



## **Avaliação Técnica da Tecnologia de Gaseificação de Biomassa Integrada a Ciclos Combinados Utilizando Bagaço como Combustível**

Pablo Silva Ortiz <sup>1</sup>  
Osvaldo José Venturini<sup>2</sup>  
Electo Silva Lora <sup>3</sup>  
Andrés Pérez Campo<sup>4</sup>

### **RESUMO**

O ciclo combinado com gaseificação de biomassa integrada (BIGCC) foi identificado como uma tecnologia avançada, com potencial para ser competitivo na geração de eletricidade. A tecnologia BIGCC utiliza a biomassa e subprodutos do processamento de alguns setores industriais como combustíveis. No atual cenário energético do Brasil que apresenta uma matriz de geração de origem predominantemente renovável, torna-se importante a análise dessas tecnologias na produção de açúcar, etanol e eletricidade. Neste contexto, o trabalho desenvolvido abordará a avaliação técnica das duas tecnologias que incorporam as plantas BIGCC: o processo de gaseificação utilizado para criar o gás sintético (syngas) e a análise do ciclo combinado. Além disso, são analisados os custos destes sistemas e as possibilidades de sua implementação através da cogeração no setor sucroalcooleiro do Brasil, onde obtêm-se aumentos até de 10% na eficiência do processo.

**PALAVRAS CHAVE:** Cogeração, Gaseificação, Biomassa.

---

<sup>1</sup> Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI (Brasil), Faculdade de Engenharia Mecânica, Núcleo de Excelência em Geração Termelétrica e Distribuída – NEST  
e-mail: pablo.silvaortiz@gmail.com

<sup>2</sup> Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI (Brasil), Faculdade de Engenharia Mecânica, Núcleo de Excelência em Geração Termelétrica e Distribuída – NEST

<sup>3</sup> Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI (Brasil), Faculdade de Engenharia Mecânica, Núcleo de Excelência em Geração Termelétrica e Distribuída – NEST

<sup>4</sup> Universidade Autónoma de Bucaramanga – UNAB (Colômbia),  
Faculdade de Engenharia Físico- Mecânica, Engenharia em Energia

## ABSTRACT

Biomass Integrated Gasification Combined Cycle (BIGCC) was identified as an advanced technology with potential to be competitive for electricity generation. The BIGCC technology uses biomass and the subproducts of some industrial sectors processing, like sugar cane, as feedstock. The current Brazilian energy matrix is mainly based on renewable generation sources, making it important to assess these gasification technologies in the production of sugar, ethanol and electricity. In this work, a technical evaluation of the technologies incorporated in BIGCC power plants is done: the gasification process and the combined cycle power plant. On the other hand, the generated costs of these systems are analyzed, and the potential for implementation in Brazil plants from sugar cane bagasse is studied, in which a 10% increase in efficiency is obtained.

**KEYWORDS:** Cogeneration, Gasification, Biomass.

## 1. INTRODUÇÃO

A crescente preocupação pelas emissões de gases causadores do efeito estufa e as alterações climáticas devido a fatores antropogênicos, tem despertado o interesse por fontes de energia renováveis nos últimos anos. Uma das soluções mais atraente e sustentável é a biomassa. Nesse sentido, espera-se que sua transformação venha a desempenhar um papel importante na geração de energia limpa e eficiente, ajudando a reduzir o aquecimento global e posicionando-se como uma alternativa em relação aos decrescentes e cada vez mais custosos combustíveis fósseis.

Por este motivo, depois de décadas de esquecimento da biomassa retomou-se sua importância, através de projetos de gaseificação em escala de demonstração, como Varnamo na Suécia, onde está sendo avaliada a viabilidade técnica, econômica e comercial desta tecnologia em relação a outras que utilizam como matéria-prima o carvão. Em países como o Brasil que tem uma matriz energética onde predominam as fontes renováveis, principalmente a biomassa, surge a necessidade de aprofundamento no estudo de tecnologias para valorar subprodutos gerados na cadeia de produção deste setor.

Neste contexto, o trabalho realizado aborda a análise do processo da gaseificação e a análise do ciclo combinado através de ferramentas de simulação que permitem avaliar sistemas BIGCC. Inicialmente foi realizada a análise da gaseificação utilizando o software CSFBM<sup>TM</sup> para determinar a composição do gás de síntese. Numa fase seguinte, a composição do syngas é utilizada como dado no software GateCycle<sup>TM</sup> para analisar o desempenho do Ciclo Combinado. Posteriormente, os resultados obtidos através da interação dos softwares CSFBM e GateCycle, são avaliados considerando o comportamento da gaseificação e a eficiência do ciclo combinado, utilizando como referência a capacidade instalada da usina BIGCC de Varnamo na Suécia, usina reconhecida no mundo pela implementação desta tecnologia.

### 1.1 O Processo da Gaseificação

A gaseificação em termos gerais pode ser definida como a conversão de matéria orgânica num produto gasoso (gás combustível), a alta temperatura, com um recuperável poder calorífico da ordem de 4-7 MJ/Nm<sup>3</sup>, quando o ar é usado como agente oxidante e de 10-18 MJ/Nm<sup>3</sup>, quando

o oxigênio puro é usado. O gás produto do processo da gaseificação esta composto principalmente de hidrogênio (18-20%), monóxido de carbono (18 a 20%), dióxido de carbono (8 a 10%), metano (2 a 3%), vestígios de hidrocarbonetos pesados, como etano e eteno, água, nitrogênio (quando o ar é usado como agente oxidante) e contaminantes diversos, como pequenas partículas carbonizadas, cinzas e alcatrão. O agente oxidante no processo de gaseificação pode ser oxigênio puro, ar, vapor de água ou misturas dos mesmos (Traverso, 2007).

A grande variedade de matérias primas que podem ser utilizadas no processo da gaseificação aumenta ainda mais o interesse pela implementação da gaseificação. Segundo Rao (2007), as matérias-primas que podem ser gaseificadas são carvão, da biomassa (desde resíduos da agricultura até resíduos urbanos), licor negro a partir de usinas de produção de papel, resíduos provenientes das refinarias como o coque de petróleo, asfaltenos, fundos de barril (viscorredução), orimulsão e outros resíduos da indústria petroquímica.

