



# ENEPEX

ENCONTRO DE ENSINO,  
PESQUISA E EXTENSÃO

8° ENEPE UFGD • 5° EPEX UEMS

## ANÁLISE PRELIMINAR DO USO DO BIOBUTANOL COMO COMBUSTÍVEL VEICULAR

**Jussilaine Fernandes Lemes<sup>1</sup>; Antonio Carlos Caetano de Souza<sup>2</sup>;**

UFGD – FAEN, C. Postal 533, 79804-970 Dourados MS, E-mail:  
jussilaine\_fernandes@hotmail.com

<sup>1</sup>Bolsista PIVIC;<sup>2</sup>Orientador.

### RESUMO

O Butanol é um álcool de origem não-renovável que possui aplicações diversas na indústria química em geral. Portanto, diversas pesquisas têm sido desenvolvidas no Brasil e no mundo visando à produção de biobutanol, isto é, o butanol de origem renovável. Diversas matérias-primas podem ser utilizadas e a principal forma de produção do biobutanol é a via fermentativa. Além de sua utilização como alternativa ao butanol em indústrias químicas diversas, várias pesquisas têm sido realizadas visando a sua utilização em motores ciclo Otto, misturado ou não ao etanol e a gasolina. Pode-se utilizar a mesma infraestrutura de transporte e armazenamento da gasolina, ao contrário do etanol, pois o butanol não é fortemente higroscópico e não é corrosivo como o mesmo, cuja infraestrutura de produção, transporte e comercialização está consolidado no país. Este trabalho visa apresentar as características do butanol (renovável ou não), suas formas de produção, mercado e tendências como combustível para veículos leves. **Palavras-chave:** Biobutanol, Combustível Veicular, Biomassa.

### 1. INTRODUÇÃO

Há bastante tempo, utiliza-se o butanol em indústrias químicas diversas como matéria-prima para produtos químicos diversos. Porém, o volume é pequeno se comparado aos insumos químicos mais conhecidos. Com as pesquisas sobre a produção de “biobutanol”, um mercado pode-se abrir, pois este insumo químico pode ser utilizado pelas indústrias químicas que tradicionalmente utilizam o butanol não-renovável, conferindo um caráter renovável aos produtos finais.

As pesquisas acerca da produção, utilização e difusão de biocombustíveis têm aumentado consideravelmente não apenas no Brasil, mas também em outros países. Ao contrário do etanol, as pesquisas em cima do butanol como combustível veicular ainda se encontram em estágio embrionário.

Diversas matérias-primas podem ser utilizadas na obtenção do biobutanol, que pode ser utilizado misturado à gasolina ou mesmo puro em veículos leves (motores ciclo Otto). Há alguns estudos ainda em execução como o impacto econômico e ambiental causado pelo uso do butanol renovável em veículos.

## 2. O BUTANOL

Butanol é um álcool, por isso também chamado popularmente de álcool butílico, com quatro átomos de carbono em sua cadeia molecular, representado por  $C_4H_{10}O$ . Butanol é um líquido volátil e extremamente inflamável com a presença de alguma faísca (A substância deve ser identificada como observada na Fig. 1).



Figura 1 - Categoria do butanol como líquido inflamável.

### 2.1. Isômeros do Butanol

O butanol é subdividido em quatro classes de isômeros: N-butanol, Isso-butanol, Sec-butanol e Tert-butanol. (MACHADO, 2010)

Fig. 2 apresenta os isômeros do butanol em suas fórmulas químicas moleculares estruturais.

### 2.2. Propriedades físico-químicas

Algumas propriedades estão relacionadas na Tabela 1. (MACHADO, 2010)

### 2.3. Butanol como combustível veicular

Empresas de alguns países têm desenvolvido pesquisas relativas à aplicação do butanol como combustível. Efetivamente, comparando o valor energético do butanol com o do etanol e com o da gasolina, pode-se inferir que há possibilidade desse álcool ser uma

alternativa à gasolina e ao etanol. Há propostas relativas ao uso do butanol como aditivo da gasolina. Com base nessa argumentação a DuPont e instituições japonesas e nórdicas (Suécia e Finlândia) têm investido de forma bastante significativa em processos de geração de butanol via etanol. Evidentemente, a síntese em três etapas foi desativada em paralelo os aprimoramentos na rota fermentativa (CGEE, 2010).

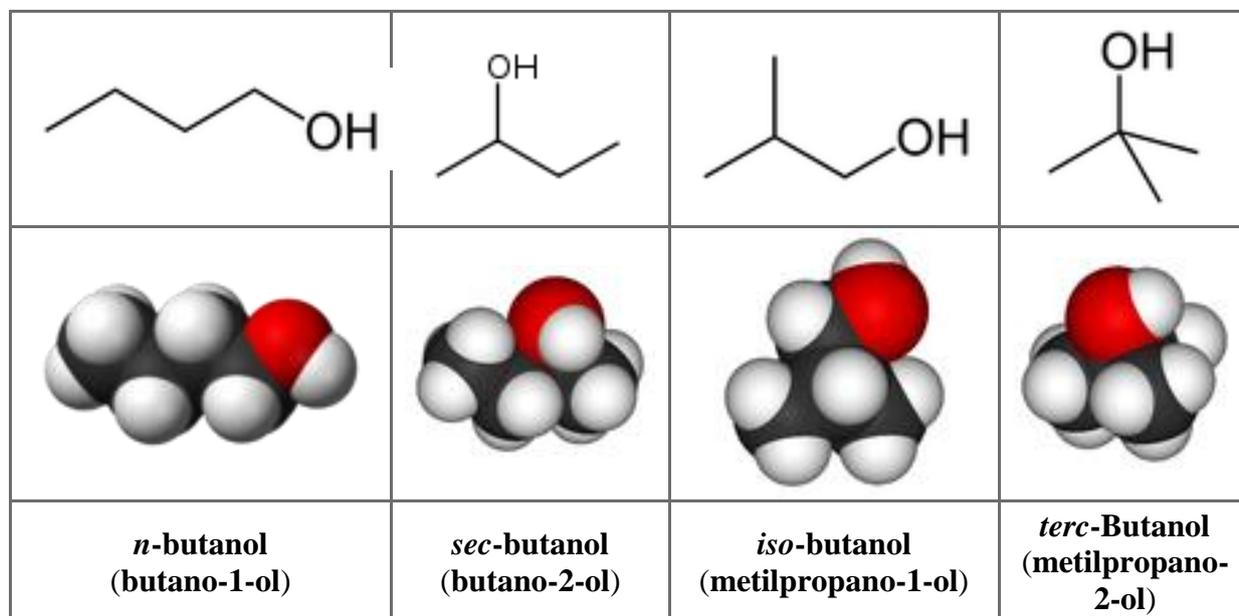


Figura 2 – Fórmulas químicas moleculares estruturais dos isômeros do butanol

Tabela 1 – Dados sobre os isômeros do butanol

Propriedade	<b>n-butanol</b>	<b>isobutanol</b>	<b>sec-butanol</b>	<b>tert-butanol</b>
Densidade à 20°C (g/cm <sup>3</sup> )	0,810	0,802	0,806	0,781
Ponto de ebulição	118	108	99	82
Solubilidade em água (g/100 ml)	7,7	8,0	12,5	Miscível
Ponto de inflamação	35	28	24	11
Índice de octanagem MON <sup>1</sup>	78	94	-	89

