhecimentos adquiridos nas pesquisas e a discussão das dificuldades encontradas. Na semana subsequente, o círculo “gira” e um novo responsável por cada tema, irá buscar soluções para problemas e dúvidas relevantes encontrados até então e aprofundar a pesquisa sobre o tema, para trazer, na próxima discussão, novos conhecimentos e novas questões para grupo.

3.4. Atividades

As atividades programadas pelo grupo para a elaboração do projeto foram:

- **Atividades Preliminares:**
 - Pesquisas sobre o processo global,
 - Criação de fichas: para registro dos resultados da pesquisa.
- **Pesquisa sobre cada etapa do processo:**
 - Entendimento de cada etapa da produção do álcool de celulose e suas características.
- **Planejamento**
 - Proposição das etapas posteriores,
 - Análise da viabilidade das etapas,
 - Análise dos materiais a serem utilizados (relação custo-benefício).
- **Execução**
 - Obtenção da matéria-prima,
 - Execução dos experimentos.
- **Otimização**

- Análise do trabalho realizado (pré-avaliação dos resultados e dos erros cometidos),
- Ajustes e correções.
- **Conclusão**
 - Elaboração de relatório;
 - Apresentação e entrega do trabalho.

3.5. Cronograma

O cronograma de atividades proposto para o projeto está apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 – Cronograma de Trabalho para Março à Junho de 2008

Cronograma																	
Obtenção de álcool a partir de celulose																	
Atividades	semanas	Março				Abril				Maió				Junho			
		1º	2º	3º	4º	1º	2º	3º	4º	1º	2º	3º	4º	1º	2º	3º	4º
<i>Atividades Preliminares</i>																	
<i>Pesquisa sobre cada etapa do processo</i>																	
<i>Planejamento</i>																	
<i>Execução</i>																	
<i>Otimização</i>																	
<i>Conclusão</i>																	

4. IMPORTÂNCIA DO ÁLCOOL NA ATUALIDADE

Ao analisar a matriz energética brasileira nos últimos anos é notório o aumento e a evolução da participação do etanol como fonte energética. De 2006 a 2007 a diferença entre o consumo de gasolina e álcool diminuiu de 432 milhões de litros para 99 milhões de litros. Além disso, em abril de 2008 o consumo de álcool no Brasil superou pela primeira vez o consumo de gasolina. Aliado ao fato do preço estar se tornando cada vez mais competitivo, trata-se de combustível proveniente de uma fonte renovável. Portanto, os investimentos em P&D nesta área tornam-se extremamente estratégicos.

4.1. Aumento das demandas mundiais de energia

A demanda mundial de energia primária hoje é de 40.090 GW. Mantidas as tendências atuais, pode-se projetar para o ano de 2050 o aumento desta demanda para 100.650 GW, quando os custos da eletricidade deverão quadruplicar. A exploração do grande potencial representado pela busca de eficiência energética poderá permitir uma economia de 36.860 GW até 2050 e uma redução da demanda de energia primária para 37.790 GW.³

4.2. Esgotamento das fontes clássicas

Devido à perspectiva de esgotamento no século XXI de importantes fontes de energia de origem fóssil, como o petróleo e o gás natural, a humanidade se vê frente à necessidade de alterar sua matriz energética, na busca de um modelo de crescimento sustentável. Somado a isso, apresentam-se também a grave questão ambiental na atualidade - a poluição e seus efeitos nocivos, os riscos inerentes à utilização da energia nuclear, as desigualdades sociais e o crescimento da população mundial. Este cenário impõe-nos a necessidade da busca de

³ Agência Internacional de Energia. Calculado com base na metodologia de simulação MESAP/PlaNet

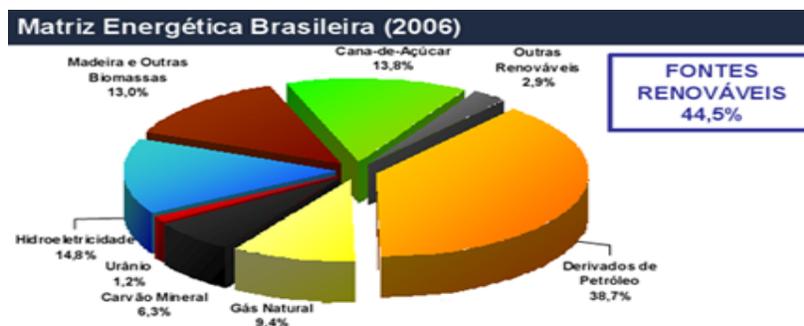
conhecimento e desenvolvimento de fontes energéticas renováveis, que possam representar uma perspectiva melhor e mais adequada para os padrões atuais. Não há dúvida de que a nação que “estiver na frente” neste caminho, certamente será beneficiada.