Embora o carvão tenha sido a principal matéria-prima utilizada no processo de gaseificação (WCI, 2009), nos últimos anos ela tem sido aplicada a produtos de processos industriais, agro-industriais e urbanos. O uso destes subprodutos como matérias-primas para o processo da gaseificação, gera benefícios ambientais e sociais, como uma diminuição nos aterros sanitários, melhoria das práticas de manejo de resíduos e o crescimento econômico nas comunidades rurais de países em desenvolvimento (Champagne, 2008).

## **1.2 Caracterização da biomassa**

A biomassa consiste em toda a matéria de origem biológica que é resultado direto e/ou indireto do produto da fotossíntese. Também está incluído o material animal ou vegetal para produzir fibras ou produtos químicos e resíduos biodegradáveis que podem ser queimados como combustível. A biomassa também pode ser definida como a energia solar armazenada nas ligações químicas da matéria orgânica. O dióxido de carbono da atmosfera e a água absorvida pelas raízes das plantas são combinados no processo de fotossíntese para produzir carboidratos que formam a biomassa.

### **1.2.1 Composição da biomassa**

Os principais componentes da biomassa de origem vegetal são a celulose, hemicelulose, lignina e extrativos. A celulose e a hemicelulose constituem a fração de açúcares da biomassa vegetal. A lignina mantém unidas às fibras de celulose. Na Tabela 1 é apresentada uma caracterização das matérias-primas mais utilizadas em sistemas BIGCC. Posteriormente, na Tabela 2 são apresentadas as principais características da composição química do bagaço, combustível utilizado na simulação do processo da gaseificação, a partir da caracterização desenvolvida pelo ECN, onde é considerada a análise elementar e a análise imediata do combustível (em porcentagem de peso, pp. %), (ECN, 2010).

### **1.2.2 Aproveitamento da Biomassa**

A energia química armazenada na biomassa pode ser explorada através de processos bioquímicos e termoquímicos, conforme mostra a Figura 1. Os processos bioquímicos incluem a metalização da biomassa, enquanto os processos termoquímicos incluem sua combustão, pirólise e gaseificação (Kirubakaran et al. 2009). A melhor opção tecnológica vai depender das propriedades físicas e químicas da biomassa e da economia dos processos de aproveitamento.

A gaseificação pode ser considerada uma das formas mais adequadas para a recuperação do potencial energético da biomassa. A gaseificação em comparação com a combustão direta, leva à produção de energia transportável que pode ser armazenada e utilizada longe da fonte.

Tabela 1 – Composição da biomassa (Adaptado de Kirubakaran et al. 2009)

Biomassa	Cinza	Holocelulose	Celulose	Hemicelulose	Lignina	Extrativos	HHV (MJ/kg)
Bagaço	2,9	65	41,3	22,6	18,3	13,7	16,29
Casca de Coco	0,7	67	36,3	25,1	28,7	8,3	20,5
Espigas de milho	6,8	63,5	42,7	23,6	17,5	9,8	16,54
Casca de arroz	23,5	49,4	31,3	24,3	14,3	8,4	15,29
Palha de arroz	19,8	52,3	37	22,7	13,6	13,1	16,78

Tabela 2 – Composição da biomassa (ECN, 2010)

Análise elementar		Análise imediata (pp. %)	
Carbono (%)	48,6	Umidade (%)	15,5
Hidrogênio (%)	5,84	Volátil	71,8
Nitrogênio (%)	0,16	Carbono fixo	10,4
Oxigênio (%)	42,8	Cinza (%)	2,3
Enxofre (%)	0,04		
Cinza (%)	2,6	HHV (MJ/kg)	19,17

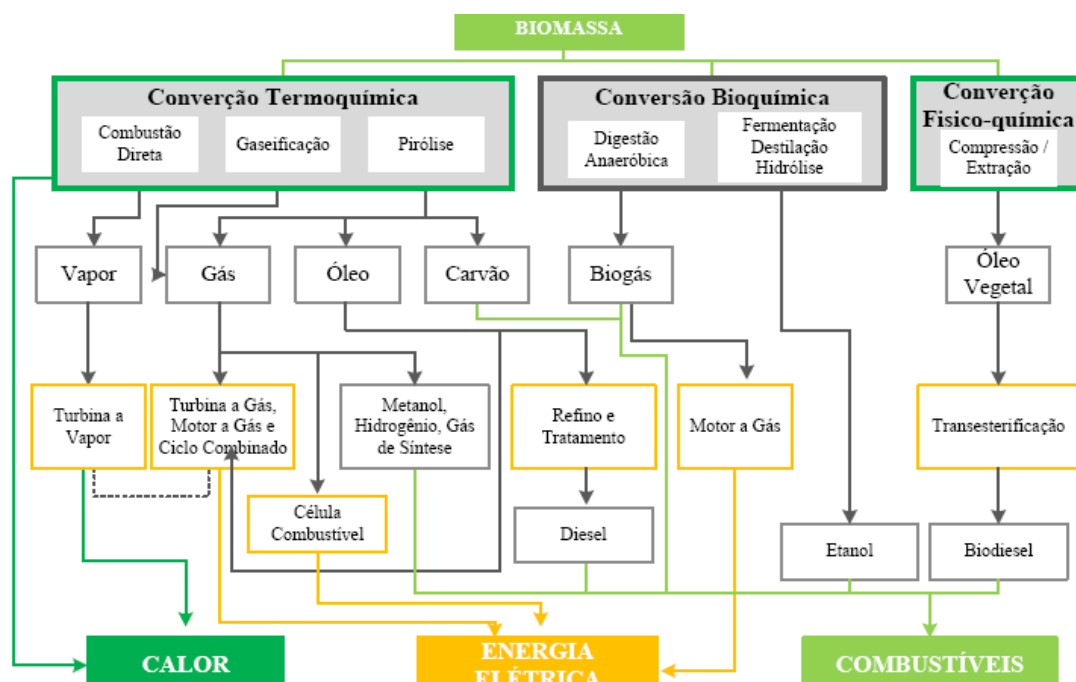


Figura 1 – Rotas de conversão da biomassa (Adaptado de Larkin et al. 2004).

