

Uma análise da biomassa como fonte de energia elétrica e investigação de suas tecnologias

COSTA, Bruno Perpétuo
ALTOÉ, Leandra

Resumo

No decorrer do século XX, tornaram-se cada vez mais evidentes os impactos do uso desenfreado de recursos naturais para a produção de energia. Com a crescente preocupação com o meio-ambiente, surgiram discussões sobre a necessidade de se desenvolver novas formas de geração, que sejam sustentáveis, mais limpas e que auxiliem na diversificação da matriz energética dos países. Assim, propôs-se investigar as rotas de conversão e as tecnologias empregadas para geração de energia elétrica a partir da biomassa. Foram apresentados os principais processos para geração de eletricidade, em especial, aqueles empregados nos setores sucroalcooleiro e de papel e celulose, os quais são os dois setores que mais se beneficiem da bioenergia no Brasil. Verificou-se que há notável variedade de tecnologias para transformação da biomassa, desde processos mais simples, como a queima direta e a pirólise, até tecnologias mais complexas, como a gaseificação, esta última superior as demais em termos de eficiência. Ainda assim, há dificuldades para aumentar a utilização dos processos de gaseificação em ciclos combinados, seja para a indústria de papel e celulose ou para a indústria sucroalcooleira, dadas as incertezas sobre os custos atrelados a esta tecnologia, ainda que comprovada sua eficácia.

Palavras-chave: Fontes renováveis de energia; Biomassa; Rotas tecnológicas; Indústria de papel e celulose; Indústria sucroalcooleira.

Abstract

During the 20th century, the impacts of the unbridled use of natural resources for energy production became increasingly evident. With the growing concern with the environment, discussions arose about the need to develop new forms of generation, which are sustainable, cleaner and which help to diversify the energy matrix of countries. Thus, it was proposed to investigate the conversion routes and technologies used to generate electricity from biomass. The main processes for generating electricity were presented, especially those employed in the sugar-alcohol and paper and cellulose sectors, which are the two sectors that most benefit from bioenergy in Brazil. It was found that there is a remarkable variety of technologies for transforming of biomass, from simpler processes, such as direct burning and pyrolysis, to more complex technologies, such as gasification, the latter superior to the others in terms of efficiency. Even so, there are difficulties in increasing the use of gasification processes in combined cycles, whether for the pulp and paper industry or for the sugar and alcohol industry, given the uncertainties about the costs associated with this technology, even though its effectiveness has been proven.

Keywords: Renewable sources of energy; Biomass; Technological routes; Pulp and paper industry; Sugar and alcohol industry.

Resumen

Durante el siglo XX, los impactos del uso desenfrenado de los recursos naturales para la producción de energía se hicieron cada vez más evidentes. Con la creciente preocupación por el medio ambiente, surgieron discusiones sobre la necesidad de desarrollar nuevas formas de generación, que sean sostenibles, más limpias y que ayuden a diversificar la matriz energética de los países. Por lo tanto, se propuso

investigar las rutas de conversión y las tecnologías utilizadas para generar electricidad a partir de biomasa. Se presentaron los principales procesos para la generación de energía eléctrica, especialmente los utilizados en los sectores azúcar y alcohol y papel y celulosa, que son los dos sectores que más se benefician de la bioenergía en Brasil. Se encontró que existe una notable variedad de tecnologías para la transformación de biomasa, desde procesos más simples, como la quema directa y el pirólisis, hasta tecnologías más complejas, como la gasificación, esta última superior a las demás en términos de eficiencia. Todavía así, existen dificultades para aumentar el uso de procesos de gasificación en ciclos combinados, ya sea para la industria de la celulosa y el papel o para la industria del azúcar y el alcohol, dadas las incertidumbres sobre los costos asociados a esta tecnología, aunque su eficacia está demostrada.

Palabras clave: Fuentes renovables de energía; Biomasa; Rutas tecnológicas; Industria de la pulpa y el papel; Industria del azúcar y alcohol.

INTRODUÇÃO

Historicamente, a evolução humana sempre esteve atrelada ao dispêndio de diversas formas de energia. Desde a primeira revolução industrial, com a invenção de máquinas a vapor, as transformações de uma forma de energia em outra guiaram o curso do desenvolvimento mundial. Nos anos seguintes, a geração de vapor foi integrada à geração de movimento que, posteriormente, foi empregada na produção de uma nova forma de energia, a energia elétrica. A partir desse momento, o uso de eletricidade se expandiu e, com isso, gerou avanços e melhorias expressivas para a qualidade de vida da população mundial, aprimorando necessidades básicas como as de alimentação, segurança e movimentação.

Com o passar do tempo, tornaram-se cada vez mais evidentes os impactos do consumo acelerado dos recursos naturais para produção de energia, uma vez que a maior parte das matérias-primas empregadas na produção em grande escala são provenientes de reservas finitas. Essas limitações, assim como o surgimento de legislações ambientais restritivas e a preocupação crescente com o meio-ambiente, evidenciaram a discussão sobre a necessidade de se desenvolver novas formas de geração, que sejam sustentáveis, mais limpas e que auxiliem na diversificação da matriz energética de um país, evitando, também, a dependência de uma só forma de produção (SHAHBAZ et al., 2020).

