

BAGAÇO DE CANA DE AÇÚCAR COMO FONTE ENERGÉTICA SUGAR CANE BAG AS AN ENERGY SOURCE

Rogério Aguilera, Erika Cristina da Silva; Rhodiney Vaz Martins, Alex Paubel Junger,
Sinclair Mallet Guy Guerra, Jadir perpétuo dos Santos
Universidade Federal do ABC, Brasil | Universidade Cruzeiro do Sul, Brasil
alexpaubel@hotmail.com

RESUMO

Este trabalho visa principalmente a discorrer acerca do potencial de utilização do bagaço de cana-de-açúcar para fins energéticos. A questão da venda do excedente da energia elétrica coproduzida nas usinas de açúcar e álcool a partir da queima do bagaço bem como a questão das tecnologias para maximizar estes excedentes com ciclos combinados e supercríticos serão mencionados. Basicamente o trabalho será dividido nos seguintes tópicos: Introdução; Dados de produtividade do bagaço (Kg de bagaço por tonelada de cana processada e outros dados), Caracterização do bagaço, Tecnologias de conversão energética tais como ciclo de potencia a vapor e combinados e por último Ciclo de vida e balanço energético do etanol.

Palavras chave: bagaço, caldeiras, combinado, caracterização, etanol.

ABSTRACT

This work is mainly aimed at discussing the potential use of sugarcane bagasse for energy purposes. The question of the sale of the surplus of the electric energy coproduced in the sugar and alcohol plants from the burning of the bagasse as well as the question of technologies to maximize these surpluses with combined and supercritical cycles will be mentioned. Basically the work will be divided into the following topics: Introduction; Bagasse productivity data (Kg of bagasse per ton of processed cane and other data), Bagasse characterization, Energy conversion technologies such as steam and combined cycle power and lastly Energy life cycle and energy balance of ethanol.

Keywords: bagasse, boilers, combined, characterization, ethanol

INTRODUÇÃO

Com a crise do petróleo ocorrida em meados de 1973, deu-se à origem o Proalcool, sendo que em 1988, o álcool chegou a apresentar cerca de 60% do consumo total de combustível Otto. Todavia em 1989, houve a crise do álcool que foi influenciada pela crise no setor sucroalcooleiro e consequente perda de confiança do consumidor. No entanto, com a implantação da rede de distribuição do combustível alternativo, somados ao desenvolvimento da tecnologia motor álcool e da biotecnologia, a venda de carros flex representou o percentual de 91% de todos carros vendidos em 2016 enquanto que em 1997/1998 esta representatividade foi de apenas 0,3%.

O organograma abaixo ilustra basicamente a cadeia sucroenergética cujos resíduos e subprodutos podem ser reinseridos na cadeia para sua reutilização tornando assim um processo amplamente eficiente.

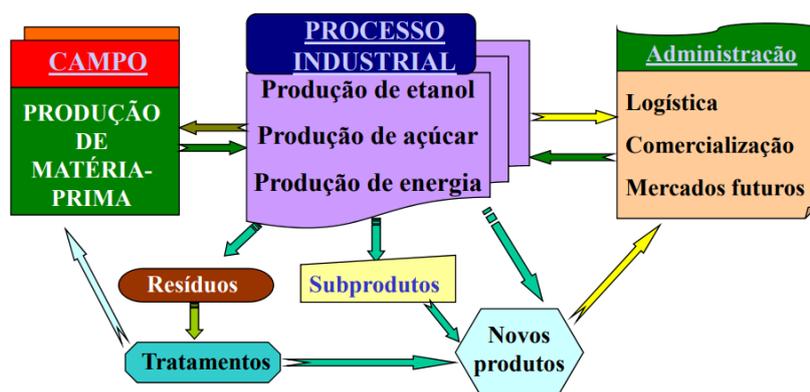


Figura 1. Organograma simplificado da cadeia sucroenergética

Segundo Datagro (2016), cerca de 69% da produção de açúcar foi destinada ao mercado externo e o remanescente, ou seja 31%, para o mercado interno e cerca de 94% do etanol produzido foi destinado ao mercado interno, e o remanescente, ou seja 6%, para o mercado exportação. Segundo Unica (2014), a projeção para 2020 é que a produção de etanol mais do que dobre e a de açúcar que haja um incremento de cerca de 17%.

De acordo com Unica (2011) na figura 2 logo abaixo, estimou que a produção de cana-de-açúcar mais do que dobrasse na safra de 2016/2017 em relação aos dados de 2011. No entanto, dados da CONAB (2017), relatou uma safra de 630 milhões de

toneladas. Tal fato deve-se ao fato principalmente mercadológico relacionado ao mercado interno.