### *1.2.3 Variáveis que afetam a gaseificação da biomassa*

Existem algumas variáveis que afetam a taxa de gaseificação de biomassa. Segundo Kirubakaran et al. (2009), o tamanho das partículas influencia na transferência de calor porque quanto maior o tamanho das partículas maior é a taxa de transferência. A forma estrutural da gaseificação da biomassa afeta a taxa e a composição do gás produzido. Por esta razão, torna-se necessário sua melhoria, através de processos de peletização e, conseqüentemente, o consumo de energia desses estágios reduz a eficiência líquida do processo de gaseificação.

Além disso, a porosidade afeta a difusão do reagente, pois quanto maior a porosidade, maior a área de superfície para a reação. Isso garante que todas as partes da biomassa venham a reagir e produzir um gás de composição uniforme. Um ambiente reativo, por sua vez, garante a completa gaseificação de biomassa. Da mesma forma, uma temperatura acima de 500 °C garante uma gaseificação completa, quando o ar é usado como agente oxidante. Alguns tipos de biomassa contêm cinzas, compostas principalmente de óxidos de metais, que mesmo em baixas concentrações aceleram a gaseificação (Kirubakaran et al. 2009).

## **2. GASEIFICAÇÃO INTEGRADA DA BIOMASSA A UM CICLO COMBINADO**

Uma forma atraente, prática e eficiente para aproveitar a biomassa como fonte de energia é através de um ciclo combinado. Os elementos básicos de uma usina BIGCC, conforme mostra a Figura 2, incluem um secador de biomassa, um gaseificador, no qual a biomassa é convertida em gás combustível (syngas), um sistema de tratamento de gases, onde são removidos todos os contaminantes que possam conter o gás.

Também apresentam na sua estrutura uma turbina a gás conectada a um gerador que é alimentado dos gases produzidos na gaseificação, um gerador de vapor que utiliza o calor residual dos gases de exaustão da turbina a gás e uma turbina a vapor acoplada a um gerador para produzir eletricidade adicional.

Como resultado da combinação das turbinas tem-se dois ciclos de geração de potência em um, tornando os sistemas BIGCC uma tecnologia altamente eficiente, baseado em um combustível limpo e renovável. A integração da gaseificação, combustão e recuperação de calor residual garante uma elevada eficiência de conversão, com eficiências líquidas da ordem de 40 a 50% para uma usina de 30-60 MW de capacidade (Champagne, 2008).

Para sistemas de pequena escala são utilizados normalmente gaseificadores de leito fixo com aquecimento direto, associados a motores de combustão interna para geração de potência. Em sistemas de grande escala prefere-se, o leito fluidizado porque permite utilizar diferentes configurações.

Além disso, os gaseificadores de leito fluidizado têm maior capacidade de produção se comparados aos de leito fixo. Também permitem a utilização de matérias-primas de baixa densidade, como resíduos agrícolas não compactados. Esta capacidade de trabalhar com uma grande variedade de biomassas com o mínimo de pré-processamento do gás produzido torna os gaseificadores de leito fluidizado a tecnologia a ser escolhida para muitas biomassas (Williams e Larson, 1996).

A Tabela 3 descreve as principais configurações disponíveis para gaseificadores aplicados aos sistemas BIGCC e mostra um comparativo entre essas configurações (Larson et al. 2001).

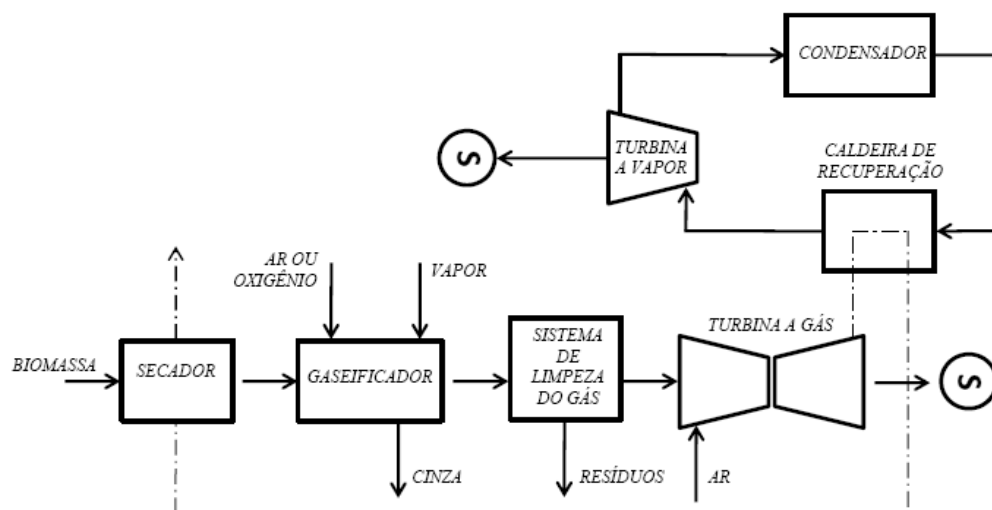


Figura 2 – Diagrama de blocos do processo gaseificação integrada da biomassa num ciclo combinado.

A partir da escolha da tecnologia de gaseificação, as principais relações de "trade-off" envolvidas no projeto e comercialização dos sistemas BIGCC referem-se a: gaseificação atmosférica ou pressurizada, sistema de limpeza quente ou frio, adaptabilidade das turbinas a gás existentes no mercado e integração entre o secador, os equipamentos de processamento do gás e as turbomáquinas (Consonni e Larson, 1996).

A gaseificação pressurizada irá produzir um gás adequado para ser aplicado diretamente em uma turbina a gás, aumentando a eficiência global do sistema (Turn et al. 2002).

Contudo, a fim de tirar proveito dessa pressurização, diversos equipamentos auxiliares devem ser desenvolvidos. Sistemas de alimentação de biomassa a alta pressão ainda não comprovaram a sua confiabilidade comercialmente (Bain et al. 1998).