Dentre as fontes de energia renovável, pode-se destacar a solar, a eólica e da biomassa. Neste âmbito, a biomassa vem despontando como uma alternativa viável para produção de energia por diferentes rotas de conversão energética, sendo essa flexível o suficiente para ser empregada energeticamente tanto na geração de energia elétrica e térmica, quanto para alimentar o setor de transportes (CORTEZ et al., 2008). Uma denominação utilizada para englobar toda a biomassa energética lignocelulósica e seus subprodutos, de modo geral, é a dendroenergia (SANTOS et al., 2016).

Segundo Fardin et al. (2018), dentro do contexto de transformação em eletricidade, a biomassa deve passar por processos de conversão adequados, sejam eles físico-químicos, bioquímicos ou termoquímicos e há diversas tecnologias para esse fim. A depender da rota tecnológica utilizada, a biomassa pode ser inserida em ciclos de geração de energia elétrica, como os ciclos a vapor ou os de turbina a gás. Se considerado ainda que a biomassa passível de conversão é, muitas vezes, resíduo de processos industriais, o seu emprego como fonte de energia elétrica torna-se ainda mais atrativo. Neste sentido, destacam-se as indústrias de papel e celulose e

a sucroalcooleira, cujos resíduos licor negro e bagaço de cana, respectivamente, apresentam notório potencial energético.

O presente trabalho tem por objetivo estudar as principais formas de biomassa passíveis de uso para geração de energia elétrica e as tecnologias empregadas para este fim. Para tanto, foi realizado um levantamento sobre a utilização da biomassa na geração de dendroenergia, de modo geral, contendo seus conceitos fundamentais, seus principais processos de conversão e seu emprego na produção de bioeletricidade. Posteriormente, foram analisados processos e sistemas industriais que usufruem deste tipo de geração, baseando-se nas indústrias de papel e celulose e sucroalcooleira.

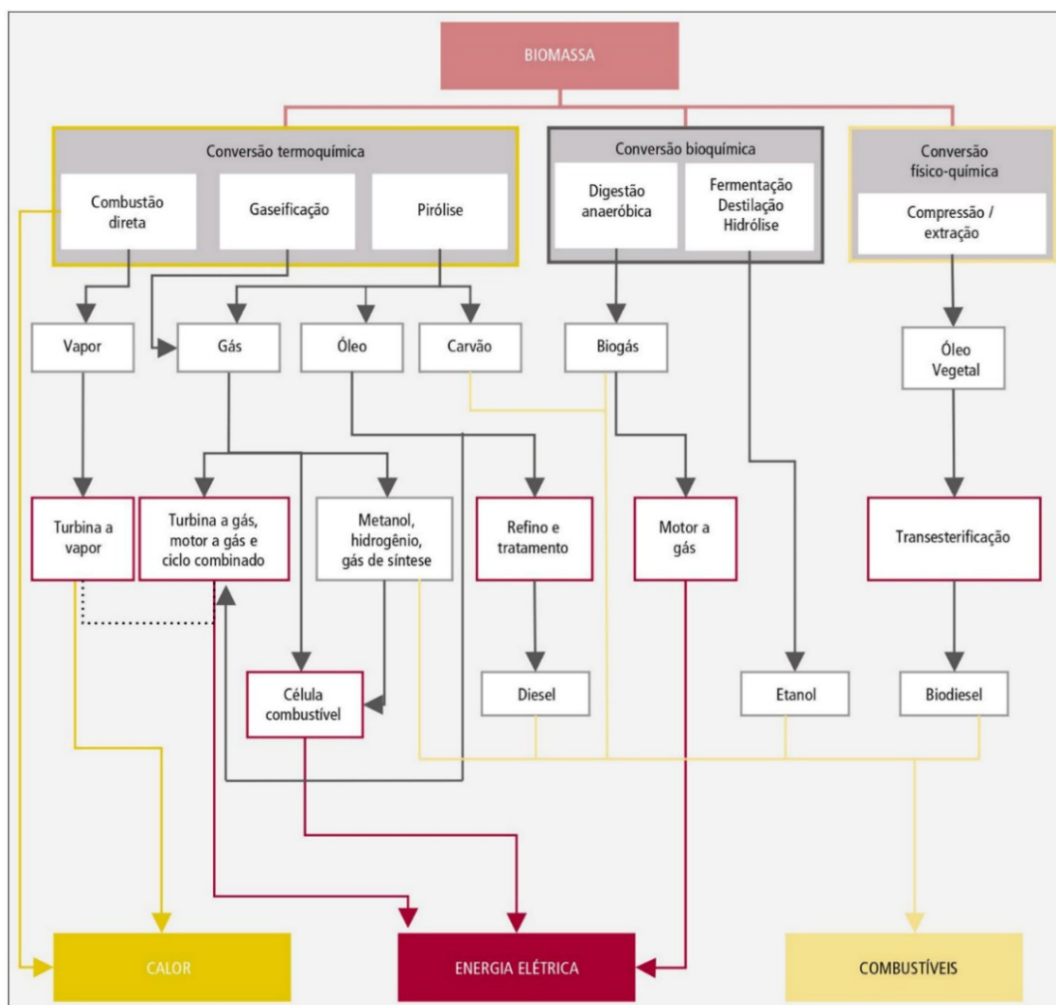
ROTAS DE CONVERSÃO ENERGÉTICA DA BIOMASSA

O termo biomassa é aquele empregado para caracterizar todo tipo de matéria orgânica, seja de origem vegetal ou animal, passível de transformação em energia (ANEEL, 2008). Seu processo de conversão é diversificado e, além da produção de energia (elétrica ou em forma de calor), é capaz de produzir outros subprodutos de valor comercial, tais como o etanol e o biodiesel. Essa fonte de energia pode ser obtida por meio da decomposição de diversos recursos vegetais, resíduos agrícolas e até mesmo urbanos (CHOUDHARY et al., 2020).