O butanol tem uma densidade energética mais próxima (91.2%) a da gasolina do que qualquer outro combustível alternativo usado hoje, como o etanol (61.2%). Em relação a energia propriamente dita, a gasolina tem uma densidade energética de 32 MJ/l (megajoules por litro), enquanto o butanol tem 29,2 MJ/l e o etanol apenas 19,6 MJ/l.

Este combustível tem um calor de vaporização muito menor que o do etanol, facilitando o arranque a frio, isso significa dizer que a partida do carro não se vê prejudicada no frio com o uso do biobutanol. Devido as suas características bem mais próximas à

<sup>1</sup> Método **MON (Motor Octane Number)** ou método Motor - **ASTM D2700** - avalia a resistência de um combustível à detonação, em uma situação em que um motor está em plena carga e em alta rotação.

gasolina, biobutanol pode ser usado sem recorrer às linhas de aço inoxidável e injetores de maior fluxo de combustível, isto é, pode ser bombeado, armazenado e transportado pelos mesmos equipamentos utilizados para manuseio da gasolina, barateando-o.

As vantagens do Butanol como combustível veicular são as seguintes (D'SILVA, 2012):

- Octanagem 25% maior que da gasolina;
- Não causa prejuízo ao motor, como corrosão;
- A porcentagem da mistura gasolina + butanol (10-100%) é viável, sem que seja necessária qualquer alteração no motor;
- Tem a queima mais limpa que a gasolina, reduzindo emissões de gases nocivos.

#### 2.4.Panorama Mundial

Fig. 3 representa as cotas do mercado atual para n-Butanol. Tabela 2 apresenta os maiores produtores mundiais de butanol (MACHADO, 2010):

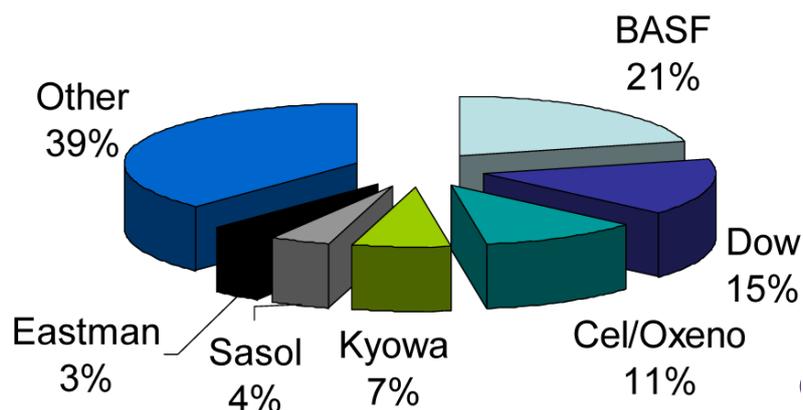


Figura 3 – Cota do mercado atual para n-butanol

#### 2.5.Onde se produz butanol no Brasil?

Os focos de produção e pesquisa sobre o butanol e suas novas vertentes químicas e tecnológicas assim como suas novas aplicações ainda são restritos e específicos mas a cada ano os incentivos e investimentos aumentam. A produção do butanol ou biobutanol é representada por empresas como (FREITAS, 2012):

ELEKEIROZ S.A. foi a pioneira na produção de diversos produtos químicos no país, como anidrido ftálico, bissulfeto de carbono, octanol e butanol a partir de álcool de cana, trimetilopropano, ácido etil hexanóico, entre outros.

A Hc Sucroquímica visa o pequeno consumidor, sendo a principal utilização do butanol a produção de acetato de butila para fabricação de tintas. Porém, qualquer que seja o mercado para rota do petro-butanol, o biobutanol pode substituí-lo.

**Tabela 2 – Maiores Produtores Mundiais de Butanol**

<b>Empresa</b>	<b>Localização da Planta</b>	<b>Capacidade Anual em Abril de 2010 (10<sup>3</sup> ton.)</b>	<b>Produtos e aplicações</b>
Dow Chemical	Taft, Louisiana, EUA	272	Propeno. Produção de acetatos, acrilatos e ésteres glicólicos Propeno. Produção de acrilato de n-butila
	Texas City, Texas, EUA	254	
Eastman Chemical	Longview, Texas, EUA	130	N-butiraldeído
BASF	Ludwigshafen, Alemanha	450	N-butiraldeído. Produção de acetatos, acrilatos e ésteres glicólicos, ou vendido como solvente
	Freeport, Texas, EUA	220	
	Nanjing, China ( <i>joint venture</i> com Sinopec Yangzi Petrochemicals)	185	N-butiraldeído. Produção de acrilato de n-butila ou vendido como solvente
	Kuantan, Malásia ( <i>joint-venture</i> com Petronas)	116	
OXEA	Bay City, Texas, EUA	200	N-butiraldeído. Produção de acetato de n-butila.
	Oberhausen, Alemanha	120	
Total		1.947	

A empresa produz os solventes verdes biobutanol e bioacetona através da fermentação ABE<sup>2</sup> do caldo de cana, com bactérias do gênero *Clostridia*.

A HC Sucroquímica tem capacidade para 7,3 mil t/ano de solventes e, em uma segunda fase, ampliará sua capacidade para 18,3 t/ano. O custo atual dos biossolventes é maior do que o da rota petroquímica o que leva a necessidade de aprimorar a tecnologia da fermentação ABE.

Na Tabela 3, está exposto a produção de butanol de cada empresa. O mercado nacional de butanol está em expansão conforme observado na Tabela 4 (FREITAS, 2012).