4.3. As possíveis alternativas em curto prazo

- Diminuição da quantidade de energia necessária para produzir uma unidade de serviço de energia, através do desenvolvimento e uso de sistemas, tecnologias de uso final e suprimentos energéticos mais eficientes;
- Mudança dos combustíveis fósseis para os combustíveis não-fósseis e dos hidrocarbonetos de moléculas maiores para os hidrocarbonetos de moléculas menores;
- Substituição do uso dos serviços de energia elétrica como aquecimento e secagem industrial, por alternativas renováveis, como a energia solar;
- Aumento da participação de fontes primárias renováveis, como a eólica e a biomassa, e o aproveitamento de resíduos urbanos para geração elétrica.

4.4. Matriz Energética Brasileira

Da análise da matriz energética brasileira (Figura 2), pode se concluir a grande importância que a cana-de-açúcar já representa para o País. Portanto, a busca por novas formas de aproveitamento e de uso dos seus rejeitos, além do processo de co-geração, pode representar uma grande oportunidade de aumentar essa participação na matriz energética, devido à ampliação da gama de utilização destes rejeitos.



Fonte: MME, BEN 2006.

Figura 2 – Matriz Energética Brasileira

5. RESÍDUOS DO ÁLCOOL COMO ALTERNATIVA ENERGÉTICA

Co-geração é, até então, a palavra-chave que se enquadra neste propósito: utilização do bagaço da cana-de-açúcar em caldeiras, gerando energia térmica, que é utilizada para movimentar uma turbina, gerando energia mecânica e, no gerador, a energia elétrica. Porém, tanto a palha, quanto o bagaço da cana, por representarem uma fonte de material lignocelulósico e hidrolisáveis podem também ser utilizados na produção do álcool de celulose. O Quadro 2 apresenta uma projeção do aumento da produção da cana-de-açúcar até o ano de 2030.

Quadro 2 – Projeção da produção de cana-de-açúcar e derivados no Brasil

	2005	2010	2020	2030
Etanol (10 ⁶ m ³)				
Produção	16,0	24,0	48,0	66,6
Exportação	2,5	4,3	14,2	11,5
Consumo em transportes	13,3	18,6	32,4	53,3
Energia primária (10 ⁶ t)				
Produção de caldo de cana ¹	97,9	150,5	291,5	345,3
Produção de melão ¹	12,5	19,2	38,9	53,1
Produção de biomassa ²	106,5	136,3	245,0	367,4

Fonte: MME, Matriz Energética Nacional 2030.

5.1. Características dos resíduos da cana-de-açúcar

A Tabela 1 apresenta os percentuais dos principais componentes do bagaço e da palha de cana úmidos.

Tabela 1 – Composições dos Resíduos de Cana Úmidos

COMPONENTE	PERCENTUAL	
	Bagaço	Palha
CELULOSE	24 %	45,1 %
HEMICELULOSE	13 %	25,6 %
LIGNINA	11%	12,7 %
CINZAS	2 %	8,0 %
ÁGUA	50 %	9,7 %
OUTRAS MATÉRIAS ORGÂNICAS	-	4,3 %

6. ÁLCOOL DE CELULOSE

Várias são fontes de celulose fartamente disponíveis, que poderiam ser utilizadas como matéria prima para a produção de álcool, como são os casos de: forragem de milho, palha de trigo, polpa de madeira, papel e bagaço de cana. Porém, a conversão economicamente viável da biomassa em álcool de celulose continua sendo um sonho ainda não realizado, embora um grande número de pesquisas nas áreas de otimização e de novos processos esteja sendo realizado. O grande empecilho atual é o custo da produção do álcool a partir da biomassa, que gira hoje em torno de R\$ 2,60 por litro. O objetivo é, portanto, reduzir os custos a um nível competitivo com a gasolina, atualmente de cerca de R\$ 0,65 por litro.