De acordo com Rodrigues et al. (2011), “a biomassa é um material bastante heterogêneo, em geral com alto teor de umidade, baixo poder calorífico e teor de carbono fixo, além da granulometria diversa. Para torná-la um combustível eficiente e competitivo, foram desenvolvidos vários processos para a homogeneização e a melhoria de suas propriedades energéticas”.

Uma vez conhecido o tipo de biomassa, é possível inseri-la em uma vasta gama de processos de conversão, estes capazes de gerar diversos produtos de valor comercial em rotas tecnológicas variadas. Alguns destes procedimentos já são consagrados e encontram ampla aplicação no cenário energético atual, enquanto outros ainda são objetos de estudo, sendo gradativamente estudada a sua viabilidade técnica e econômica. A fim de ser utilizada na geração de eletricidade, a biomassa deve ser transformada em um produto intermediário, após ser submetida a processos de conversão que podem ser termoquímicos, bioquímicos e físico-químicos (FARDIN et al., 2018), conforme indicado pela Figura 1.

Figura 1 – Rotas para conversão da biomassa



Fonte: Larkin et al. (2004) apud EPE (2007).

Dentre as principais rotas de conversão existentes, a mais amplamente empregada é a termoquímica, sendo esta composta pelos processos de gaseificação, pirólise e combustão direta (ZANONI; SCHAITZA, 2017), ou seja, neste tipo de conversão, a biomassa é transformada em calor por meio de procedimentos combustivos.

Na combustão direta, a biomassa é queimada em fornos, caldeiras ou fogões sendo a fonte de carbono necessária para reagir com o oxigênio fornecido gerando, assim, calor. Embora seja prático e/ou conveniente, tal processo é normalmente ineficiente (ANEEL, 2008). A combustão direta da madeira, por exemplo, é ainda amplamente empregada em países em desenvolvimento. Os vapores produzidos por esta técnica, ou pelo calor proveniente dela, é então utilizado em turbinas apropriadas para sua conversão em energia elétrica.

A pirólise, por sua vez, é a decomposição termoquímica da mesma na ausência de oxigênio, onde são produzidos sólidos (carvão vegetal), óleos e gases pirolíticos, sendo a fração destes produtos dependentes do tipo de biomassa, da temperatura de operação, assim como da taxa de aquecimento e do tempo de residência (PANG, 2019). O processo de pirólise mais comum, a carbonização, nada mais é que a transformação da biomassa em um produto intermediário com valor energético maior, neste caso, o carvão. Para este, a densidade energética é duas vezes maior que o material de origem, além de sua queima atingir temperaturas mais elevadas. Subprodutos de interesse também incluem gás combustível, alcatrão e ácido pirolenhoso (ANEEL, 2008). Como resultado desse processo, os produtos são obtidos em duas formas: sólida e gasosa. Uma parte da fração gasosa é condensada, formando, então, o alcatrão. Entretanto, algumas literaturas mencionam apenas os produtos voláteis (gasosos) e o carvão, denominando esse procedimento como desvolatilização de biomassa. De todo modo, a distinção dos produtos em três grupos é predominante (KACZOR et al., 2020).

Já a gaseificação é o nome dado às tecnologias nas quais biomassas sólidas são transformadas em gasosas em reações que envolvem quantidades de oxigênio ou ar inferiores ao mínimo necessário para que haja combustão. A conversão térmica da biomassa em gás combustível ocorre em altas temperaturas e o gás gerado no gaseificador – também chamada de gás de síntese ou *syngas* (*synthesis gas*), pode então ser queimado ou usado como combustível (SALES, 2007), seja em motores ou turbinas.

Para fins de geração de energia, as três rotas termoquímicas citadas mostram-se interessantes, uma vez que geram produtos passíveis de queima e consequente geração de vapor, usado na produção de energia ao serem inseridas em ciclos a vapor, havendo ainda uma gama de opções a serem consideradas no escopo da geração de eletricidade e seus rendimentos (TOLMASQUIM et al., 2016).

TECNOLOGIAS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DA BIOMASSA

Da utilização da biomassa para geração de energia elétrica, as rotas tecnológicas de melhor aproveitamento incluem sistemas em ciclos a vapor (nos quais são normalmente empregados combustíveis sólidos) e em turbinas a gás (sistemas estes que requerem combustíveis em fase líquida ou gasosos, com especificações físico-químicas adequadas) (CORTEZ et al., 2008).