Tabela 3 – Comparativo entre as diferentes configurações do sistema BIGCC

Tipo do Gaseificador	Vantagens	Desvantagens
Atmosférico, com aquecimento direto (ar)	Fácil alimentação do combustível, Sistema convencional de limpeza do gás, Apropriado economicamente para usinas de modestas capacidades.	Água residual gerada durante a limpeza do gás, Necessidade de um compressor para o gás produzido, aumentando o custo e diminuindo a eficiência, Limitado economicamente a usinas de modestas capacidades.
Atmosférico, com aquecimento indireto	Fácil alimentação do combustível, Sistema convencional de limpeza do gás, Apropriado economicamente para usinas de modestas capacidades, Gás com maior poder calorífico.	Água residual gerada durante a limpeza do gás, Necessidade de um compressor para o gás produzido, porém menor que o da primeira configuração, Limitado economicamente a usinas de modestas capacidades, Operação mais complexa.
Pressurizado, com aquecimento direto (ar)	Mais eficiente, não necessita de um compressor do gás produzido, Sistema de limpeza a quente, sem uso de água, Apropriado economicamente para usinas de grandes capacidades.	Dificuldades relacionadas à alimentação do combustível, Maiores desafios tecnológicos para limpeza do gás, Maior emissão de NOx, Limitado economicamente a usinas de grandes capacidades.

### **3. EXPERIÊNCIA DE ALGUMAS DAS CENTRAIS BIGCC NO MUNDO**

Os sistemas BIGCC encontram-se num estágio demonstrativo pré-comercial. As turbinas a gás apresentam algumas vantagens na eficiência térmica e nos custos de capital, os quais sofrem menos impacto com relação à variação de escala, quando aplicadas a sistemas BIGCC (Brown et al. 2009).

Segundo Rossilo-Calle (2005), o aumento de escala além de propiciar uma melhora na eficiência do processo contribui para uma redução nos custos unitários de capital. Na Tabela 4 são apresentados os principais projetos de demonstração desta tecnologia. No sistema BICC a biomassa é gaseificada e o gás produzido após sua limpeza é injetado na câmara de combustão de uma turbina a gás. As turbinas são projetadas para operar com gás natural cujo poder calorífico é superior ao gás produzido na gaseificação da biomassa, por esse motivo as turbinas devem ser modificadas para se adequarem ao gás produzido a partir da biomassa.

#### **3.1 Projeto Clean Hydrogen-rich Synthesis Gas (CHRISGAS)**

CHRISGAS faz referencia à central de demonstração mais representativa desta tecnologia, que tem como objetivo a produção de um gás de síntese caracterizado por seu alto teor de hidrogênio para ser usado na produção de combustíveis para o setor de transportes. Este projeto está sendo desenvolvido com a direção do centro de gaseificação da biomassa da Universidade de Växjö, através da planta de gaseificação de Värnamo, localizada na Suécia. Também o projeto conta com o apoio financeiro da Comunidade Econômica Européia e a participação de pesquisadores e cientistas de diferentes instituições Européias

### **4. AVALIAÇÃO DA USINA IGCC**

A planta de Värnamo foi o primeiro sistema BIGCC a entrar em funcionamento, operando entre 1996 e 1999 por quase 4000 horas. Esta planta pode ser considerada a experiência mais bem sucedida para a demonstração da tecnologia BIGCC.

Tabela 4. Principais projetos demonstrativos da tecnologia BIG – GT (Adaptado de Rossilo-Cale et al. 2005)

Projeto e Localização	Processo de gaseificação	Tecnologia de Gaseificação	Tipo de Biomassa	Ciclo de Potência	Eficiência (%) (PCS)	Capacidade	Status
Burlington, Vermont, EUA	Aquecimento indireto, baixa pressão, injeção de vapor	FERCO/Batelle	Madeira	Turbina gás	30-35	12-15 MW e 42 MW (gaseificador)	Comercial, co-firing agora e GT depois
PDB-Projeto de Demonstração Brasileiro Mucuri, BA, Brasil	Aquecimento direto, injeção de ar, atmosférica, leito fluidizado circulante	TPS	Cavaco de madeira (eucalipto)	Ciclo combinado baseado em GE LM 2500	37	32 MWe	Comercial a ser construído
Energy Farm, Bioelettrica S. p. A, Cascina Itália	Aquecimento direto, injeção de ar, atmosférica, leito fluidizado circulante	Lurgi	Cavaco de madeira e resíduos agrícolas	Ciclo combinado baseado em PGT 10 B	32	12.1 MW	Demonstrativo, planejada para 2000, projeto interrompido
Mvap, Alfagas, Minnessota, EUA	Aquecimento direto, injeção de ar, pressurizado, leito fluidizado borbulhante	Kvaerner/Carbana baseado em IGT Renugas	Talos de alfafa	Ciclo combinado baseado em TG Westing House	40,2	75 MWe	Comercial, projeto interrompido
Sydkraft AB, Värnamo, Suécia	Aquecimento direto, injeção de ar, pressurizado, leito fluidizado	Bioflow/Foster Wheller Energy Int.	Resíduos e cavacos de madeira	Ciclo combinado	32(eletricidade) 83 (cogeração)	18 MW	Fase I: Entre 1996 e 1999, Fase II: 2010

Depois de algum tempo desativada será reconstruída através do projeto CHRISGAS que se iniciou em 2004, com projeção de término para 2010. Os objetivos principais deste projeto são testar novos sistemas de secagem e alimentação, avaliar filtros, catalisadores, sistemas de limpeza do gás, entre outros. Além de conduzir testes de gaseificação e obter dados operacionais com uma vazão de biomassa de 3-4 t/h. Na Figura 3 apresenta-se o diagrama da usina com as modificações propostas (Projeto CHRISGAS).

Esta central tem uma capacidade líquida de 18 MW. A tecnologia da gaseificação utilizada na usina foi desenvolvida pela Foster Wheller em parceria com a Bioflow e utiliza um gaseificador tipo leito fluidizado circulante, usando ar como agente oxidante. Esta usina dispõe também de uma caldeira de recuperação de calor, usada para recobrar o calor dos gases de exaustão da turbina e para o resfriamento do gás de síntese resultante.

#### 4.1 Simulação do processo de gaseificação com o software CSFBM

Atualmente, existem diversos softwares disponíveis para simulação de processos químicos, mas foi utilizado o software CSFBM, em função de seu banco de dados que contém os



principais componentes para a simulação de um gaseificador. O CSFMB é um programa de simulação baseado em modelos matemáticos para a análise de leitos fluidizados borbulhante ou circulante, bem como para equipamentos de leito móvel updraft e downdraft. Entre esses equipamentos, encontram-se fornos, caldeiras, gaseificadores, secadores e reatores (De Souza, 2009).