6.1. Matéria-Prima

A **celulose** é um polímero de "cadeia longa" composta de um só monômero carboidratado, classificado como polissacarídeo linear, de alto peso molecular, constituído pela junção de 300 e 15.000 unidades de glicose. É o componente estrutural primário das plantas e não é digerível pelo homem. Alguns animais, particularmente os ruminantes, podem digerir celulose com a ajuda de microrganismos simbióticos. Ela está naturalmente na maioria das fibras puras de algodão, sendo encontrado em toda planta com a lignina e a hemicelulose.

A celulose é a substância orgânica mais abundante na natureza e o componente mais comum das paredes celulares das plantas. As propriedades mais importantes da celulose estão relacionadas com a resistência da molécula à hidrólise e sua capacidade de absorção de água. A estrutura da celulose se forma pela união de moléculas de β -D-glicose através de ligações β -1,4-glicosídicas, o que a faz ser insolúvel em água.

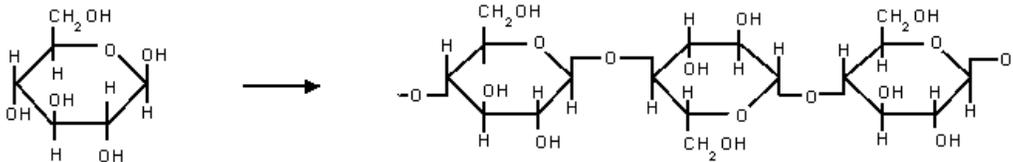


Figura 3 – Estrutura Molecular da Celulose

6.2. Processos e Métodos de Produção do Etanol da Celulose

Há dois principais processos para produzi-lo. Em um deles a celulose é submetida ao processo de hidrólise enzimática, utilizando uma enzima denominada celulase. E o outro é a hidrólise ácida, utilizando ácido diluído ou concentrado.

6.2.1. Celulase

Celulase refere-se a uma enzima, produzida essencialmente por fungos, bactérias e alguns protozoários. Enzimas são proteínas que por classificação convertem substância, chamadas de substrato, noutra chamado produto, e são extremamente específicas para a reação que catalisam. Sendo assim a celulase é a enzima catalisadora no processo de hidrólise enzimática. As enzimas conhecidas como celulases hidrolisam a ligação glicosídica entre dois ou mais carboidratos ou entre um carboidrato e uma porção não carboidrato.

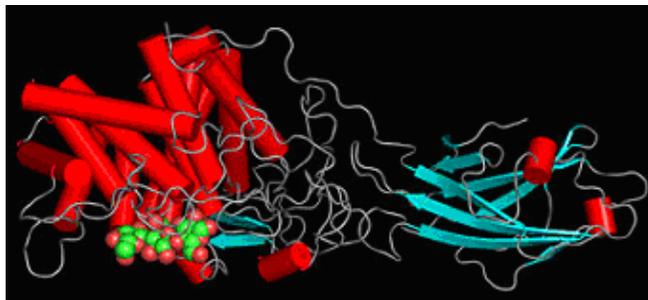


Figura 4 - Modelo de uma celulase

As celulases são algumas vezes descritas como um grupo complexo de enzimas com ação sinérgica. Este grupo reúne **Endoglicanases (EG)**, **Celulose β -1,4-celobiosidase (CBH)**, **β -glicosidase**, **β -glicosidase**, **β -glicosidase**, **β -1,3(4)-endo-glicanase**.

6.2.2. Atuação Sinérgica das Celulases

Todos os organismos que degradam a celulose cristalina secretam sistemas mais ou menos complexos de celulases. Tais sistemas são compostos de uma variedade de enzimas

com especificidade e modo de ação distinta, as quais agem em sinergia hidrolisando a celulose.

As enzimas endoglicanase e celobiohidrolase mostram diferentes tipos de sinergia na hidrólise da celulose cristalina. A ação sinérgica entre EG e CBH na degradação da celulose cristalina já foi demonstrada como mais eficiente. Estas enzimas apresentam requisitos diferentes, porém complementares para a redução do substrato.