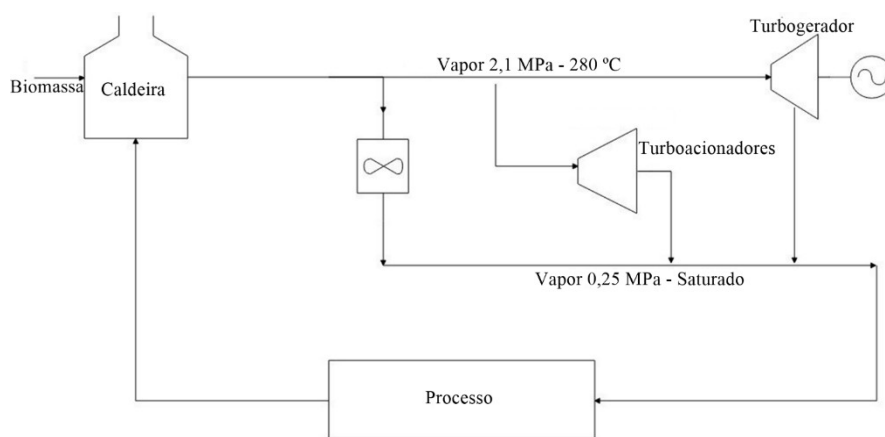
Atualmente, a rota de geração de energia elétrica de maior viabilidade é fundamentada em ciclos de vapor, onde a biomassa é queimada de modo a gerar calor e, este, é utilizado para

formação de vapor (FARDIN et al., 2018). Para esse tipo de transformação, utiliza-se geralmente biomassa em estado sólido, ainda que possam ser utilizados resíduos líquidos, tal como a lixívia negra, produto de importância para o setor de papel de celulose (CORTEZ et al., 2008). Sua viabilidade econômica, entretanto, é fortemente influenciada por fatores como a proximidade da fonte de biomassa com a planta de geração, custos de transporte e mão-de-obra, assim como os teores de umidade da matéria-prima a ser empregada (EPE, 2007).

O vapor pode ser utilizado em processos industriais para aquecimento e trabalho mecânico, assim como nos processos de geração termoelétrica, sendo que, para melhor rendimento e eficiência, é realizada a combinação de ambos em unidades de cogeração. As alternativas para geração de energia em ciclos a vapor são: o ciclo com turbinas de contrapressão (em sistemas de cogeração) e o ciclo com turbinas de condensação e extração (que podem ser empregados em sistemas de cogeração ou isoladamente) (TOLMASQUIM, 2004).

Nos ciclos a vapor com turbinas de contrapressão, a biomassa é primeiramente queimada em caldeiras e, em seguida, o vapor produzido é enviado para acionar turbinas de geração, conforme indicado na Figura 2. Características marcantes deste tipo de produção são o baixo desempenho energético e uma baixa capacidade de produção.

Figura 2 – Esquema de geração de energia elétrica por meio de ciclo de cogeração a vapor em contrapressão

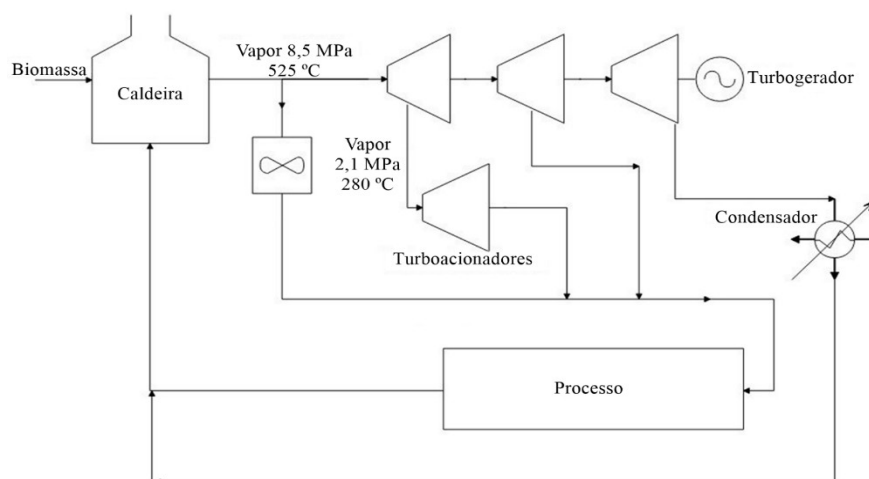


Fonte: Tolmasquim (2004) adaptado.

Já nos ciclos com turbinas de condensação e extração, como apresentado na Figura 3, o vapor que sai das turbinas é enviado a um condensador. O vapor quente a ser enviado ao processo produtivo (cogeração) é removido a um ponto intermediário da expansão, dentro da

própria turbina. Em contraste às turbinas de contrapressão, esse tipo de geração apresenta um ganho notável de eficiência e capacidade de produção (TOLMASQUIM, 2004).

Figura 3 – Esquema de geração de energia elétrica por meio de ciclo de cogeração em condensação e extração



Fonte: Tolmasquim (2004) adaptado.

Ainda é possível gerar energia elétrica a partir de turbinas a gás integradas à gaseificação. Mesmo que viável, as vias de gaseificação de biomassa ainda enfrentam alguns obstáculos como a falta de equipamentos que produzam gases com boa qualidade e que sejam versáteis em face aos vários combustíveis passíveis de serem utilizados no processo. Tais empecilhos dificultam a competitividade comercial dessa tecnologia (SALES, 2007). Para produção de energia elétrica, a partir dos gases do processo de gaseificação, são empregadas as chamadas turbinas a gás em ciclo aberto, ou turbinas de combustão. Tais equipamentos são máquinas movidas por reações de combustão interna, nelas a energia liberada pelo combustível é transferida ao fluido de trabalho de forma direta (sem necessidade do emprego de trocadores de calor), sendo os gases de exaustão despejados na atmosfera (EPE, 2007).