A Rhodia, junto com a Cobalt Technologies, produzirá butanol renovável na América Latina a partir do bagaço de cana-de-açúcar. A estratégia da Rhodia é substituir o butanol importado utilizado em suas fábricas no Brasil para produzir solventes, pelo produto renovável, chamado de "bio n-butanol" até 2015, quando a expectativa é de que a produção atinja 200 mil toneladas. A Cobalt desenvolveu uma rota bioquímica celulósica de produção do butanol renovável a partir de biomassa de bagaço de cana, cavacos de madeira e glicerina, que possui um custo 60% menor que o atual custo de produção do butanol feito de derivados de petróleo (GAZZONI, 2012).

A Butamax, joint venture formada por BP e DuPont, pretende dar início à produção de biobutanol e partir da cana-de-açúcar em escala comercial em Paulínia-SP Brasil a partir de 2013/14, mas diversas matérias-primas podem ser utilizadas seguindo a tecnologia que detêm (GOMES, 2012).

### **3. BIOBUTANOL**

#### **3.1.O que é biobutanol?**

O biobutanol é um biocombustível proveniente da biomassa como a cana-de-açúcar ou palha de cereais (trigo, cevada, milho), entre outras matérias-primas. O biobutanol como combustível, em relação ao etanol é menos corrosivo e menos propenso à contaminação da água, possui mais energia por litro e pode ser misturado à gasolina ou utilizado isoladamente em motores de combustão interna.

---

<sup>2</sup> Fermentação ABE gera produtos como Acetona, Butanol e Etanol. O nome se dá pelas iniciais dos três produtos. Vide item 3.3 deste trabalho.

<b>Empresa</b>	<b>Localização</b>	<b>Capacidade Instalada</b>	<b>Principais Matérias-primas</b>	<b>Aplicação</b>	<b>Processo</b>
HC Sucroquímica/ Usina Paraíso	Campos, RJ	7,3 mil t/ano	Cana-de-açúcar	Indústrias químicas, farmacêuticas, de tintas, têxteis, cera, tiner e outros solventes.	Via fermentação Aceto-butílica (fermentação ABE)
Elekeiroz S/A <sup>4</sup>	Camaçari, BA	150 mil t/ano	Gás natural, propeno grau químico	Consumo próprio, defensivos agrícolas, plastificantes, <u>solventes</u> , acrílico <sup>5</sup>	Hidroformilação do propeno - Processo OXO

<b>ANO</b>	<b>Produção (10<sup>3</sup> ton.)</b>	<b>Importação (10<sup>3</sup> ton.)</b>	<b>Exportação (10<sup>3</sup> ton.)</b>	<b>Consumo aparente (10<sup>3</sup> ton.)</b>
2000	22	8	4	26
2001	21	17	3	35
2002	22	24	5	42
2003	20	26	5	42
2004	24	32	5	51
2005	22	35	3	54
2006	26	32	3	52
2007	31	28	3	59
2008	30	32	3	59
2009	23	30	2	51

<sup>3</sup> No momento, o Brasil é importador de butanol devido aos custos mais baixos ofertados por empresas estrangeiras.

<sup>4</sup> Custo do butanol produzido pela Elekeiroz: R\$ 4000 / ton (dados de 2013).

<sup>5</sup> O butanol é matéria-prima do acrilato de butila, que posteriormente é convertido em acrílico. Em breve, a Elekeiroz ampliará sua planta de butanol para atender a demanda da futura planta da BASF, a ser instalada em Camaçari (BA).

### **3.2. Processo de obtenção industrial**

Bactérias do gênero *Clostridium* realizam a fermentação dos açúcares para biobutanol. No caso de matérias-primas residuais, com as palhas em geral, elas devem ser pré-tratadas e hidrolisadas. A hidrólise utiliza enzimas para separar a celulose e a hemicelulose, liberando os açúcares simples, de modo que a bactéria pode fermentá-los em três produtos: Acetona, Butanol e Etanol (ABE). Normalmente, os quatro passos preparatórios (pré-tratamento, hidrólise, fermentação e recuperação) são realizados separadamente. No caso da palha de trigo, ela deve ser pré-diluída com ácido sulfúrico, fermentada em um biorreator contendo três diferentes enzimas e uma cultura de *Clostridium beijerinckii*. Desta forma, as enzimas e as bactérias atuam simultaneamente, reduzindo o custo industrial.

Tão logo as enzimas hidrolisam a palha e liberam os açúcares, as bactérias iniciam a fermentação. Ao final, o etanol e a acetona são retirados, purificando o biobutanol. O rendimento industrial é de 379 litros de biobutanol por tonelada de palha. No Brasil, tanto poderemos produzir o butanol do caldo, bagaço ou palha de cana, quanto de palha de cereais ou forrageiras (GAZZONI, 2012).

No Brasil, durante o Proálcool, a produção industrial do butanol a partir do etanol era conduzida em um processo que envolvia três etapas, ou seja, três sistemas reacionais. A primeira reação era a de desidrogenação do etanol, que gerava hidrogênio e acetaldeído. Este último era separado e submetido a reação de condensação aldólica – uma reação química que envolve um íon enolato de um composto carbonílico com outra molécula de composto carbonílico, formando cronotaldeído (composto químico com a fórmula  $\text{CH}_3\text{CH}=\text{CHCHO}$ ).

Na etapa final, o hidrogênio gerado no início do processo era usado na hidrogenação do cronotaldeído, obtendo-se finalmente o butanol. O processo de produção pode ser observado na Fig. 4. Pode-se inferir que, este processo, devido as suas características intrínsecas, deve envolver custos elevados de produção. De fato, a síntese em três etapas foi desativada quando da queda dos subsídios da indústria alcoolquímica (CGEE, 2010).

### **3.3. Fermentação ABE**

O primeiro processo de fermentação ABE se deu no ano de 1914. Teve como matéria-prima o amido e foi utilizado o *Clostridium acetobutylicum*. Portanto este processo foi descontinuado com a popularização da produção de butanol proveniente do petróleo na década de 50. (MACHADO, 2010).