6.3. Hidrólise

A hidrólise é um processo que busca extrair do material celulósico a glicose, açúcar formado por uma cadeia de seis carbonos. Como todos os vegetais contêm celulose, quem dominar o processo poderá, no futuro, produzir etanol de diversas matérias-primas. No caso brasileiro as pesquisas são direcionadas para o aproveitamento de rejeitos agrícolas (palha e pontas da cana) e industriais (bagaço) da cana.

6.3.1. Hidrolise Enzimática

Essa separação não é feita por uma única enzima, mas por um complexo enzimático que desune a hemicelulose e a lignina da fibra de celulose. Nesta última está o material nobre, a glicose, ou seja, o açúcar extra que os produtores de etanol querem extrair do bagaço de cana para poderem ampliar a produção de etanol sem aumentar a área de cultivo, como expõe o grupo de pesquisa “Inovação Unicamp”.

O bagaço da cana não deve ser usado da forma como ele vem da usina. Há a necessidade do bagaço ser tratado antes de se fazer a hidrólise, até para não aumentar a quantidade de enzimas usadas no complexo enzimático e, por consequência, o tempo da hidrólise, fatores que encarecem o processo.

O pré-tratamento do bagaço é feito pelo método de explosão a vapor ou tratamento ácido (obs: o tratamento por ácido já leva à hidrólise). Isso facilita o acesso da enzima à fibra de celulose. O complexo enzimático é então adicionado – em pressão normal e temperatura constante – ao bagaço pré-tratado para que se possa chegar ao xarope de glicose. Elas vão demorar mais de um dia — podendo chegar a dois — para fazer o seu principal trabalho: separar as diversas moléculas de glicose que formam a celulose. Essa glicose vai ser misturada então ao mosto ou caldo de cana e irá passar pelos processos convencionais de fabricação do etanol.

A quantidade de enzimas necessária para a hidrólise ainda é um ponto de interrogação para os pesquisadores. Em geral, quanto mais enzimas você coloca, maior a atividade, mais rápido o processo. Contudo, quanto mais enzimas, maior o custo. Às vezes, o processo pode demorar mais tempo e ter um custo menor.

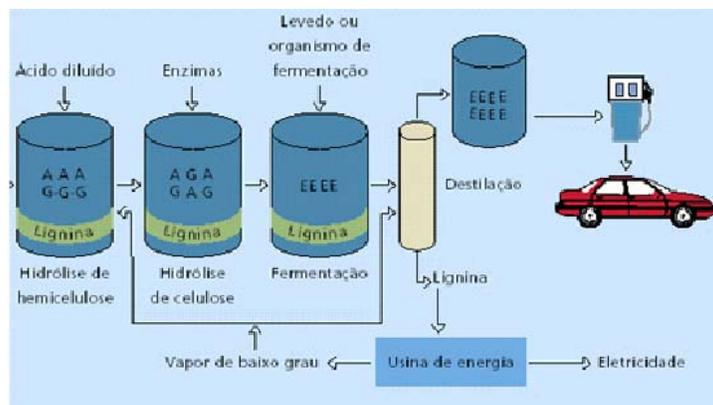


Figura 5 – Hidrólise Enzimática e Co-Geração

Ao fim do processo de hidrólise, a glicose obtida do bagaço da cana é fermentada com a *Saccharomyces cerevisiae* e destilada logo após.

6.3.2. Hidrólise Ácida

A hidrólise ácida é uma das rotas possíveis para a obtenção de etanol a partir da celulose. Um solvente dilui a lignina, estrutura da fibra do bagaço de cana que protege a celulose, para permitir a quebra das cadeias de carbono que a formam, por meio da adição de ácido sulfúrico e a conseqüente geração de hexoses — açúcares formados por cadeias de seis carbonos, que serão finalmente utilizados para produção de álcool.

É um processo rápido porque as reações ocorrem em menos de uma hora. Na hidrólise enzimática, a outra rota tecnológica em investigação, as reações demoram mais de 72 horas.