A Tabela 5 lista os principais parâmetros necessários pelo software CSFMB para a simulação do processo da gaseificação. Onde os valores representam as condições necessárias para atingir a potência requerida pelo ciclo combinado.

Tabela 5 – Principais características do gaseificador gerado pelo software CSFMB.

Parâmetros	Variável	Valor	Unidades
<b>CARACTERIZAÇÃO DE FLUXOS SÓLIDOS E DO COMBUSTÍVEL ALIMENTAÇÃO</b>			
Densidade aparente de partícula	ROPES (1)	720	kg/m <sup>3</sup>
Densidade real de partícula	RORES (1)	1400	kg/m <sup>3</sup>
Vazão de injeção da biomassa	FMES (1)	1,1	kg/s
Temperatura de injeção do combustível	TPES (1)	298	K
<b>DADOS EQUIPAMENTO GEOMETRIA BÁSICA</b>			
<b>Gaseificador</b>			
Diâmetro equivalente da zona densa	DD	0,45	m
Diâmetro equivalente da zona diluída	DF	0,45	m
Altura do gaseificador	ZF	6,0	m
Ponto de injeção da biomassa	ZFEED (1)	0,70	m
<b>Distribuidor</b>			
Número de orifícios no distribuidor	NOD	150	-
Diâmetro dos orifícios	DOD	0,002	m
<b>CICLONE E RECIRCULAÇÃO</b>			
Diâmetro do ciclone	DCY	0,287	m
Altura da seção cilíndrica do ciclone	HCY	0,364	m
Altura da seção cônica do ciclone	HCYC	0,405	m
Posição do ponto de recirculação	ZRCY	0,70	m
<b>CARACTERIZAÇÃO DE FLUXOS DE GÁS ATRAVÉS DO DISTRIBUIDOR</b>			
<b>Agente de gaseificação</b>			
Temperatura de injeção	TEGID	435	K
Pressão de injeção	PEGID	120	kPa (abs.)
Outros Dados	POPER	105	kPa (abs.)
Pressão média no equipamento			
Condições ambientais locais			
AVG	TAMB	290	K
Velocidade do vento	VV	2	m/s

A simulação do processo de gaseificação foi realizada empregando o bagaço como combustível, este foi caracterizado na Tabela 2. O tipo de gaseificador de leito fluidizado circulante utilizando ar como agente de gaseificação foi escolhido neste processo para ser usado como base nas simulações no software CSFMB. A Tabela 6 mostra a porcentagem dos principais compostos do gás de síntese.

Tabela 6 – Composição do gás de síntese e eficiência do gaseificador

CO <sub>2</sub>	24,78
CO	22,62
CH <sub>4</sub>	4,02
H <sub>2</sub>	2,73
N <sub>2</sub>	45,18
HHV (MJ/kg)	5,86
Eficiência quente do equipamento (%)	93,45
Eficiência a frio do equipamento (%)	69,38

#### 4.2 Simulação do ciclo combinado com o software GateCycle

Neste trabalho, a simulação do ciclo combinado foi realizada usando um modelo desenvolvido no software GateCycle, conforme apresentado na Figura 4. Este modelo está caracterizado pela integração dos ciclos termodinâmicos, Brayton e Rankine, o primeiro deles descreve o funcionamento da turbina a gás (ciclo de potencia) e o segundo descreve um modelo de vapor operando um motor térmico que converte calor em trabalho (ciclo de vapor).

A simulação no GateCycle foi considerada em regime estacionário. Considerou-se somente o sistema BIGCC baseado nos resultados do processo da gaseificação, onde a operação da turbina a gás LM2500 da General Electric, utiliza somente o gás limpo obtido após a gaseificação do bagaço. Supõe-se sempre que o sistema de limpeza garante a qualidade do gás, em termos de particulados e álcalis metálicos. Este tipo de turbinas a gás foi testada com sucesso, para a operação no projeto demonstrativo WBP/SIGAME, com poder calorífico do gás variando na faixa entre 5,6 e 8,4 MJ / Nm<sup>3</sup> (Hughes e Larson, 1998).

O modelo implementado utilizou dois fluxos de gás de síntese, os quais foram utilizados no bloco de recuperação de calor do syngas e para considerar a alimentação da turbinas a gás. A temperatura, a pressão, a composição do gás de síntese limpo, e o fluxo de massa representam os parâmetros iniciais dos equipamentos (da turbina a gás), posteriormente os gases de combustão vão para os trocadores de calor da caldeira de recuperação, para a produção de vapor em 2 níveis de pressão. A energia elétrica gerada e a eficiência do ciclo combinado, foram utilizados para validar as simulações termodinâmicas.

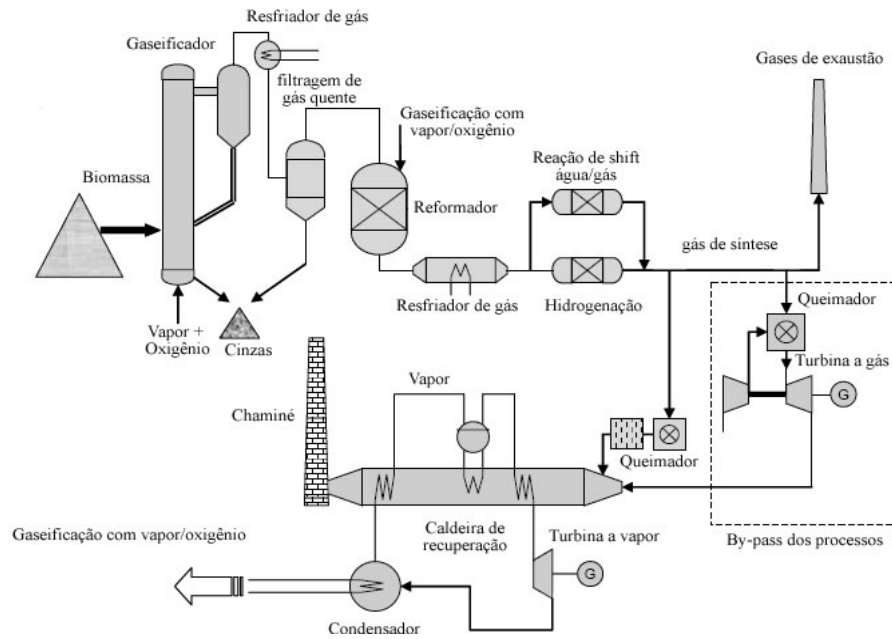


Figura 3 – Diagrama do processo da planta BIGCC de Värnamo, com as modificações propostas.