País	Prod. (milhões de t)	% part.	Área plantada milhões de ha	% part.
Brasil	335,50 * (675,00*)	33,00	9,2*	30,52
Índia	335,52	21,54	4,90	22,96
China	106,32	6,82	1,23	5,59
Tailândia	64,37	4,13	1,01	4,59
Paquistão	54,75	3,51	1,03	4,68
México	50,68	3,25	0,68	3,09
Colômbia	40,00	2,56	0,45	2,05
Austrália	36,00	2,31	0,42	1,91
Outros	335,95	21,56	4,72	21,47
Total	1.557,66	100,00	21,98	100,00

Figura 2. Principais países produtores de cana-de-açúcar

Segundo Big Anel (2017), a biomassa já responde por cerca de 8,7% da capacidade instalada da matriz de energia elétrica brasileira segundo que, somente o bagaço oriundo da moagem da cana, responde por cerca de 6,8% deste total, ou seja, 78.1% do total da biomassa. Muito embora os dados atualizados coloquem a biomassa em terceiro lugar, em 2015 a mesma já chegou a ocupar o segundo lugar.

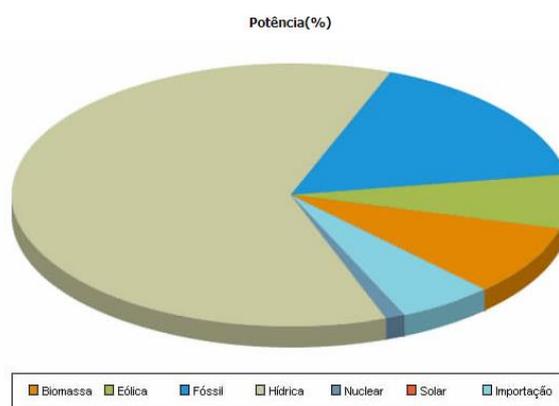


Figura 3. Matriz de energia elétrica brasileira por fonte

O bagaço da cana de açúcar é o combustível das usinas de açúcar e álcool e utilizado localmente, logo após a moagem da cana. As modernas usinas não consomem todo o bagaço produzido e o excedente pode ser fornecido a terceiros, "in natura" ou seco e enfardado. O bagaço é queimado diretamente nas caldeiras com cerca de 50% de

umidade. A composição elementar é muito semelhante à da lenha e suas propriedades podem ser tomadas como similares, exceto é claro, quanto a sua forma física.

De acordo com PELLEGRINI (2002), entre as diversas formas de aproveitamento do bagaço de cana, destaca-se o seu valor como combustível em substituição aos derivados de petróleo, especialmente óleo combustível e lenha. O bagaço proporciona às empresas sucroalcooleiras o privilégio da autossuficiência de energia térmica e energia elétrica, além da possibilidade de vender o excedente, condições essas quase que inexistentes na maioria das atividades industriais. O bagaço de cana, dentre as biomassas, é aquele que reúne os melhores atributos econômicos para ser industrializado e competir comercialmente com o óleo combustível em virtude das seguintes vantagens:

- Ter uma lavoura organizada, cujos custos são debitados nos produtos fim: açúcar e/ou álcool;
- Ter todo o sistema de transporte campo-indústria organizado e ocorrendo por conta do mesmo produto fim;
- Ser produzido em grandes quantidades, concentradas em um ponto específico.

DADOS DE PRODUTIVIDADE DO BAGAÇO DE CANA

De acordo com autores, Embrapa (2006), inicialmente o bagaço – 25% a 30% do peso da cana processada – era utilizado nas usinas como substituto da lenha para geração de calor. Mais recentemente vem sendo utilizado para gerar vapor, com flexibilidade para ser transformado em outras formas de energia, como calor, eletricidade ou tração mecânica. O aumento do custo da energia elétrica e do petróleo tornou atraente a utilização do bagaço para a cogeração.

Alternativamente à cogeração, o bagaço ainda pode ter uso fora das usinas e destilarias, como insumo volumoso de ração animal, na fabricação de papel, na fabricação de elementos estruturais, até na produção de álcool combustível adicional, por hidrólise ou através da gaseificação.