6.4. Fermentação

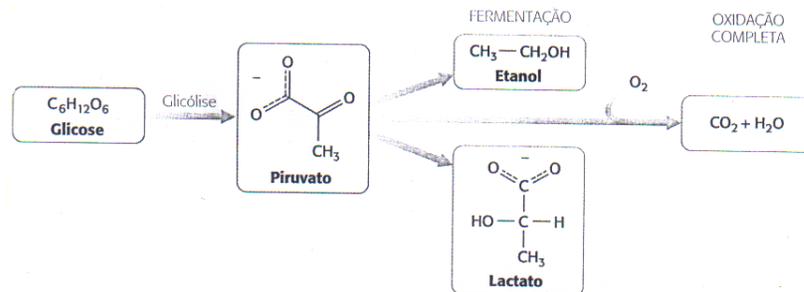
A fermentação é um processo de obtenção de energia por alguns microorganismos e células de animais superiores que se encontram em condições intensas de trabalho. Constitui-se na retirada de energia da quebra de monossacarídeo ou açúcares simples em unidades ainda menores.

Vale dizer que a fermentação é um fenômeno bioquímico que tem um rendimento energético muito inferior ao que se verifica na respiração aeróbica (obs: respiração só produz CO₂ e água), o que nos dá uma vantagem do ponto de vista da sociedade e da indústria de energia — já que a retirada de energia do produto da fermentação (etanol) por motores de combustão interna só é possível pelo fato de que na fermentação a bactéria só retira uma parte da energia disponível na molécula do açúcar — do ponto de vista da eficiência da célula não há necessidade da presença de oxigênio.

6.4.1. Etapas da fermentação alcoólica

- Glicólise

Em todos os seres vivos a retirada de energia de carboidratos, independente do tipo de respiração, aeróbica ou anaeróbica, passa pela via glicolítica que é a quebra do monossacarídeo, mais comumente a glicose em ácido pirúvico ou *piruvato*.



Fonte: Weil, J.H, 1983

Figura 6 – Visão Geral do Processo

• Formação do etanol

O etanol é formado a partir do *piruvato* - em leveduras. A primeira etapa é a *decarboxilação* do *piruvato*. Esta reação é catalisada pela *piruvato decarboxilase*. A segunda etapa é a redução do aldeído acético pelo NADH, numa reação catalisada pela *álcool desidrogenase*. Este processo regenera o NAD⁺.

O centro ativo da *álcool desidrogenase* contém um íon de zinco que está coordenado aos átomos de enxofre de duas *cisteínas* e um nitrogênio da *histidina*. O íon de zinco polariza a *carbonila* do substrato favorecendo a transferência de um hidreto do NADH.

O balanço da fermentação alcoólica é:



Os compostos NAD⁺ e NADH não aparecem na equação — embora sejam cruciais para a reação global— o motivo é que o NADH gerado na oxidação do *gliceraldeído 3-fosfato* é consumido na redução do aldeído acético a etanol.

7. ANÁLISES E RESULTADOS

A primeira impossibilidade da concretização do objetivo inicial era a grande dificuldade de se conseguir as enzimas para a hidrólise enzimática, já que essa tecnologia ainda está em desenvolvimento, mesmo em âmbito mundial.

A alternativa seria o desenvolvimento apenas teórico da hidrólise enzimática e utilizar a hidrólise ácida, mesmo sendo um processo que não apresenta o mesmo rendimento e tem maiores dificuldades operacionais. Dada às restrições de equipamento dos laboratórios, por exemplo, a falta da autoclave revestida de chumbo para pré-tratamento do bagaço da cana resolveu-se então utilizar como matéria prima o algodão, pois esse é composto por 94,0% de celulose. Assim, dispensaríamos o pré-tratamento do bagaço de cana. A partir do conhecimento básico do processo a etapa posterior seria a realização das experiências laboratoriais:

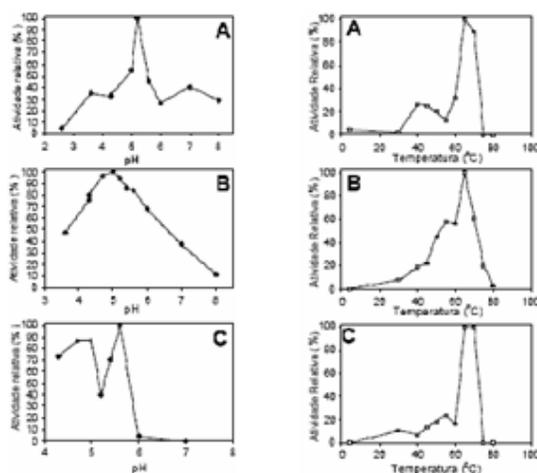
- Foi utilizada a proporção de 5 litros de ácido sulfúrico concentrado a 77% (p/V) para cada 1Kg de algodão a temperatura ambiente deixando reagir por duas horas.
- A solução resultante foi aquecida a 80°C durante 1 hora.
- A solução então foi neutralizada com carbonato de cálcio.
- A partir daí realizou a filtração.

- A próxima etapa seria a fermentação do filtrado e posteriormente seria feita a destilação.

O filtrado foi submetido a uma análise química com a substância benedicta, porém não houve a detecção de açúcares redutores. Provavelmente o ácido desidratou o algodão ao invés de hidrolisar, carbonizando a substância. A hipótese para o ocorrido é que devido à ausência de outras substâncias, como a lignina, o ácido sulfúrico não teve obstáculos para reagir com a celulose, provocando uma reação muito rápida e degradando as glicoses possivelmente liberadas. A hidrólise com ácido sulfúrico diluído a 2% (p/V) também foi realizada, mas ocorreram os mesmos problemas.

O processo convencional de obtenção de álcool a partir do caldo de cana também foi realizado. Foram utilizadas as proporções de 1 litro de mosto para 0,05 kg da levedura *Sacharomyces serivisae* deixando reagir por 48 horas. Após esse tempo foi realizada a destilação, obtendo assim o etanol com teor alcoólico de 93%. O teor alcoólico foi determinado pela densidade do álcool obtido, que leva em consideração a massa de água contida na massa total da mistura homogênea entre água e etanol. Como método para obtenção de álcool anidro a desidratação foi feita com óxido de cálcio reagindo com a solução e resultando como produto final o hidróxido de sódio e álcool.

Para análises finais dos processos de produção do álcool de celulose os experimentos bioquímicos podem ser simulados em softwares, como exemplo o Matlab, que através de pontos plotados em gráficos, realização de cálculos por interpolação polinomial, para gerar uma equação aproximada. Ferramentas de modelagem de funções por equações diferenciais também foi aplicada utilizando os experimentos bioquímicos como variáveis.



Fonte: WULFF, N.A. 2002

Figura 7 – Atividade Catalítica de Três Grupos Enzimáticos em função da Variação de pH e de Temperatura

8. CONCLUSÕES

O mundo contemporâneo, cada vez mais, se torna dependente da energia. Surgem daí as crescentes necessidades de diversificação e aumento das fontes energéticas, com a preocupação em preservar o meio ambiente para a atual e as futuras gerações.

Neste enfoque o álcool de celulose representa uma promissora alternativa devido à possibilidade de aproveitamento de resíduos agrícolas e provenientes de outras fontes, como o capim e a madeira.

Desenvolver este tema no *Trabalho Acadêmico Integrador* promovido pelo curso de Engenharia de Energia da PUC Minas foi uma forma de conciliar consciência sócio-ambiental ao aprendizado dos conteúdos teóricos e práticos desenvolvidos durante cada período do curso.

Ao realizar os processos práticos nos laboratórios percebemos que as teorias nem sempre correspondem a uma cópia fiel da realidade. Buscamos a compreensão das necessidades do ponto de vista filosófico, relacionados aos processos químicos, bioquímicos e físicos da produção de etanol, para podermos ter conhecimento de uma rota inovadora e “ter a liberdade de dar um passo a frente no sentido de inovação da humanidade” como bem expõe CHAUI.

Aprendemos a lidar com as análises de resultados e a enfrentar situações inusitadas, como o surgimento de substâncias indesejáveis no processo. Aprendemos a entender a complexidade da obtenção de medidas laboratoriais precisas e da análise química das substâncias.

O desenvolvimento de métodos de pesquisas e, principalmente, a busca autônoma por conhecimento foram fatores decisivos para a nossa formação de Engenheiros de Energia.