Assim como nos sistemas de geração elétrica em ciclos a vapor, de modo a engendrar real produtividade e eficiência ao processo de produção, os sistemas de geração compostos pela gaseificação da biomassa e sua inserção em turbinas a gás também são integrados a sistemas de cogeração. Como apresentado por Sales (2007), estes sistemas de cogeração são denominados de ciclos combinados e estão entre as tecnologias de maior rendimento térmico nas usinas termelétricas. Os procedimentos de cogeração em que se emprega a biomassa como fonte de

combustível são também tratados pela sigla BIG (*Biomass Integrated Gasification*), havendo ainda diferentes sistemas para sua utilização.

É possível ainda explicitar os quatro sistemas mais relevantes passíveis de aplicação na geração de energia por intermédio da gaseificação, são eles: BIG-GT (*Biomass Integrated Gasification Gas Turbine*), BIG-STIG (*Biomass Integrated Gasification Steam Injected Gas Turbine*), BIG-ISTIG (*Biomass Integrated Gasification Intercooled Steam Injected Gas Turbine*) e BIG-GTCC (*Biomass Integrated Gasification Gas Turbine Combined Cycle*) (SALES, 2007; PEDROSO et al., 2017). No Quadro 1, são apresentadas as principais características e os processos de geração inerentes a cada um dos procedimentos supracitados.

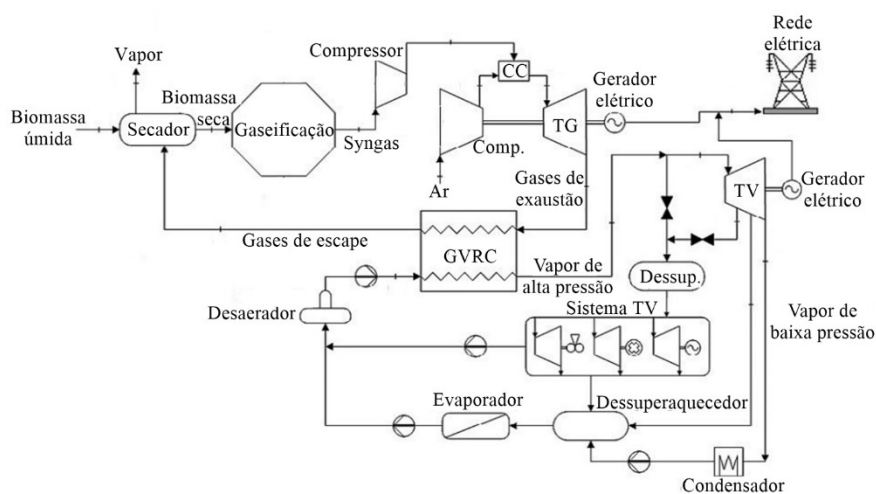
Quadro 1 - Características dos diferentes processos de geração de energia por turbinas a gás

Tipo	Características
BIG-GT	Trata-se de um sistema em ciclo simples, de menor eficiência e menor custo dentre os demais arranjos. O gás proveniente da biomassa gaseificada aciona uma turbina a gás para gerar energia elétrica. Quando empregado em processos de cogeração, faz-se necessário a utilização de um gerador de vapor (caldeira) para atender às necessidades térmicas.
BIG-STIG	É um aprimoramento dos processos de geração em ciclo simples, consiste na utilização de turbinas a gás aero derivativas, na qual emprega-se injeção de vapor no fluxo do fluido de trabalho e ainda resfriamento do ar na compressão, de modo a aumentar a potência da máquina e reduzir impactos ambientais. Em comparação ao ciclo simples, há um acréscimo de 52% de eficiência global e 30% de potência. Entretanto, nesta configuração, há degradação da turbina, caso não haja um complexo tratamento de água. Na ausência deste, pode-se inviabilizar a utilização deste sistema.
BIG-ISTIG	Em contraste ao BIG-STIG, neste há inserção de um resfriador para reduzir a temperatura do ar que está sendo comprimido para alimentar a combustão. Assim, ocorre uma redução da potência requerida para compressão, elevando a potência disponível na turbina e proporcionando o aumento da eficiência termodinâmica do ciclo. Esta configuração possui a mesma desvantagem que a BIG-STIG, pois necessidade de água de alta qualidade para operar.
BIG-GTCC	Se dá pela combinação de turbinas a gás e turbinas a vapor, ou seja, um ciclo combinado. A energia dos gases quentes, vindos da turbina a gás, seguem para uma caldeira para produzir o vapor utilizado como fluido de acionamento de uma turbina a vapor de condensação, para gerar trabalho adicional. Alcança altas eficiências globais para geração de energia elétrica.

Fonte: Prado (2007) adaptado.

Segundo Corrêa Neto (2001), “o acréscimo de potência alcançado em um ciclo combinado é, em geral, da ordem de 50% da potência da turbina a gás e a eficiência global passa da média de 30% do ciclo simples, e atinge valores em torno de 55% a 60% em ciclos combinados comerciais”. Desta forma, mostra-se como uma interessante configuração para geração de energia elétrica. Um esquema simplificado deste sistema é disposto na Figura 4.

Figura 4 – Esquema simplificado da geração de energia por sistema BIG-GTCC



Fonte: Pedroso et al. (2017) adaptado.

Em resumo, é possível perceber que as principais formas de se produzir energia elétrica por meio da biomassa são a sua queima em estado sólido ou seu emprego em turbinas de combustão. É válido lembrar que a biomassa sólida pode ser tanto a matéria bruta, que pode ser usada no processo termoquímico de combustão direta, tanto um produto de processos de pirólise. Já os combustíveis gasosos são adquiridos em processos de gaseificação e, em menores escalas, o biogás (produto de uma conversão biológica) também pode se mostrar uma alternativa interessante.