O quadro abaixo mostra um indicador interessante informando que a proporção do bagaço combustível na cana é alto na região Centro-Sul. Note que do total do bagaço produzido 27,5%, cerca de 89%, ou seja, 24,4% é utilizado com fonte de combustível

das usinas. Este indicador também pode ser aplicável para todo o território brasileiro haja visto que o percentual do bagaço produzido na região centro-sul corresponde a um pouco mais de 90% do total produzido no Brasil atualmente.

ESTADO/REGIÃO	PROPORÇÃO DO BAGAÇO COMBUSTÍVEL NA CANA MOÍDA (%)	PROPORÇÃO DO BAGAÇO PARA OUTROS USOS NA CANA MOÍDA (%)	TOTAL DO BAGAÇO PRODUZIDO (%)
SP	24,3%	3,2%	27,5%
PR	24,1%	3%	27%
MG	23,8%	3,4%	27,2%
GO	25,8%	2,7%	28,4%
MS	22,1%	4,6%	26,8%
MG	26,7%	1,8%	28,5%
RJ	25%	4,2%	29,2%
FC	28,8%	0,3%	29,1%
TOTAL DA REGIÃO CENTRO-SUL	24,4%	3,2%	27,5%

Figura 4. Proporção do bagaço combustível na cana moída (%)

Além da alta proporção do bagaço na cana moída, o mesmo responde por 1/3 da energia primária da cana-de-açúcar conforme dados da Unica (2014). Um dado interessante seria a de que 1 barril de petróleo corresponde a 1386×10^3 KCAL sendo que 1 tonelada de cana energia primária é equivalente a cerca de 1,2 barris de petróleo. Se considerarmos os dados safra de cana da UNICA 2016/2017 que é projetada em 630 milhões de toneladas de cana, isto significa a equivalência de 525 milhões de petróleo por ano ou cerca de 1,44 milhões de barris de petróleo por dia. Isto corresponde a cerca de 54% de toda a produção de petróleo anual segundo ANP(2017).

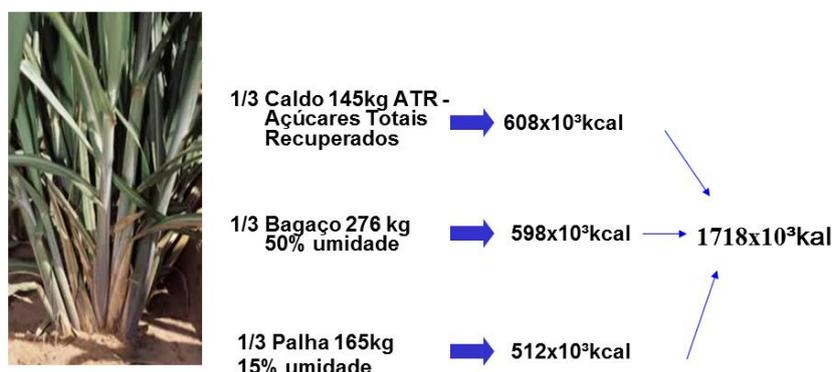


Figura 4. Energia primária da cana-de-açúcar

O alto índice de energia primária conciliada com a demanda abundantamente disponível do bagaço na origem da moagem faz com que haja uma notória participação da bioeletricidade na matriz elétrica nacional. Em 2016, aproximadamente 50% da energia gerada da biomassa, foi exportada para o SIN (Sistema Interligado Nacional). A curva de geração de bioeletricidade apresentada no Gráfico 1, decomposta em cana-de-açúcar e em outras fontes, ressalta a magnitude da participação da biomassa de cana. A exportação de energia elétrica das usinas sucroenergéticas correspondeu a 60% de toda sua geração em 2016, enquanto a autoprodução não-injetada foi de 40%. Para as outras biomassas, este número foi de 15% e 85%, respectivamente.

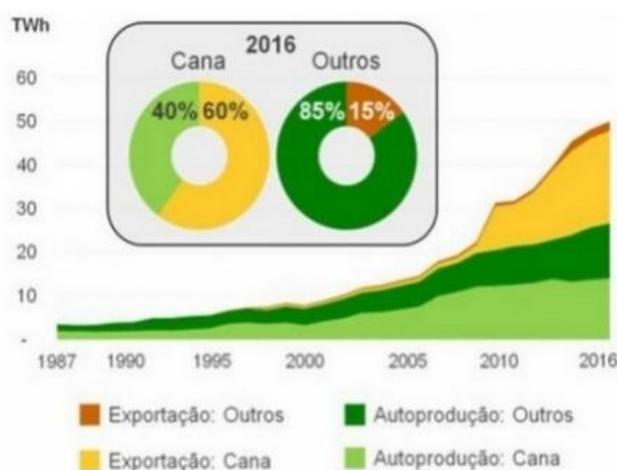


Gráfico 1. Fonte EPE

A evolução dos fatores de produção do setor sucroenergético é apresentada no Gráfico 2. É possível notar que, ao longo do tempo, houve um aumento da eficiência, tanto para a produção de açúcar quanto para a de etanol, consumindo menor quantidade de bagaço por unidade de produto produzido. Este ganho de eficiência possibilitou que o bagaço excedente pudesse ser direcionado para a produção e exportação de bioeletricidade.