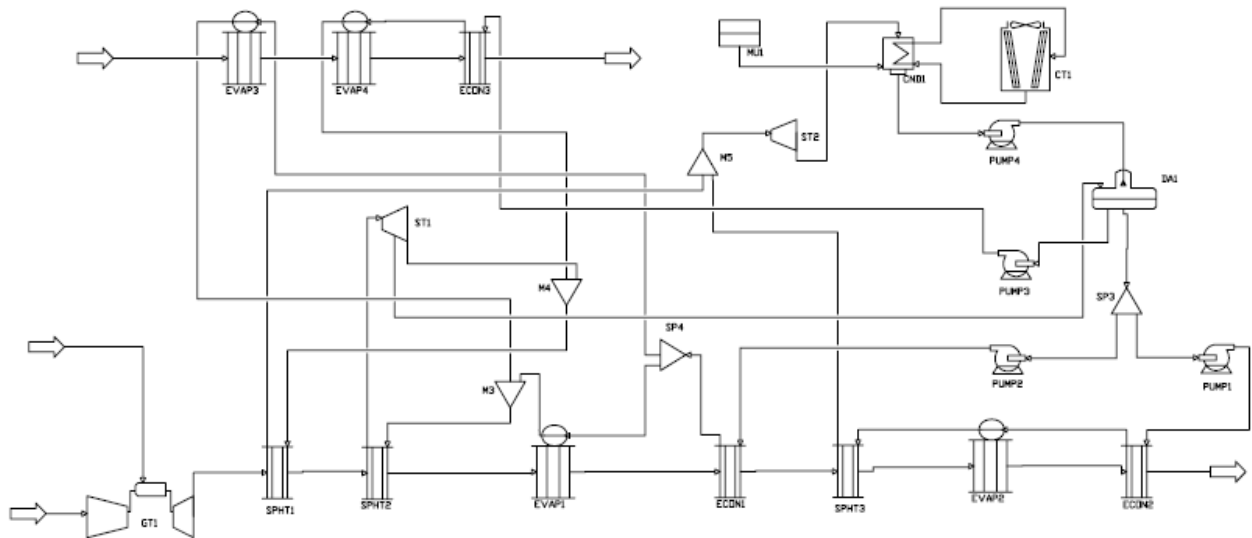


Figura 4 – Modelo desenvolvido no GateCycle

Na Tabela 7 são apresentados os resultados obtidos na simulação considerando as condições ISO. O gás de exaustão da turbina a gás é utilizado para a geração de vapor numa caldeira de recuperação. A temperatura do vapor é função tanto da temperatura de saída dos gases da turbina como da temperatura de aproximação no superaquecedor, a qual foi considerada de 25 °C.

Tabela 7 – Resultados obtidos na simulação do sistema BIGCC utilizando o GateCycle.

Operação da turbina a gás	
PCI, (MJ/kg)	5,86
Razões de pressões	15,04
Temperatura de entrada à TG, (°C)	1100
Temperatura de saída à TG, (°C)	765
Eficiência, (%)	37,98
Operação do bloco BIGCC	
Potência elétrica bruta, (MW)	19,15
Potência elétrica líquida, (MW)	17,03
Eficiência, (%)	30

## 5. CUSTOS DE PRODUÇÃO EM SISTEMAS BIGCC

Diversas pesquisas buscaram avaliar a viabilidade econômica do uso de sistemas BIGCC em usinas sucroalcooleiras (Neto, 2001; Rodrigues et al. 2003; Hassuani et al. 2005). Nesses trabalhos foram determinados valores de investimento para a instalação, variando entre R\$ 2500 (US\$ 1430) e R\$ 4650/kWinst (US\$ 2650).

Momentaneamente, a maioria dos projetos demonstrativos enfrentam dificuldades de financiamento devido aos elevados custos de capital para a implementação da primeira geração dessa tecnologia, quando comparados, por exemplo, com os custos iniciais de usinas termelétricas convencionais operando com combustíveis fósseis. Os investimentos para a primeira geração de sistemas BIGCC devem ficar na ordem de US\$ 2000 – 4000/kW.

Algumas empresas de consultoria prevêem que os custos de capital das primeiras unidades comerciais da ordem de 30 MW elétricos devem ficar em torno de US\$ 2700/kW (Walter et al. 2000).

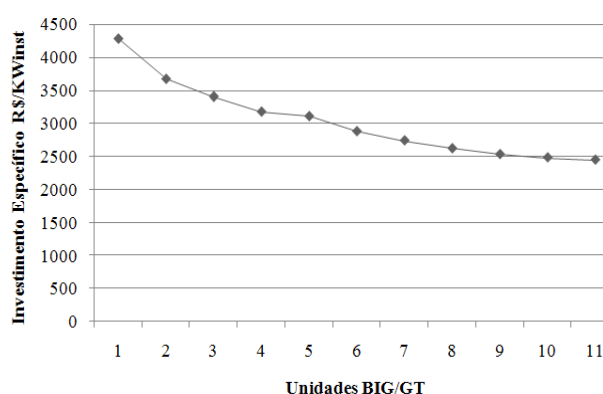


Figura 5 – Cenários de maturação de sistemas BIGCC, tecnologia BIG/GT.

Como atualmente não há sistemas BIGCC em operação comercial, não existe uma efetiva base de dados para estabelecer custos a longo prazo.