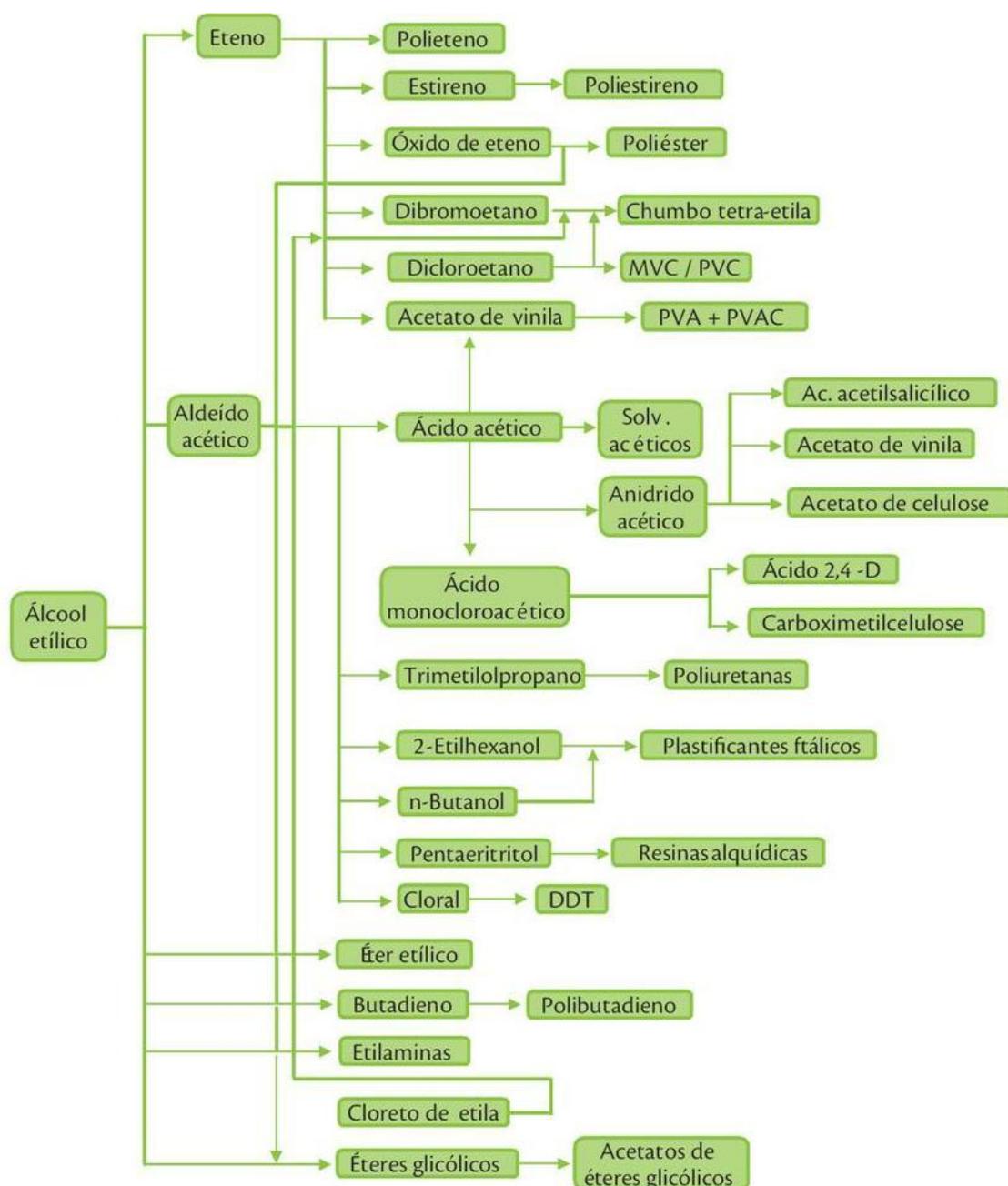


Figura 4 - Matriz da indústria alcoolquímica no período do Proálcool (CGEE, 2010).

### 3.4. Novos desenvolvimentos necessários à fermentação ABE

- Engenharia genética visando um aumento do rendimento e maior tolerância ao butanol.
- Uso de diferentes substratos, pois a *clostridia* secreta numerosas enzimas que facilitam a repartição de polímeros de carboidratos em monômero. Essa capacidade de utilizar vários açúcares é de particular relevância para o uso de subprodutos agrícolas baratos e resíduos como substratos de fermentação (fator importante que influencia o custo de produção de biobutanol);

- No processo descontínuo de biobutanol, a produtividade do reator é limitada a menos do que 0,50 g/l.h (MACHADO, 2010);

### **3.5. Biobutanol no exterior**

As matérias-primas lignocelulósicas, principalmente os resíduos da agroindústria, têm sido objeto de intensivas pesquisas em todo o mundo por se constituírem em fontes renováveis de energia disponíveis em grandes quantidades (CGEE, 2010).

Uma série de empresas produzem o biobutanol para diversos fins com a Cobalt Technologies, que usa a bactéria *Clostridium* para quebrar componentes da celulose e da hemicelulose. A ButyFuel produz o biobutanol a partir de esta mesma bactéria, porém com algumas modificações que foram patenteadas, esse tipo de produção pode chegar a produzir até 90% a mais do que a produção com a bactéria *Clostridium* sem modificações. A SyntecBiofuel estuda a produção de biobutanol a partir de processos termoquímicos a partir de diversos tipos de biomassa. A TetraVita Bioscience desenvolveu uma bactéria mutante chamada *Clostridium Beijerinckii* que faz uma fermentação diferente daquela feita pelo *Clostridium*. A Metabolic Explorer desenvolveu micro-organismos de alto desempenho que transformam derivado de biomassa em biobutanol por processo de fermentação (GAZZONI, 2012).

A empresa de biologia sintética Gevo possui tecnologia baseada em leveduras geneticamente modificadas para produzir o isobutanol. Os direitos sobre a técnica ainda são disputados entre a companhia e outra empresa, Butamax. A Gevo não pretende vender seu produto como combustível no momento, mas fornecê-lo como matéria-prima à indústria química. A empresa britânica Green Biologics está adaptando a biotecnologia para a produção de butanol que se vale de uma versão modificada da bactéria do gênero *Clostridium* para processar celulose.

Com a ajuda de uma bactéria, pesquisadores da Universidade de Tulane (EUA) conseguiram transformar papel em combustível. Os seres microscópicos, que realizam fermentação natural, conseguem fazer com que a celulose seja convertida em butanol. A matéria-prima, celulose, é abundante na natureza e pode ser obtida através da reciclagem de papel descartado. Pensando nisso, os pesquisadores da universidade testaram em jornais velhos uma bactéria, encontrada em dejetos de animais, conhecida como TU-103 (NATURA EKOS, 2013).

Fig. 5 contextualiza, graficamente, o conceito de biorrefinaria lignocelulósica e suas aplicações em torno da agroindústria, tendo suas biomassas residuais como centro dos processos de produção de uma grande variedade de moléculas (CGEE, 2010).