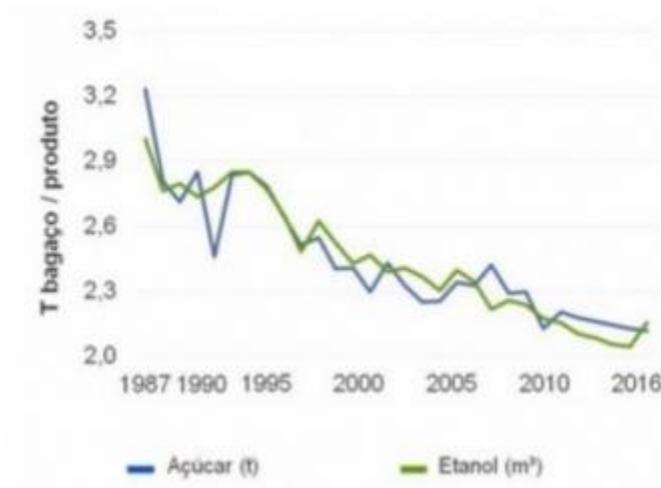


Gráfico 2. Fonte EPE

Observa-se que em 1987 toda a eletricidade gerada pelas usinas foi destinada, exclusivamente, para autoconsumo, não havendo exportação de energia para o SIN. Já em 2007, a quantidade de energia exportada alcançou 13 kWh por tonelada de cana moída. Com a participação das usinas sucroenergéticas nos leilões de energia elétrica e a eficiência do setor, a geração de energia para exportação aumentou para 34 kWh em 2016, por cada tonelada de cana processada no país. Avaliando somente as usinas vencedoras dos leilões de energia elétrica, evidencia-se que a geração e, consequentemente, a exportação de energia pode ser muito maior. Para este grupo o fator médio de exportação ao SIN é de 72 kWh por tonelada de cana processada.



Figura 5. Fator de Energia exportada por tonelada de cana moída para o SIN

Segundo EPE (2017), a geração de eletricidade pelo bagaço constitui-se como uma alternativa que visa a contribuir para a segurança energética nacional, uma vez que o período de safra coincide com o período de maior escassez hídrica, que responde à maior parcela de geração de energia elétrica. Além da energia hídrica, coincidentemente a eólica e térmica também seguem a mesma sazonalidade e é justamente nesta época que ocorre a exportação do excedente de energia elétrica para o SIN.

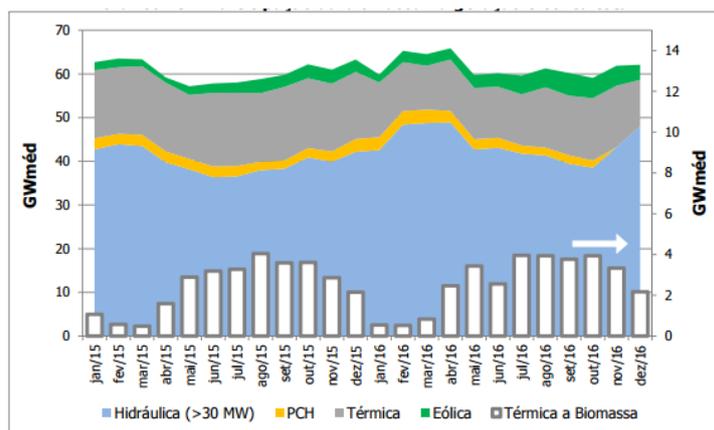


Gráfico 3. Participação da biomassa na geração elétrica total (Fonte EPE)

Projeções da EPE (Empresa de Pesquisa Energética) para 2030 estima-se que a produção de cana-de-açúcar atinja cerca de 875 milhões o que fará com que a oferta de energia a partir desta fonte seja proporcionalmente maior, no entanto isto dependerá de vários fatores conjunturais tais como: Crescimento econômico, aproveitamento da palha e pontas, upgrade e aquisição de caldeiras com aumento de eficiência operacional e, por fim, redução do investimento.