Entretanto, estudos da Termiska Processer AB (TPS) avaliam que os custos de capital de uma usina BIGCC completa com capacidade de 55 MW elétricos podem chegar a US\$ 1400/kW (2445/kWinst) em função dos efeitos de aprendizado e dos avanços na tecnologia das turbinas a gás, conforme apresenta a Figura 5 (COPERSUCAR, 2002). Para ciclos

BIGCC na faixa de 25 a 30 MW elétricos, baseados em turbinas aero derivativas, os custos unitários de capital poderiam chegar a US\$ 1230 - 1420/kW, quando a tecnologia alcançasse escala comercial. Atingindo valores dessa ordem, e juntamente com níveis de eficiência de produção de energia elétrica na faixa de 45 – 50%, essa tecnologia teria condições de ser competitiva (Walter et al. 2000).

## 6. COGERAÇÃO NO SETOR SUCROALCOOLEIRO

A cogeração representa uma componente importante em programas de diversificação produtiva no setor sucroalcooleiro, conforme mostra a Figura 6. Estes programas podem incluir também a produção de alimento animal, compensados, furfural e outros subprodutos.

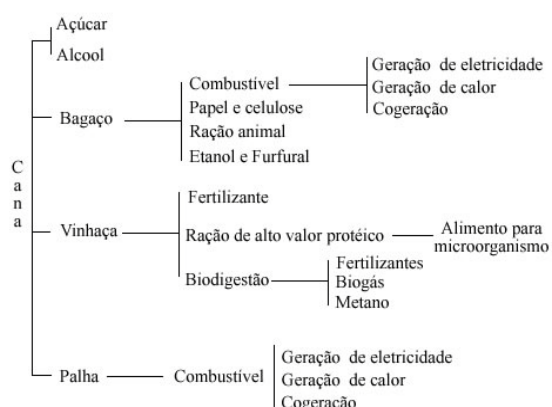


Figura 6 – Aproveitamento de produtos e subprodutos da cana-de-açúcar.

No Brasil, o Centro de Tecnologia Canavieira iniciou desde 1998, o desenvolvimento de um projeto para mostrar a viabilidade de um sistema BIGCC utilizando bagaço, pontas e folhas de cana. Testes para a gaseificação desses materiais foram feitos, mas a operação da usina BIGCC não foi realizada (Hassuani et al. 2005).

O projeto SIGAME, Sistema de Gaseificação Integrada de Madeira para Geração de Eletricidade, conhecido como BDP (Brazilian Demonstration Project) previsto para implementar uma usina BIGCC com um sistema de gaseificação em leito fluidizado pressurizado, com capacidade de 32 MW elétricos utilizando madeira (chips de eucalipto) no estado da Bahia, já há alguns anos está parado, por encontrar dificuldades de financiamento (ANEEL, 2000). Os investimentos necessário para a construção da usina são da ordem de R\$4500/kWinst (Larson et al. 2001).

A implementação desta tecnologia no setor sucroalcooleiro apresenta as maiores gerações de eletricidade excedente, atingindo 200 kWh/tc em sistemas pressurizados. Tomando a safra 2008/09 como base, esses sistemas representam um potencial de 111 TWh/ano, ou seja, 25% da geração brasileira (Pellegrini, 2009). Em tecnologias mais avançadas de cogeração, é interessante notar que os sistemas supercríticos são mais atrativos economicamente que os sistemas BIGCC atmosféricos, mesmo sendo menos eficientes, isto devido aos elevados consumos internos, pois esta tecnologia requer uma maior

capacidade instalada para a geração de eletricidade excedente similar ao do sistema supercrítico.

No Brasil o estado de São Paulo é o maior produtor de cana de açúcar, neste estado praticamente todas as indústrias do setor sucroalcooleiro são auto-suficientes, pois produzem todo o vapor e eletricidade necessários ao processo (em média 500 kg/tc de vapor a 1,5 atm., 215 °C, de 15 – 23 kWh/tc de energia elétrica e 10 – 15 kWh/tc de energia mecânica para acionamento de moendas, picadores, e demais equipamentos do processo), em vista da enorme quantidade de bagaço gerado no processamento da cana. A quantidade de bagaço produzida no setor sucroalcooleiro é extraordinária (aprox. 30 % da cana moída, com um poder calorífico médio de 7,77 MJ/kg, com 50 % umidade).

Em geral admite-se 5 % de perdas na produção de bagaço e um excedente de 12 % na produção de etanol e 5 % na produção de açúcar (ANEEL, 2000). Praticamente em todos os casos em que o bagaço é usado como combustível, sua utilização é de forma ineficiente, através de caldeiras de baixa pressão e turbinas de contrapressão. Apesar de existirem outras possibilidades promissoras para sua utilização, como a hidrólise enzimática (Alvira et al. 2010), elas ainda não foram viabilizadas comercialmente e a utilização do bagaço é, de fato, como combustível para geração de eletricidade.

Em geral, nas usinas do setor sucroalcooleiro existentes, é necessário estudar qual configuração que melhor se adapta a condição de consumo de vapor, baseando esse estudo nos ganhos termodinâmicos possíveis de serem obtidos frente aos investimentos necessários. Esta relação deve ainda abordar a questão dos benefícios ambientais de se optar por usinas mais eficientes.

## **7. CONCLUSÕES**

A tecnologia BIGCC é a alternativa mais eficiente para a conversão de biomassa em eletricidade, sendo comparada com a tecnologia tradicional de produção de energia elétrica em ciclos a vapor. Esta pode ser viabilizada em larga escala, além de apresentar alta eficiência. O crescente interesse na utilização da biomassa, proveniente de resíduos industriais ou plantações energéticas, para a geração de eletricidade se justifica pelo seu potencial de redução das emissões de dióxido de carbono.

A utilização da biomassa para geração de eletricidade, conta ainda com outros benefícios potenciais, tais como, geração de empregos e rendas no campo e o aproveitamento de terras ociosas. Além de essas situações coincidirem com a disponibilidade sazonal da biomassa, e representar uma interessante opção tecnológica de melhora no setor sucroalcooleiro brasileiro.

A tecnologia BIGCC ainda não é comercial, seus custos iniciais ainda são elevados e a adaptação do ciclo de potência para o uso de gás da biomassa requer modificações nas turbinas a gás. Além disso, é necessário adotar estratégias de controle das turbinas a gás, que penalizam o desempenho do ciclo. Apesar dos estudos preliminares ainda se encontrarem na fase de desenvolvimento em alguns projetos de piloto são necessários avaliações mais aprofundadas dos resultados.