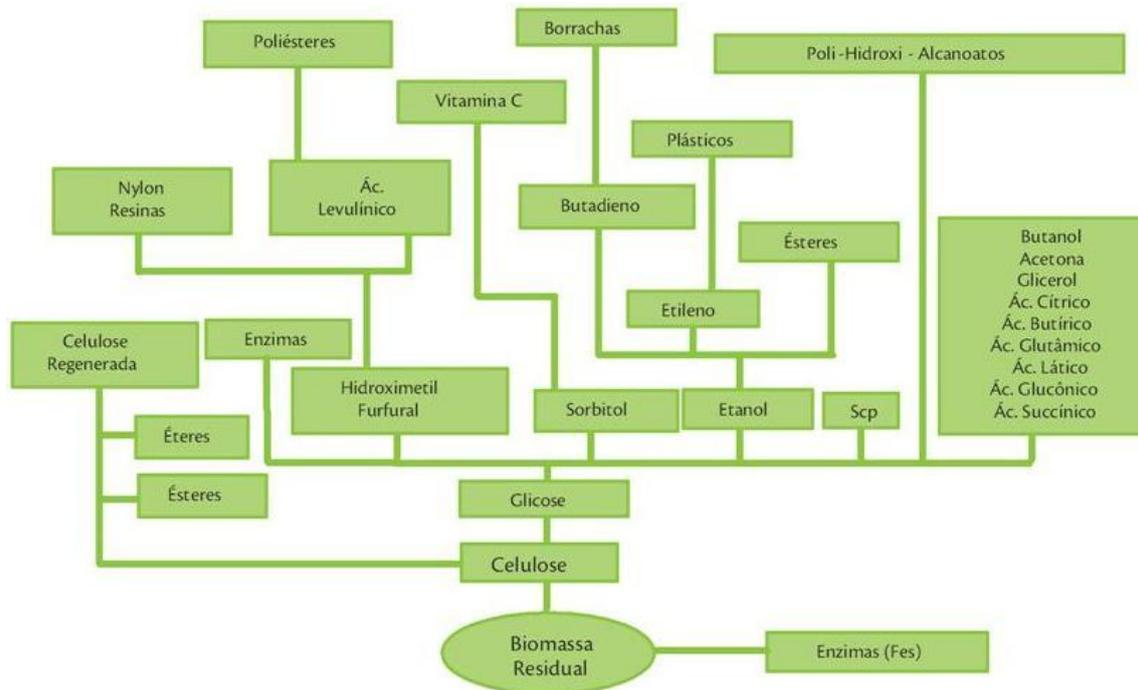


Figura 5 – Biorrefinaria lignocelulósica: produtos da celulose (CGEE, 2010)

### 3.6. Perspectiva de produção no Brasil

Para atingir a produção de 200 mil toneladas de bio n-butanol por ano, serão necessárias perto de 15 milhões de toneladas de cana-de-açúcar até meados de 2015 (D'SILVA, 2012).

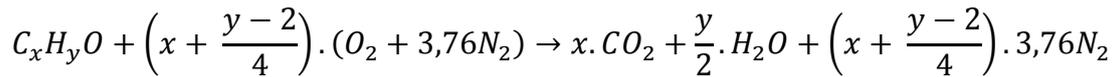
## 4. COMBUSTÃO DO BUTANOL

Quando falamos em combustão deve-se levar em conta que há três diferentes maneiras que um combustível pode ser queimado:

- Combustão completa;
- Combustão com falta de ar;
- Combustão com excesso de ar.

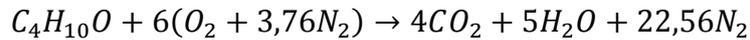
As duas últimas são nomeadas como combustão incompleta. A combustão completa é a que se deseja atingir, porém é exclusivamente teórica, é a combustão clássica que apresenta como produtos apenas dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), água e nitrogênio proveniente do ar.

A equação 1 é a equação que dará o balanço da combustão completa do butanol: (LIMA, 2013)



Equação 1 – Equação estequiométrica para álcoois.

A equação 2 mostra como o butanol sofre sua combustão completa. Sendo o butanol  $C_4H_{10}O$ , temos:



Equação 2 – Combustão completa do butanol.

Outro parâmetro a ser analisado é a relação ar/combustível dessa combustão, para isso deve-se calcular a massa do ar estequiométrico envolvido na combustão de um mol de combustível, temos:

- Massa de combustível:

$$C_4H_{10}O = 4.12 + 10.1 + 16 = 74 \text{ kg}$$

Equação 3 – Cálculo da massa do combustível.

- Massa de ar:

$$6(O_2 + 3,76N_2) = 6(2.16 + 3,76.2.14) = 823,68 \text{ kg}$$

Equação 4 – Cálculo da massa de ar.

A equação 5 apresenta a relação ar combustível de butanol para uma combustão completa. Calculadas as massas de combustível (equação 3) e de ar (equação 4), temos que a relação ar/combustível é:

$$A/C = \frac{m_{ar}}{m_{comb}} = \frac{823,68}{74} = 11,13$$

Equação 5 – Relação ar/combustível butanol.

O valor dessa relação significa que para cada kg de combustível são necessários 11,13kg de ar para que a combustão ocorra de forma completa. Essa relação é chamada de relação ar/combustível estequiométrica.

Todos os cálculos apresentados até então são de caráter teórico da queima do butanol, levando em consideração que uma combustão completa nunca é atingida por um motor.

Como já apresentado, a combustão incompleta pode ocorrer de duas maneiras tanto com falta de ar como com excesso de ar. Tomando em conta que o combustível em estudo será utilizado em motores de ciclo Otto há uma relação importante que se deve conhecer a

respeito desse tipo de motor, essa relação é o coeficiente de excesso de ar  $\lambda$  (lambda). Temos na equação 6: (LODETTI, 2013)

$$\lambda = \frac{A/C_{real}}{A/C_{estequiométrico}}$$

Equação 6 – Coeficiente de excesso de ar.

A equação 6 pode ter três tipos de resultados onde a mistura ar/combustível em questão pode ser classificada, de modo que:

- $\lambda = 1$  ; mistura estequiométrica;
- $\lambda > 1$  ; mistura apresenta excesso de ar, denomina-se uma mistura pobre;
- $\lambda < 1$  ; mistura com falta de ar, denomina-se uma mistura rica.

Ao empregarmos o combustível em motores de ciclo Otto é necessário saber como esses motores funcionam. Basicamente são motores que apresentam quatro cursos distintos, sendo eles o curso de admissão, compressão, ignição e exaustão.

Os motores de ciclo Otto tem sua operação restrita a misturas ligeiramente pobres ou ligeiramente ricas, com  $0,8 < \lambda < 1,3$ . Assim é de se esperar que o combustível utilizado queime tanto com ligeira falta de ar quanto com ligeiro excesso de ar.