CARACTERIZAÇÃO DO BAGAÇO DE CANA

A cana-de-açúcar tem a propriedade de armazenar carboidratos na forma de açúcares (sacarose) e possui alto índice de fotossintetizante e uma elevada produtividade no campo entre 80 e 90 ton/ha. A maioria da produção da cana-de-açúcar esta localizada na região Centro-Sul, onde a colheita mecanizada está em crescente utilização ao invés da colheita manual que requer queimada.

Segundo CUNHA (1999), a caracterização experimental do bagaço de cana é apresentado na tabela abaixo que, aproxima-se dos valores teóricos.

	Solvente Extrator		
	Água	Etanol	Água e Etanol
<i>Celulose (%)</i>	42,50	45,25	46,82
<i>Hemicelulose (%)</i>	24,88	27,29	26,84
<i>Lignina total (%)</i>	20,90	18,93	19,76
<i>Cinzas (%)</i>	1,64	1,64	1,64
<i>Extrativos (%)</i>	5,83	5,64	9,38
<i>Total (%)</i>	95,75	98,75	104,44

Tabela 1. Caracterização experimental do bagaço

Segundo HORST (2013), as frações em peso dos elementos químicos são mostrados na tabela 2. Tais dados foram coletados de acordo com diferentes autores conforme ilustrado.

Biomassa	C	H	N	S	O	Referência
Casca de arroz	46,96	4,30	0,40	0,02	48,32	Jenkins (1990)
Grão de café	44,00	5,40	0,70	-	49,90	Brum et al. (2008)
Bagaço de cana	43,42	5,71	1,23	-	49,64	Seye et al. (2003)
Madeira	48,06	6,30	0,70	-	45,21	Seye et al. (2003)
Palha de milho	45,80	4,50	0,75	-	48,90	Raveendran et al (1995)

Tabela 2. Análise elementar do bagaço

Segundo HORST (2013), a tabela abaixo mostra dados da análise imediata das frações em peso, teores de umidade, frações voláteis, teores de cinzas e de carbono fixo.

Amostra	Voláteis (%)	Carbono fixo (%)	Umidade (%)	Referência
Cascas de arroz	63,6	15,8	10,0	Souza et al.(2005) Diniz et al. (2004)
Bagaço de cana	64.30	11,90	6,4	Jenkins (1990) Seye et al.(2003)
Madeira de eucalipto	73.78	14,95	12,4	Brito (1993) Jenkins (1990)
Palha de milho	74.10	24,30	5,7	Reveendran et al. (2005) Quirino et al(2005)
Grão de soja	63.50	27,70	6,2	Silva et al.(2008)

Tabela 3. Análise imediata do bagaço

TÉCNOLOGIAS DE CONVERSÃO ENERGÉTICAS

Atualmente as usinas são autossuficientes energeticamente pois queima quase todo o bagaço oriundo da moagem. No entanto, há de se questionar que há uma tendência para a valorização dos subprodutos da cana para que o excedente de bagaço seja interessante as usinas.

Muito embora ainda hajam caldeiras do tipo contrapressão que operam com pressão de 21 bar, algumas usinas já operam com pressões bem mais elevadas, por exemplo, entre 42 e 66 bar, gerando um excedente de eletricidade.

Segundo PELLEGRINI (2009), a racionalidade do uso de energia e de geração de energia elétrica excedente estão intimamente ligados a: Geração excedente de bagaço, redução do consumo de vapor nos processos e aproveitamento das pontas e folhas

Conforme matéria publicada no jornal O Estado de São Paulo, segundo o economista Zilmar José de Souza, assessor de bioeletricidade da Única (União da Indústria de Cana de Açúcar), "Seria preciso fazer um amplo programa de troca de caldeiras, para inserir essas usinas no sistema". O chamado retrofit, porém, só vale a pena para o usineiro quando a caldeira atual está no fim da vida útil, antes disso, só com algum incentivo do governo.