Se avaliadas as três principais formas de geração de energia supracitadas e levando em consideração parâmetros como a quantidade de vapor produzido em cada processo, a quantidade de energia elétrica gerada e a eficiência dos ciclos, é possível visualizar qual das técnicas se mostra mais eficaz. Tal comparação pode ser encontrada no Quadro 2.

Quadro 2 – Comparação de parâmetros das principais rotas de geração de energia elétrica

Parâmetro		Ciclos a vapor com turbinas de contrapressão	Ciclos a vapor com turbinas de condensação/extração	Integração de turbinas a gás nos ciclos de gaseificação
Geração de vapor	Produção de vapor (Kg vapor/ton. biomassa)	1.607	3.000	5.000
Geração de energia elétrica (kWh/ton. biomassa)	Cogeração	215	340	1.050
	Geração pura	-	530	1.150
	Eficiência das turbinas (%)	60	75	-
Eficiência da	Cogeração (%)	7	12,7	38

geração termelétrica	Geração pura (%)	-	20	42
	Potência instalada (MW)	50	100	150

Fonte: EPE (2007) adaptado.

Ao comparar os processos de geração em ciclos a vapor, é notável a superioridade das turbinas de condensação/extração. Nestas, além de uma maior produção de vapor por quantidade de biomassa inserida (benéfico, uma vez que o vapor ainda será enviado ao processo), ele também se mostra mais adaptável às necessidades individuais de geração, sendo que é capaz de gerar energia isoladamente, sem estar atrelado a cogeração. Contudo, a geração de energia em plantas com turbinas a gás integradas a ciclos de gaseificação se mostra ainda mais vantajosa, produzindo pouco mais que o triplo de KWh/(ton. de biomassa) em relação ao ciclo de vapor em condensação/extração em sistema de cogeração e pouco mais que o dobro em relação a mesma produzindo isoladamente.

Tais inferências podem ser confirmadas ao analisar dados da geração de bioeletricidade de setores específicos. Na indústria sucroalcooleira, a cogeração empregada na geração de vapor e eletricidade era geralmente baseada em ciclos com turbinas a contrapressão, nesta configuração, entretanto, não se produzia excedentes de energia elétrica para comercialização. Para que isso se tornasse possível, então, introduziram-se turbinas de condensação nos ciclos do vapor, permitindo-se, assim, um maior rendimento na geração (TOLMASQUIM et al., 2016). O bagaço de cana-de-açúcar, após secagem, também pode ser encaminhado à processos de gaseificação e este, por sua vez, integrado a turbinas a gás para produção de energia. Os parâmetros de geração de uma usina sucroalcooleira encontram-se dispostos no Quadro 3.

Quadro 3 – Comparação entre os parâmetros técnicos de geração em ciclos de vapor e BIG-GTCC em uma usina sucroalcooleira

Parâmetro	Ciclos de vapor com condensação e extração	Parâmetro	BIG-GTCC	
			Safra	Entressafra ¹
Produção de vapor	840 kg vapor / t cana	Consumo de combustível	0,93 82 t bagaço 50% / MWh	0,82 t bagaço 50% / MWh
Eficiência das turbinas	75%	Energia Excedente	254 kWh / t cana	343 kWh / t cana
Geração elétrica	150 kWh /t cana	Geração elétrica	302 kWh / t cana	343 kWh / t cana
Eficiência da geração elétrica	20%	Eficiência da geração elétrica	30%	34%

¹ Período em que não há a colheita da cana e a usina não produz açúcar e etanol.

Fonte: Tolmasquim et al. (2016) adaptado.

Os dados do Quadro 3 corroboram com as discussões anteriores, em que é possível visualizar que a geração elétrica, bem como a eficiência desta, é maior em rotas tecnológicas nas quais há a integração de turbinas a gás nos ciclos de gaseificação, mostrando-se uma via vantajosa no aspecto da geração de energia elétrica.

Em um panorama geral, a eletricidade gerada a partir da combustão direta da biomassa possui baixa eficiência, enquanto a geração por meio de turbinas a gás, em contraste, atinge eficiências mais altas. Entretanto, para se usufruir dessa vantagem, deve-se utilizar processos de gaseificação da biomassa (DANTAS et al., 2013).

Numerosos estudos sobre a integração da gaseificação da biomassa em ampla escala mostram que o calor do BIG-CC, junto a da produção de biocombustíveis, pode ser competitiva no futuro em sistemas de cogeração. Embora as emissões de dióxido de carbono possam ser reduzidas por meio da integração da biomassa a processos de gaseificação, ressalta-se que o custo ideal de investimento é altamente ligado aos preços dos combustíveis e da eletricidade comercializados no mercado (WETTERLUND et al., 2011).

É ainda possível salientar que a aplicação dos produtos de gaseificação na geração de energia são menos aplicados que a geração baseada em ciclos a vapor (que empregam combustão direta da biomassa ou dos produtos de pirólise) não por conta do rendimento das rotas, uma vez que essa se mostra maior, mas puramente atrelada a outros empecilhos, como: o custeio de um processo de gaseificação ser maior (procedimento mais sofisticado que requer instalação e manuseio adequado) e a falta de equipamentos que produzam gases com boa qualidade e com boa adaptabilidade aos diversos combustíveis que podem ser utilizados neste processo.