Em face do exposto, tomamos a liberdade de concluir que a integração da equipe de trabalho e a autonomia foram essenciais para o aprendizado e que uma disciplina como o TAI seria aconselhável para todas as engenharias. Por fim, com o desenvolvimento deste trabalho, acreditamos ter concluído de forma muito positiva o primeiro ciclo da Engenharia de Energia que é a “Formação do Sujeito Universitário”.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL. S.T.I. Tecnologia da Produção de Etanol a partir de Materiais Celulósicos. **Estado-da-arte da produção de etanol a partir da madeira**. Brasília, v. 1, p.190, 1981.

BRASIL, M.M.E. **Matriz Energética Nacional 2030**. Brasília, MME : EPE, p.254, 2007.

CAVALCANTI, L.S. **Papel da Celulase XF-0818 na Interação *Xylella fastidiosa* X Citros**. 2005. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agronomia, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

CHAUI, Marilene. **Convite à filosofia**. São Paulo: ed. Ática, 2000.

ERTAS, A.; MAXWELL, T.; RAINEY, V. P.; TANIK, M. M. *Transformation of Higher Education: the Transdisciplinary Approach in Engineering*. IEEE Transactions on Education, v 46, n 2, p 289-295, May 2003.

ESTEVES, Otávio de Avelar & SCHUTTENBERG, Rose Mary Cosso. *Desafios para a Formulação de Projetos Pedagógicos para as Engenharias*. In: World Congress on Engineering and Technology Education, 2004, Santos. WCETE'2004 – PROCEEDINGS CHARGES. , 2004.

ESTEVEES, Otávio de Avelar e DE PAULA, Maria Inês Lage. *Trabalhos Acadêmicos Integradores: Uma proposta de Transdisciplinaridade para o Curso de Engenharia de Energia da PUC Minas* In: XXXIV COBENGE - Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia, 2006, Passo Fundo. Anais.

FILHO P.S.C.F; MILANEZ A.Y.; ROSA S.E.S. *Perspectivas para o Etanol Brasileiro*. Rio de Janeiro, n. 27, p. 21-38, mar. 2008

MENEGUELO A.P.; ROQUEIRO N.; MACHADO R.A.F. *Modelagem de Coluna de Destilação para Implementação de Observador de Estados*. In: 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, 2005,10, Salvador. **Anais**. Florianópolis: UFSC, 2005. p. 7.

SALES, F.J.; ALVARENGA A.A.; OLIVEIRA J.A.; NOGUEIRA F.D.; SILVA F.G.; VEIGA A.D. *Efeito da Celulase sobre a decomposição do Pergaminho e sua Influência na velocidade e Porcentagem de Germinação de Sementes de Cafeeiro*. Lavras, v. 29, n. 6, p. 1146-1152, 2005

STEWART, J. **Cálculo**. São Paulo: ed. Thompson Learning, 2007.

WEIL, J.H. **Bioquímica Geral**. 2º edição. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1983.

WULFF, N.A. **Caracterização Enzimática das Celulases XF-810, XF-818 e XF-2708 de *Xylella fastidiosa* e Purificação da Proteína XF-818, Expressas em *Escherichia coli***. 2002. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agronomia, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

INTERDISCIPLINARITY IN EDUCATION IN ENGINEER OF ENERGY: BIOMASS - ALCOHOL OF CELLULOSE

Abstract: *The Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais - PUC Minas, through its Polytechnic Institute - IPUC, took the challenge of creating the Energy Engineering's course, with an innovative design. Its educational project, which aims to break existing paradigms, intends to incorporate significant advances in the education of engineering. A key aspect of the project of the course is the introduction of the "Integrators Academic Work - TAI", in which students promoted the development of a project. Said project intends to articulate the meaning and the context of content studied in each related discipline. During the first two periods of the course the TAIs comply with the role of promoting the formation of the subject university. This paper shows a work developed for students of the second period of the course, whose theme was "BIOMASS: Alcohol from Pulp." This document contains the work plan for implementing the project, a literature review on the subject, analysis of results obtained in the laboratory and considerations on the processes and methods for the production of alcohol from cellulose.*

Keywords: *Interdisciplinarity, The engineer education, Alcohol from cellulose, Enzymatic hydrolysis, Celulase*