Numa combustão incompleta com falta de ar os produtos da reação se diferenciam um pouco da combustão completa, apresentando monóxido de carbono (CO), água, gás hidrogênio (H<sub>2</sub>) e nitrogênio proveniente do ar. Para o caso de  $\lambda = 0,8$  temos 80% do ar estequiométrico na combustão. Com essa falta de ar nota-se que o produto da reação se torna mais tóxico pela presença de gases como o monóxido de carbono que passam a existir, de modo a se fazer necessário a presença dos catalisadores nos escapamentos do automóvel para fazer com que esses gases nocivos sejam minimizados, sendo modificados no catalisador passando a liberar dióxido de carbono ao invés de monóxido de carbono.

Na combustão com excesso de ar a gama de produtos da reação também apresenta variações. Por conter mais ar do que o desejado, o produto pode apresentar a formação de gases do tipo NO<sub>x</sub>, o qual também pode ser minimizado com o emprego do catalisador transformando esse gás em gás nitrogênio (N<sub>2</sub>) e outros gases.

Percebe-se que a emissão de gases nocivos são mais evidentes quando a combustão se apresenta de forma incompleta, por isso é desejado que a combustão se aproxime o máximo possível da completa.

## 5. SEGURANÇA NO USO DO BUTANOL PARA CADA UM DE SEUS ISÔMEROS

Assim como quaisquer substâncias químicas o butanol possui riscos de segurança que devem ser levados em consideração. Para isso encontra-se nas empresas fornecedoras dos produtos fichas de segurança para cada tipo específico de produto que está sendo adquirido para o uso. Nessas fichas de segurança encontramos as características do produto, assim como quais os perigos apresentados por ele, meios de realizarem socorros, extinção, condições ideais para armazenamento, propriedades, entre outros parâmetros.

Essas fichas de segurança são denominadas FISQP (ficha de informações de segurança de produtos).

## 6. APLICAÇÕES EM ESTADO DE PESQUISA PARA O USO DO BUTANOL

Nesta seção serão comentados sucintamente artigos científicos publicados por autores onde foram pesquisadas aplicações diversas para o butanol, principalmente o isômero n-butanol que é o mais utilizado quando a aplicação é combustível para qualquer que seja a finalidade do processo de combustão.

Há estudos em a respeito do uso do n-butanol, juntamente com n-butano em contra-corrente, para mover uma turbina de um jato. Os estudos são baseados em conceito de cinética química do n-butanol quando queimado a pressão atmosférica. A chama é produzida em uma câmara de volume 24,32 L. O sistema de ignição é por centelha no centro da câmara. O protótipo é esquematizado na Fig. 6. (SARATHY, et al. 2009)

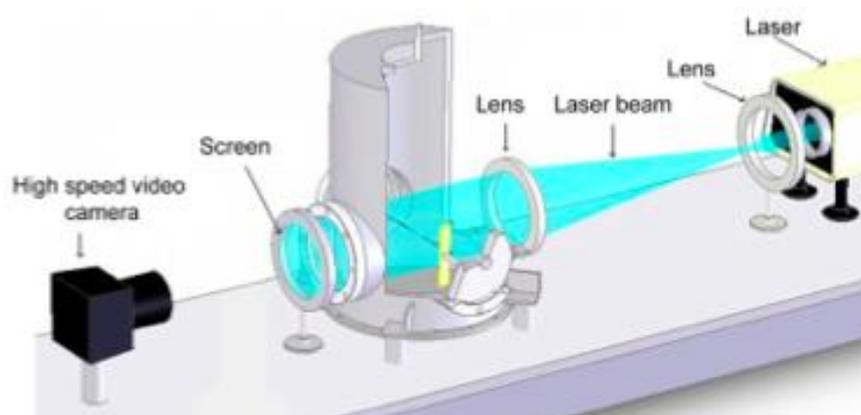


Figura 6 – Protótipo que promove queima do n-butanol e gera chama com características laminares.

Pesquisou-se a respeito do n-butanol como combustível alternativo em motores de ignição por compressão homogênea, também chamados de autoignição controlada. Nessa pesquisa três combustíveis foram analisados, a gasolina pura (Bu0), uma mistura de gasolina e butanol (Bu30) com 30% de n-butanol e 70% de gasolina, e por fim o n-butanol puro

(Bu100). Chegou-se a uma conclusão que ao aumentar o teor de n-butanol na mistura a autoignição acontecia mais rapidamente e a pressão média efetiva do cilindro diminuía. A duração da combustão também tende a aumentar quando a concentração de n-butanol aumenta. Quanto a emissões, quanto maior a concentração de n-butanol no combustível maiores serão as emissões de gases denominados formaldeídos e acetaldeídos. (BANG-QUAN, et al. 2013)

Outra pesquisa aponta o uso do n-butanol em mistura com diesel em quantidades de 8-16% para motores diesel de grande porte de seis cilindros, turbo, com after-cooler e injeção direta, motores “Mercedes-Benz”. Experimentalmente concluiu-se que houve atraso de ignição ao ser inserida a mistura, uma pequena queda na pressão de injeção de combustível, a pressão máxima nos cilindros foi menor e na primeira parte da combustão obtiveram-se temperaturas mais baixas. Neste trabalho também foram estudadas misturas contendo etanol e diesel. A Tabela 5 apresenta as características dos combustíveis e misturas postos à testes.

Quanto as emissões, foram medidas que gases nitrogenados tem menores emissões quando é misturado uma quantidade maior de biocombustível ao diesel. (RAKOPOULOS, et al. 2010)

Tabela 5 – Características dos combustíveis testados.

Propriedades do combustível	Diesel	Etanol C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	<i>n</i> -Butanol C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> OH
Densidade a 20°C (kg/m <sup>3</sup> )	837	788	810
Número de cetano	50	~8	~25
Menor poder calorífico (MJ/kg)	43	26.8	33.1
Viscosidade cinemática a 40°C (mm <sup>2</sup> /s)	2.6	1.2	3.6 <sup>a</sup>
Ponto de ebulição	180-360	78	118
Calor latente de evaporação (kJ/kg)	250	840	585
Oxigênio (% peso)	0	34.8	21.6
Módulo da capacidade de elasticidade	16.000	13.200	15.000
Relação estequiométrica Ar-Combustível	15.0	9.0	11.2
Peso molecular	170	46	74

Medidas a 20°C.