O USO DA BIOMASSA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA NOS SETORES DE PAPEL E CELULOSE E SUCROALCOOLEIRO

Dada às grandes produções agrícolas, pecuárias e florestais, o Brasil mostra-se um protagonista no âmbito da bioenergia. Segundo dados do Balanço Energético Nacional, a oferta interna de energia apresentou participação de aproximadamente 33,7% de biomassa em 2020, com destaque para derivados da cana de açúcar (19,1%) e lenha e carvão vegetal (8,9%), mas, ainda, lúxvia (3,3%), entre outros produtos (EPE, 2021).

A indústria de papel e celulose possui notável potencial para produção de energia elétrica por meio dos resíduos da própria planta química, por intermédio de processos de cogeração. Após adequação da matéria-prima lenhosa à granulometria requerida para processo, os cavacos de

madeira (biomassa florestal) são inseridos em um digestor sendo que, uma das saídas deste, é uma corrente residual chamada de licor ou lixívia negra. Esse rejeito processual é passível de conversão em um número amplo de produtos energéticos, tais como o gás natural sintético (GNS), dimetil éter, gás hidrogênio e metanol. Dentre as opções, o GNS mostra-se uma alternativa relevante para produção de eletricidade (NAQVI et al., 2017).

Com relação a indústria sucroalcooleira, a matéria-prima energética encontra-se na forma do bagaço de cana, tradicionalmente utilizado como combustível também em sistemas de cogeração, produzindo juntos eletricidade e vapor (energia térmica) a serem utilizados nos processos industriais da própria planta. Após serem adotadas medidas de redução do consumo de energia dentro dos próprios processos produtivos, assim como a implementação de tecnologias de cogeração mais eficientes, a quantidade de bioenergia produzida a partir do bagaço em indústrias de açúcar e álcool aumentou consideravelmente, a ponto de ser o suficiente para o uso interno e com excedente para comercialização (DANTAS et al., 2013).

De acordo com Machin (2015), durante a moagem de uma tonelada de cana-de-açúcar, são produzidos, em média, de 240 a 250 kg de bagaço de cana e, por meio da queima de 6,5 toneladas de bagaço, 1 MWh de energia são gerados em sistemas de cogeração. O emprego deste subproduto como combustível nas usinas sucroalcooleiras permite que essas sejam autossuficientes em termos de energia térmica e elétrica, algo pouco comum em outros setores industriais. E, segundo Moraes et al. (2017), nas usinas produtoras de álcool e açúcar, 90% do bagaço disponível é utilizado para este fim, sendo mais recentemente descoberta também a possibilidade do emprego do bagaço na produção de álcool de segunda geração, mesmo que esta utilização ainda esteja um pouco limitada.

Outro fator atrativo para as indústrias do setor sucroalcooleiro, que incentivam a cogeração a partir do bagaço, são os preços volúveis do açúcar e do etanol, o que faz com que a venda da energia elétrica excedente produzida nas plantas gere um lucro adicional para estes empreendimentos (HOFSETZ; SILVA, 2012).

No Brasil, a geração de energia elétrica a partir do bagaço de cana tem ganhado espaço ao longo dos anos. Em 2010, havia 314 plantas que geravam juntas 6.022 MW, já em 2021, esse número aumentou para 410 plantas, capazes de gerar 11.963 MW de energia elétrica. Ainda hoje, o panorama para o crescimento deste setor é favorável, uma vez que o país é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, sendo a quantidade produzida aumentada anualmente (LOPES SILVA et al., 2014; ANEEL, 2021).

As tecnologias de gaseificação da biomassa integrada a ciclos combinados, ou BIG-CC (*Biomass Integrated Gasification Combined Cycle*), são consideradas tanto no setor de produção de papel e celulose, quanto no sucroalcooleiro. A primeira planta que empregou o BIG-CC em seus processos foi construída na Suécia, em 1993, e o coeficiente geral de eficiência (com energia elétrica e térmica combinadas) foi de aproximadamente 83% (CIFERNO; MARANO, 2002).

A indústria de papel de celulose é uma das cinco mais intensivas no consumo de energia, em termos mundiais (ANDERSSON; THOLLANDER, 2019), sendo que na produção de celulose, há a opção de utilizar tanto a biomassa florestal, quanto o licor negro, em processos de gaseificação, ambos passíveis de emprego nos ciclos de gaseificação combinados. Geralmente, a gaseificação da biomassa é mais cara que a da lixívia, sendo que esta é ainda capaz de aumentar a recuperação da energia do processo de produção de celulose em 10%, bem como aumentar a produção de energia de duas a três vezes (KONG et al., 2016).

Já para o setor sucroalcooleiro, para a geração de energia, há as opções de queima direta do bagaço de cana, sua utilização em processos de gaseificação e como insumo para produção do álcool de segunda geração. Dos processos de gaseificação e produção de álcool extraem-se o gás de síntese e o etanol de segunda geração, respectivamente, combustíveis estes também passíveis de utilização para geração de energia elétrica em sistemas adequados. Neste âmbito, é interessante perceber que o emprego do bagaço da cana tem também importante papel ambiental, uma vez que já são conhecidos os benefícios da utilização de biocombustíveis ao invés de combustíveis fósseis.

Ainda assim, apesar do seu grande potencial, há um empecilho econômico que impede a adoção de tecnologias para o uso de biocombustíveis sólidos em aplicações industriais. Nesse escopo, é necessário desenvolver uma visão técnico-econômica e ambiental para entender os problemas existentes e melhorar as operações industriais por meio de processos não somente sustentáveis como também eficientes. Deve-se considerar que o emprego desses biocombustíveis é uma competição direta com um mercado já dominado por combustíveis fósseis (AMEZCUA-ALLIERI et al., 2019).