Segundo RODRIGUES (2005), que fez uma análise da evolução tecnológica das usinas, existem 4 cenários diferentes para que ocorra o retrofit nas usinas:

- Cenário 1: Instalação típica, caldeiras de baixa eficiência, baixa pressão e aproveitamento técnico, turbinas de simples estágio, transforma energia térmica em mecânica para acionamento das moendas ou transformadas em energia elétrica
- Cenário 2: Fizeram o retrofit com: Instalação de caldeira de alta pressão, alta eficiência, turbinas multi-estágio de condensação, baixo consumo específico de combustível, maior geração de energia elétrica utilizando a mesma quantidade de bagaço,
- Cenário 3: Além do investimento no cenário 2, ocorreu um investimento adicional substituindo o acionamento das turbinas das moendas, acionamento mecânico dos picadores, desfibradores por motores elétricos

de alta eficiência desviando o vapor destas turbinas para as turbinas de multi-estágio. É justamente neste cenário, que ocorre a venda de energia excedente

- Cenário 4: Além do investimento do investimento no cenário 3, foi realizada uma otimização no consumo de vapor da usina termelétrica na linha de baixa pressão. Ao reduzir o consumo de vapor, causa-se uma maximização na geração de energia elétrica maximizando assim a condensação do turbo-gerador e otimizando a geração de energia

Na tabela abaixo, pode-se notar possíveis ganhos nos excedentes de energia elétrica que podem ser utilizados para a comercialização (ROGRIGUES, 2005):

CENÁRIO	DESCRIÇÃO	GERAÇÃO kWh/tc	EXPORTAÇÃO kWh/tc
01	Baixa Eficiência Térmica	13,0	-
02	Alta Eficiência Térmica	80,0	65,2
03	Eletrificação	119,3	90,5
04	Melhorias no Processo	130,2	101,5

Tabela 4. Geração do excedente de energia para vários cenários

De acordo com Payne (1989) e Walter (1994), a maior parte das usinas de açúcar e álcool no mundo utiliza as seguintes tecnologias: Turbinas de contrapressão, Contrapressão e condensação e Turbinas de extração e condensação. A maioria das usinas no Brasil utilizam contrapressão gerando tão somente vapor para o processo e energia para autoconsumo, não é gerado excedente de energia pois devido ao vapor necessário para o processo, a energia excedente pode sofrer instabilidade. No entanto, para que haja estabilidade na geração de energia excedente, é necessário operar com sistemas de extração-condensação.

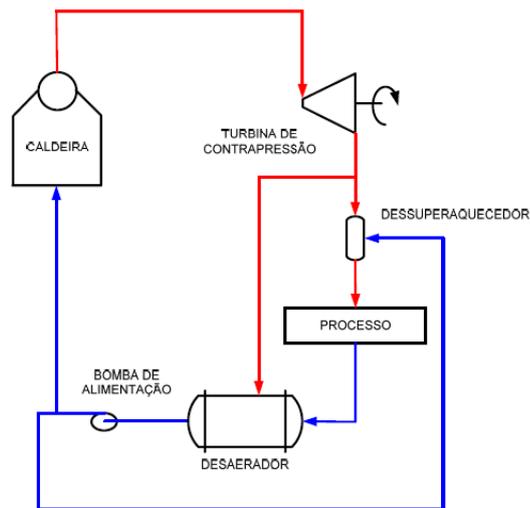


Figura 6. Sistema de Cogeração com Turbina de Contrapressão.