Quanto a motores de ignição por centelha foi pesquisado a combustão de misturas de gasolina com n-butanol em proporções de 20% e 60% de n-butanol no combustível. Análises como a fração de massa queimada foram medidas. A Fig. 7 ilustra um gráfico que mostra como o motor consome menos combustível quando se aumenta a concentração de n-butanol na mistura. Por suas características na combustão o autor conclui que o n-butanol pode ser um substituto direto à gasolina, podendo substituí-la de forma integral ou como misturas, como já foi apresentado neste trabalho. (SZWAJA, et al. 2009)

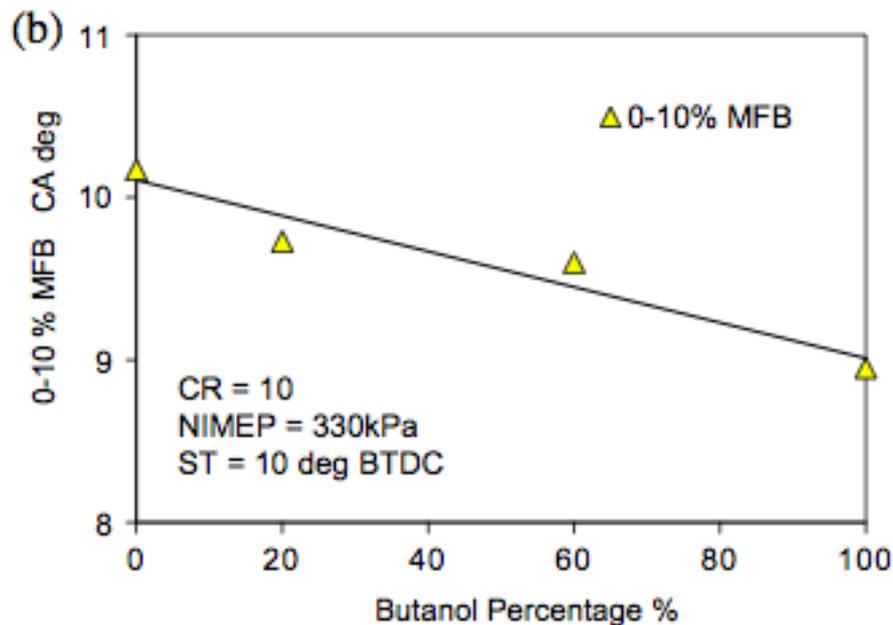


Figura 7 – Fração em massa queimada x porcentagem de butanol na mistura.

Estudos são feitos também na mistura de n-butanol com o biodiesel produzido a partir de semente de algodão. A mistura alimenta um motor a diesel de um cilindro, quatro tempos e injeção direta de combustível. A análise foi realizada tanto para o biodiesel da semente de algodão puro como para a mistura de 20% de n-butanol no combustível. Foram medidos o consumo de combustível, os gases de exaustão (NOx, CO e hidrocarbonetos não queimados). Foi constatada uma melhoria dessas condições quando acrescentado o n-butanol ao combustível. Para um mesmo consumo a mistura apresenta menores valores de emissões desses tipos de gases. (RAKOPOULOS, 2013)

Estudos também apontam as características da queima do butanol como combustível em motores comuns a gasolina. Analisou-se nesse caso um combustível composto por mistura de 35% butanol com 65% de gasolina e a gasolina pura para que fossem feitas comparações. Constatou-se que a adição de butanol deixa a combustão mais eficiente. O motor apresentou melhor potência, menor consumo de combustível, redução nas emissões de hidrocarbonetos não queimados e CO, porém um aumento considerável nas emissões de gases do tipo NOx.

Ao se realizarem diversos ensaios notou-se que as emissões de hidrocarbonetos e gases CO depende das propriedades do combustível. A potencia gerada e a emissão de gases NOx dependem dos parâmetros de operação do motor. E por fim o consumo de combustível se encontra no meio, tanto na propriedade do combustível como nos parâmetros de operação. (DENG, et al. 2013)

## **7. CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA A CONTINUAÇÃO DO TRABALHO**

Após pesquisar e analisar o biobutanol no Brasil e no exterior listam-se diversas fontes de matéria-prima disponíveis para sua obtenção. As novas tecnologias propostas para otimização e sistematização da produção desse combustível variam desde o uso de bactérias capazes de reciclar papéis descartados a utilização de biomassa.

Com base na alternativa proposta para a substituição dos combustíveis fósseis, o biobutanol se destaca por possuir maior semelhança com a gasolina contrapondo o etanol, que se mostra também uma alternativa para esse derivado do petróleo.

Com o aumento da demanda de energia no mundo moderno, a busca por tecnologias renováveis para a produção de combustíveis garante consideravelmente a diversidade de fontes de matéria-prima e uma menor degradação do meio ambiente.

Após conhecer basicamente o biobutanol e suas tecnologias de produção, é necessário conhecer os seus aspectos de segurança, pois alguns deles se diferem entre os diferentes isômeros do butanol.

É possível também estimar o potencial de produção de biobutanol levando em consideração o volume disponível de matéria-prima. O volume desejável de biobutanol a ser produzido também pode ser considerado, tanto para uma determinada indústria química ou para fins veiculares. Para isso, é necessário obter dados laboratoriais, onde são encontrados resultados que são o volume de biobutanol produzido em litros por massa ou volume de matéria-prima, no caso a biomassa e as características dos processos de produção de biobutanol em estudo. É essencial que sejam pesquisadas e utilizadas matérias-primas abundantes em uma determinada região, e que esta matéria-prima tenha uma infraestrutura consolidada de produção e transporte em massa, como é o caso do bagaço de cana, palhas de cana e milho, resíduos da indústria madeireira, entre outras matérias-primas. A proximidade da matéria-prima com o local de industrialização do biobutanol é também essencial para minimizar o custo de transporte.

Pesquisas em cima do biobutanol como combustível também têm sido desenvolvidas. Posteriormente o biobutanol pode ser estudado com profundidade nos seguintes temas no âmbito do curso de Engenharia de Energia:

- Estudo do impacto da produção do biobutanol na cadeia sucroenergética;
- Biorefinarias associadas à produção de biobutanol;
- Desempenho do butanol em motores de combustão interna (puro ou misturado à gasolina ou por meio de outros *blends* de combustíveis);
- Uso do biobutanol em turbinas e queimadores e emissões;
- Potencial de produção de biobutanol no Mato Grosso do Sul.