O sucesso dos projetos de piloto serão fundamentais para sua implementação no futuro desta tecnologia, isto porque, os crescentes aumentos da demanda de energia, junto a restrições ambientais, fazem com que o acréscimo da geração termelétrica seja uma das soluções indicadas em curto prazo.

Os resultados das simulações mostram que o software CSFBM e o GateCycle apresentam ferramentas computacionais adequadas para a avaliação técnica de um sistema BIGCC, utilizando no processo da gaseificação um gaseificador do tipo leito fluidizado circulante que emprega ar como agente oxidante, dado que o teor de partículas de alcatrão e do gás de síntese resultante é baixo para este sistema. Além disso, os dados resultantes mostram um interessante desempenho global das centrais BIGCC, quando utilizado o bagaço como combustível.

## 8. AGRADECIMENTOS

Ao apoio financeiro das seguintes entidades: CNPq: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, FAPEMIG: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais e CAPES: Coordenação de aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVIRA, P.; TOMÁS-PEJÓ, E.; BALLESTEROS, M.; NEGRO, M.J. "Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis". CIEMAT, Bioresource Tech. Spain, v.101, p. 4851–4861, 2010.

ANEEL, Agencia nacional de energia elétrica. "Medidas mitigadoras para a redução de emissões de gases de efeito estufa na geração termelétrica". Brasília, 2000.

BAIN, R. L.; OVEREND, R. P.; CRAIG, K. R. "Biomass-fired Power Generation". *Fuel Proc. Tec*, v. 54, n. 1-3, p. 1-16, 1998.

BROWN, D.; GASSNER, M.; FUCHINO T.; MARÉCHAL, F. "Thermo-economic analysis for the optimal conceptual design of biomass gasification energy conversion systems". *App. Thermal Eng.* v. 29, p. 2137–2152, 2009.

CONSONNI, S.; LARSON, E. D. "Biomass-Gasifier/Aeroderivative Gas Turbine Combined Cycles: Parts A – B". *J. Eng. for Gas Turbine and Power*, v. 118, p. 507-525, 1996.

COPERSUCAR, "Gaseificação: chegou a hora. II seminário internacional cana e energia". Brasil, 2002. [Online] Disponível em: <http://www.copersucar.com.br/>

CHAMPAGNE, P. "Biomass". Disponível em: Future Energy - Improved, Sustainable and Clean Options for Our Planet. Elsevier, 2008.

DE SOUZA SANTOS, M. "A new version of CSFB comprehensive simulator for fluidised bed equipment". *Fuel. Brazil*, v. 88, p. 826–833, 2009.

ECN. "Alkali deposits found in biomass power plants". NREL/TP-433-8142, p.82, 2010.

[Online] Disponível em: <http://www.ecn.nl/>

HASSUANI, S. J., LEAL, M. R. L. V.; MACEDO, I. C. "*Biomass Power Generation: Sugarcane Bagasse and Trash*". Piracicaba: UNDP, Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), p. 217, 2005.

HUGHES W. E. M., LARSON, E. D. "*Effect of the fuel moisture content on biomass-IGCC Performance*", Journal of engineering for gas turbine and power, vol. 120, p. 455-459, 1998.

KIRUBAKARAN, V.; SIVARA- MAKRISHNAN, V.; NALINI, R.; SEKAR, T.; PREMALATHA, M.; SUBRA- MANIAN, P. "*A review on gasification of biomass*". *Renew. Sustain Energy Rev*, v. 13, p. 179-186, 2009.

NETO, V. C. "*Análise de Viabilidade da Cogeração de Energia Elétrica em Ciclo Combinado com Gaseificação de Biomassa*". Dissertação COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2001.

LARSON, E. D.; WILLIAMS, R. H.; LEAL, M. R. L. V. "*A Review of BIG-GT Combined Cycle Technology and its Application in Sugarcane Industries, with an Analysis for Cuba*". *Energy for Sust. Dev.*, v. 5, n. 1, p. 54-75, 2001.

LARKIN, S., RAMAGE, J., SCURLOCK, J. "*Bioenergy in Boyle, G. Renewable Energy: Power for a Sustainable Future*", 2nd ed. Oxford: Oxford University Press, 2004.

PELLEGRINI, L. F.; OLIVEIRA, S. J.; BURBANO. J. C. "*Supercritical steam cycles and biomass integrated gasification combined cycles for sugarcane mills*". *Energy*, 2009.

Processo CHRISGAS."Clean Hydrogen-rich Synthesis Gas", 2010. [Online] Disponível em: <http://www.chrisgas.com/>

RAO, A. D. "*Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC): Coal- and Biomass-Based*". Disponível em: Encyclopedia of energy engineering and technology. Boca Raton, FL. CRC Press, 2007.

RODRIGUES, M.; WALTER, A.; FAAIJ, A. "*Techno-economic Analysis of Co-fired BIGCC Systems with Inclusion of Economies of Scale*". *Energy*, v. 28, p. 1129-1258, 2003.

ROSILLO-CALLE, F., BAJAY, S. V., ROTHMAN, H. "*Uso da Biomassa Para Produção de Energia na Indústria Brasileira*". Ed.Unicamp, 2005.

TURN, S. Q.; BAIN, R. L.; KINOSHITA, C. M. "*Biomass Gasification for Combined Heat and Power in the Cane Sugar Industry*". *Int. Sugar J*, v. 104, p. 268-273, 2002.

TRAVERSO, A. "*Biomass*". Disponível em: *Encyclopedia of energy engineering and technology*. Boca Raton, FL. CRC Press, 2007.

WALTER, A. "*Simulation of Gas Turbines Operating in Off-Design Condition*". In: International Conference on ECOS, 2000, Enschede. v. 1. p. 457-467, 2000.



WILLIAMS, R. H.; LARSON, E. D. "Biomass Gasifier Gas Turbine Power Generating Technology". Biomass and Bioenergy, v. 10, n. 2-3, p. 149-166, 1996.

WCI, WORLD COAL INSTITUTE. "*Coal: delivering sustainable development*", 2009. [Online]  
Disponível em: <http://www.worldcoal.org/>