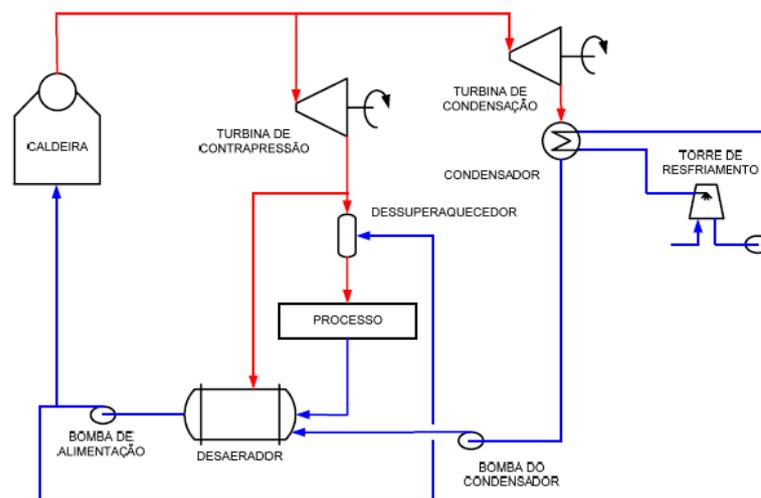


Figura 7. Sistema de Cogeração com Turbina de Contrapressão e de Condensação

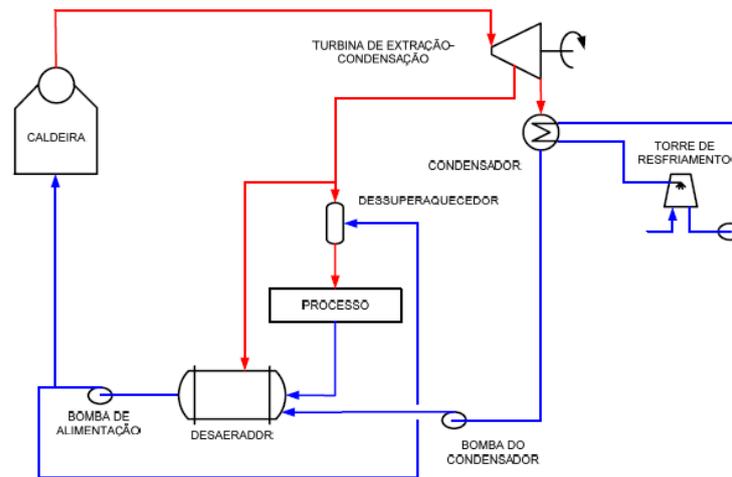


Figura 8. Sistema de Cogeração com Turbina de Extração-Condensação

Um comparativo realizado com três tipos de cogeração: turbinas de contrapressão, turbinas de extração e condensação e com gaseificação do bagaço e turbinas a gás indica que este último pode gerar quase sete vezes mais do que a capacidade das usinas convencionais PELLEGRINI (2009). Sistemas a extração e condensação podem gerar entre 70 e 150 kWh/tc.

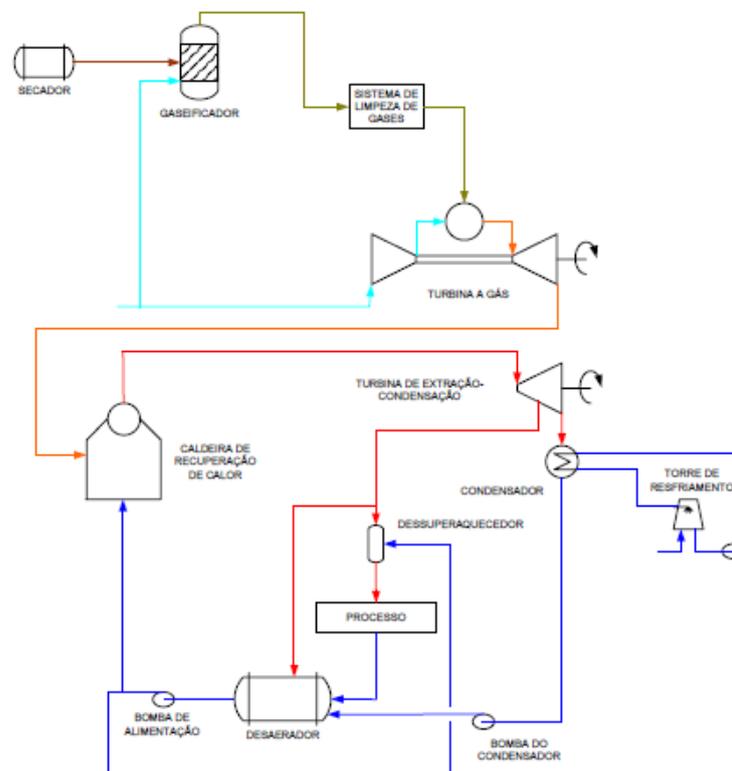


Figura 9. Sistema de Cogeração BIGCC

Um comparativo realizado com três tipos de cogeração: turbinas de contrapressão, turbinas de extração e condensação e com gaseificação do bagaço e turbinas a gás indica que este último pode gerar quase sete vezes mais do que a capacidade das usinas convencionais PELLEGRINI (2009). Sistemas a extração e condensação podem gerar entre 70 e 150 kWh/tc.