A partir dos trabalhos pesquisados que constam estudos a respeito do comportamento de motores tanto ciclo Diesel como ciclo Otto sendo abastecidos por misturas de combustíveis obtendo em sua composição o butanol (ou biobutanol) podemos concluir a respeito do comportamento de alguns parâmetros desse motor, concluir como esses parâmetros irão variar ao ser adicionada a mistura ao invés do combustível convencional. Segundo Deng, viu-se que a emissão de hidrocarbonetos e gases CO dependem exclusivamente das características do combustível, enquanto a potência e a emissão de gases nitrogenados dependem dos parâmetros de operação do motor. Além disso o consumo de combustível depende desses dois parâmetros. O consumo de combustível depende tanto dos parâmetros de operação do motor como das características do combustível em questão, por exemplo podemos usar uma mistura gasolina e butanol, o que provocaria melhoria no consumo do combustível mas ao alimentar o motor com a mistura ajustamos este para uma potência superior aquela produzida quando alimentado com gasolina pura, assim não podemos garantir que o consumo de combustível será favorável já que aumentando a potência produzida pelo motor ele tende a consumir mais combustível.

Nas pesquisas há uma variância de parâmetros muito grande devido a diferença dos motores em que foram feitos os ensaios. O comportamento da mistura e dos parâmetros depende da qualidade e características do motor em questão, ou seja, não podemos comparar resultados estudados com motor Otto com os resultados obtidos para motores Diesel.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BANG-QUAN, H.; MAO-BIN L.; JIE Y.; HUA Z.; “**Combustion and emission characteristics of a HCCI engine fuelled with n-butanol-gasoline blends**” Fuel. Publicado em 26 Fev 2013.

CGEE. “**Química Verde no Brasil: 2010-2030**”. Brasília-DF, 2010. Acessado em 15 Fev 2013. Disponível em: <[http://www.cgee.org.br/publicacoes/quimica\\_verde.php](http://www.cgee.org.br/publicacoes/quimica_verde.php)>

COSMIC CHEMICALS. “**N-Butanol**”. Acessado em 11 Dez 2013. Disponível em: <<http://www.indiamart.com/cosmicchemicals/n-butanol.html>>

CRESPO, S. G. “**Importação de gasolina aumenta 42 mil vezes em três anos**”. Acessado em 11 Dez 2013. Disponível em: <<http://achadoseconomicos.blogosfera.uol.com.br/2013/09/11/importacao-de-gasolina-aumenta-42-mil-vezes-em-tres-anos/>>

DENG, B.; YANG J.; ZHANG D.; FENG R.; FU J.; LIU J.; LI K.; LIU X. “**The challenges and strategies of butanol application in conventional engines: The sensitivity study of ignition and valve timing**”. Applied Energy, volume 108. Publicado em Ago 2013.

D’SILVA, A. “**BioButanol: A Gasolina de Amanhã**”. Acessado em 28 Abr 2012. Disponível em: <<http://mybelojardim.com.br/biobutanol-a-gasolina-de-amanha>>

FREITAS, J. F. “**Identificação de oportunidades para a produção de produtos químicos a partir de rotas sucroquímicas e alcoolquímicas**”. Acessado em 21 Nov 2012. Disponível em: <[teses2.ufrj.br/61/dissert/773385.pdf](http://teses2.ufrj.br/61/dissert/773385.pdf)>

GAZZONI, D. L. “**BioButanol**”. Acessado em 29 Abr 2012. Disponível em: <<http://www.gazetadopovo.com.br/mundo/conteudo.phtml?id=844898>>

GOMES, F. “**BP e DuPont inauguram unidade para biobutanol de cana no Brasil**”. Acessado em 29 Abr 2012. Disponível em: <<http://economia.uol.com.br/ultimas-noticias/reuters/2010/11/03/-bp-e-dupont-inauguram-unidade-para-biobutanol-de-cana-no-brasil.jhtm>>

LIMA, A. G. G. “**Combustão**”. Acessado em 27 Nov 2013. Disponível em: <<http://antonioguilherme.web.br.com/Arquivos/combustao.php>>

LODETTI, J. “**O combustível e a combustão. Motores a GASOLINA/ÁLCOOL com ignição por centelha**”. Acessado em 27 Nov 2013. Disponível em: <[http://www.damec.ct.utfpr.edu.br/motores/downloads/3\\_combustiveis.pdf](http://www.damec.ct.utfpr.edu.br/motores/downloads/3_combustiveis.pdf)>

MACHADO, C. “**Technical characteristics and current status of butanol production and use as biofuel**”, V Seminário Latino Americano y del Caribe de Biocombustibles, Santiago - Chile, 2010. Acessado em 15 Set 2013. Disponível em: <[http://www.olade.org/biocombustibles/Documents/Ponencias%20Chile/Sesion%205\\_C%20Machado\\_Enbrapa\\_Brasil.pdf](http://www.olade.org/biocombustibles/Documents/Ponencias%20Chile/Sesion%205_C%20Machado_Enbrapa_Brasil.pdf)>.

NATURA EKOS. "**Bactérias transformam edições velhas de jornais em biocombustível**". Acessado em 13 Fev 2012. Disponível em: <<http://naturaekos.com.br/blog/preservacao-ambiental/bacterias-transformam-edicoes-velhas-de-jornais-em-biocombustivel/>>

PLATONOW, V. “**Petrobras investirá US\$71,6 bilhões até 2016 na área de abastecimento**”. Acessado em 11 Dez 2013. Disponível em: <<http://agenciabrasil.ebc.com.br/noticia/2012-08-29/petrobras-investira-us-716-bilhoes-ate-2016-na-area-de-abastecimento>>

QUIMESP QUÍMICA LTDA. "**Álcool Butílico (N-Butanol)**". Acessado em 30 Abr 2012. Disponível em: <<http://www.quimesp.com/web/index.php/produtos/alcool-butilico-n-butanol-fispq>>

RAKOPOULOS, D. C.; PAPAGIANNAKIS, R.G.; KYRITSIS, D.C. “**Combustion heat release analysis of ethanol or n-butanol diesel fuel blends in heavy-duty DI diesel engine**”. Fuel. Publicado em 17 Dez 2010.

RAKOPOULOS, D. C. “**Combustion and emissions of cottonseed oil and its bio-diesel in blends with either n-butanol or diethyl ether in HSDI diesel engine**”. Fuel, volume 105. Publicado em Mar 2013.

SARATHY, S. M.; THOMSON, M.J.; TOGBÉ, C.; DAGAUT, P.; HALTER, F.; MOUNAIM-ROUSSELLE, C. “**An experimental and kinetic modeling study of n-butanol combustion**”. Combustion and Flame. Publicado em 06 Jan 2009.

SZWAJA, S.; NABER, J.D. “**Combustion of n-butanol in a spark-ignition IC engine**”. Fuel. Publicado em 09 Set 2009.

TIANJIN SODA PLANT. “**Isobutanol**”. Acessado em 11 Dez 2013. Disponível em: <<http://tjsoda.en.alibaba.com/product/241168862-209645915/Isobutanol.html>>