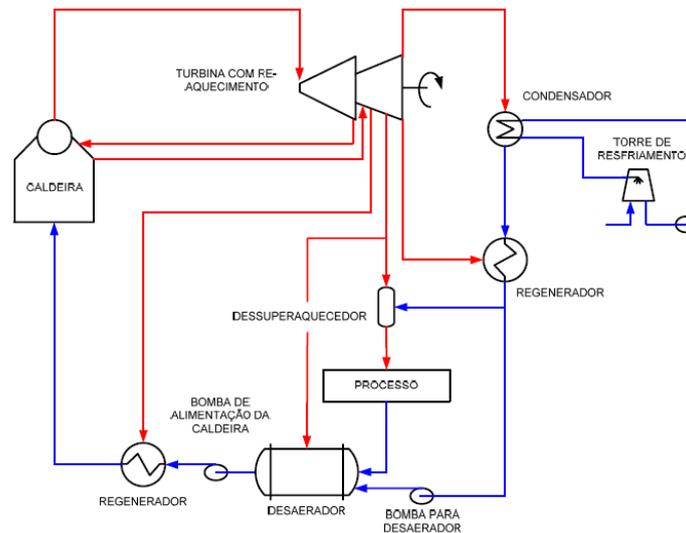


Figura 10. Sistema de Cogeração com Vapor Supercrítico

Dentre os sistemas analisados no parágrafo acima, estudos indicam que a partir do momento em que há aumentos na eficiência dos processos de conversão de energia, o lucro da usina aumenta como um todo ao reduzir custos da produção da eletricidade e de vapor, além de aumentar a receita da usina com a venda do excedente de eletricidade. O aumento da pressão e temperatura pelos diferentes tipos de sistemas de cogeração apresentam VPL positivo, pois a receita de venda de energia excedente será diretamente proporcional à redução do custo de produção da planta que exigirá menos vapor de processo, moendas eletrificadas e melhor integração térmica de alguns processos.

Conclue-se segundo PELLEGRINI (2009), que haja visto que todo o excedente de energia será comercializado, e o ponto ótimo da curva neste processo corresponde à pressão de vapor de 67 bar e temperatura de 480°C. A partir de 67 bar o investimento, poderá ser da ordem de até 10% aproximadamente caso a pressão queira ser atingida a 540 bar sendo que a geração excedente de energia será de aproximadamente 40%.

CICLO DE VIDA

Segundo DIÁZ (2010), a maior emissão de gases, se dá durante a colheita. Este fato deve-se à queima do plantação que ocorre durante a colheita para facilitar. Atualmente esta prática está condenada devido a este à grande emissão de gases de efeito estufa, haja visto o que ocorre com o desmatamento da Amazonia que libera uma grande monta de gases do efeito estufa.

Etapa de produção	Gases Efeito Estufa			
	kg/ha.ano			
	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CO ₂ eq ^a
Plantio da cana	0,0084	0,00134	537,85	717,938
Manejo da Cultura	2,561	1,3543	34,647	508,246
Colheita	22,0539	0,5727	340,723	1039,844
Usina	0	0	0	66,476
Distribuição	0,0011	0,000023	27,9	27,92
Emissão total de GEE fóssil				2360,424

Tabela 5. Emissões totais de gases (CO₂, N₂O e CH₄) no ciclo de usina de açúcar e álcool

Segundo DIÁZ (2010), o balanço energético total de produção de etanol no Brasil é aproximadamente de 10:1; ou seja, que para cada unidade de energia fóssil consumida, produz-se em torno de 10 MJ de energia renovável. O balanço dos GEE indica que um veículo usando etanol de cana de açúcar emite 76,7% menos de CO₂ eq. que o mesmo veículo rodando no mesmo percurso com gasolina pura, caso o veículo use gasolina no padrão brasileiro (com mistura de etanol), emitirá 18,5% menos de GEE do que a gasolina convencional (sem adição de álcool).

Na etapa da colheita são emitidos 44% das emissões totais do processo de produção de etanol, principalmente devido à queima da cana. Futuramente, espera-se que este número caia bastante, devido à lei federal 2.661, do ano de 1998 que vetará o uso da queimada no cultivo de cana brasileira até o ano 2021.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. ANEEL. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em nov. 2012. **Cogeração.** Disponível em <<http://www.infoescola.com/energia/cogerao>> Acesso em 26/04/2011

CPFL investe em biomassa para geração de energia. Disponível em <http://economia.estadao.com.br/noticias/not_8777.htm> Acesso em 22/03/2011.

CONAB: Acompanhamento da safra brasileira, 2016, Companhia Nacional de Abastecimento

DIÁZ, M.C.: Análise do ciclo de vida e balanço energético do etanol de cana-de-açúcar brasileira, 2010

EPE.: Plano nacional de energia 2030, 2016, Ministério de Minas e Energia

CUNHA H.C.M.: Caracterização do bagaço de cana pré-tratado por explosão a vapor: identificação de inibidores potenciais de processos fermentativos e enzimáticos. Lorena: FAENQUIL, 1999, 101p.

PELLEGRINI, L: Análise e otimização termo-econômica-ambiental aplicada à produção combinada de açúcar, álcool e eletricidade, 2009

NEHMI FILHO, V.A. Cana: Mercados e Perspectivas. Agriannual 2009. São Paulo: Instituto FNP, 2009. 516p