Se levado em consideração a quantidade de matéria-prima energética residual dos processos produtivos das indústrias Sucroalcooleira e de Papel e Celulose, torna-se evidente a vantagem dessas linhas de produção com relação a geração de energia elétrica. Esta que pode ser utilizada dentro da própria planta química, assim como na comercialização deste bem para terceiros.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo de todo o trajeto da evolução dos processos de geração de energia, a biomassa esteve presente. É notável a variedade de rotas de conversão dessa matéria-prima, incluindo as de caráter termoquímico, bioquímico e físico-químico. A rota termoquímica é a mais empregada atualmente e contempla os processos de combustão direta, pirólise e gaseificação. Vale ressaltar a superioridade da gaseificação, com relação a eficiência global do processo de cogeração, despontando como uma alternativa oportuna e promissora.

Mesmo assim, ainda há dificuldades para se escalar os processos de gaseificação da biomassa em ciclos combinados comercialmente, dadas as consideráveis incertezas sobre os custos atrelados a esta tecnologia, ainda que comprovada sua eficácia. Embora tecnologias avançadas ainda não tenham encontrado ampla aplicação, os setores sucroalcooleiro e de papel e celulose tem se mostrado sólidos na produção de bioenergia, devido a seus benefícios energéticos, econômicos e ambientais.

O campo de estudos da biomassa e suas consequentes transformações cresce a cada dia. O que antes era visto como uma forma rudimentar e pouco eficiente para geração de energia, hoje mostra-se como uma alternativa viável em muitos segmentos. Ainda, dada a descoberta contínua de novas tecnologias, esta revela-se uma possibilidade atrativa no campo da produção de eletricidade. Espera-se que a biomassa ganhe cada vez mais espaço dentro da matriz energética, sendo uma fonte renovável e menos impactante em termos ambientais, comparada aos combustíveis fósseis, como petróleo e carvão mineral.

REFERÊNCIAS

- AMEZCUA-ALLIERI, M. A. et al. Techno-economic analysis and life cycle assessment for energy generation from sugarcane bagasse: Case study for a sugar mill in Mexico. *Food and Bioproducts Processing*, v. 118, p. 281–292, 2019.
- ANDERSSON, E.; THOLLANDER, P. Key performance indicators for energy management in the Swedish pulp and paper industry. *Energy Strategy Reviews*, v. 24, p. 229–235, 2019.
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. *Parte II: Fontes Renováveis - Biomassa*. 3. ed. Atlas de Energia Elétrica do Brasil, p. 233, 2008.
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. *Sistema de informações de Geração da ANEEL*. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/siga>. Acesso em: 08 mar. 2021.

Bioenergia em revista: diálogos. ano/vol. 12, n. 2, jul./dez. 2022. P. 100-117
Uma análise da biomassa como fonte de energia elétrica e investigação de suas tecnologias
COSTA, Bruno Perpétuo; ALTOÉ, Leandra

CHOUDHARY, P. et al. A review of biochemical and thermochemical energy conversion routes of wastewater grown algal biomass. *Science of the Total Environment*, v. 726, n. 271, p. 137961, 2020.

CIFERNO, J. P.; MARANO, J. J. *Benchmarking biomass gasification technologies for fuels, chemicals and hydrogen production*. US Department of Energy. National Energy, n. June, p. 58, 2002.

CORRÊA NETO, V. *Análise de viabilidade da cogeração de energia elétrica em ciclo combinado com gaseificação de biomassa de cana-de-açúcar e gás natural*. 2001. 174 f. Dissertação (Mestrado em Ciências do Planejamento Energético) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. *Biomassa para energia*. 1. ed. Campinas: Editora da UNICAMP, 29 p., 2008.

DANTAS, G. A.; LEGEY, L. F. L.; MAZZONE, A. Energy from sugarcane bagasse in Brazil: An assessment of the productivity and cost of different technological routes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 21, p. 356–364, 2013.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. *Plano Nacional de Energia 2030: Geração termelétrica - Biomassa*. Rio de Janeiro: EPE, 250 p., 2007.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. *Balço Energético Nacional 2021: ano base 2020*. Rio de Janeiro: EPE, 295 p., 2020.

FARDIN, J. F.; DE BARROS, O.; DIAS, A. P. F. Biomass: Some Basics and Biogas. *Advances in Renewable Energies and Power Technologies*, v. 2, p. 1-13, 2018.

HOFSETZ, K.; SILVA, M. A. Brazilian sugarcane bagasse: Energy and non-energy consumption. *Biomass and Bioenergy*, v. 46, p. 564–573, 2012.

KACZOR, Z.; BULIŃSKI, Z.; WERLE, S. Modelling approaches to waste biomass pyrolysis: a review. *Renewable Energy*, v. 159, p. 427–443, 2020.

KONG, L.; HASANBEIGI, A.; PRICE, L. Assessment of emerging energy-efficiency technologies for the pulp and paper industry: a technical review. *Journal of Cleaner Production*, v. 122, p. 5–28, 2016.

LOPES SILVA, D. A. et al. Life cycle assessment of the sugarcane bagasse electricity generation in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 32, p. 532–547, 2014.

MACHIN, E. B. *Análise técnica, econômica e ecológica da incorporação de sistemas de gaseificação de bagaço de cana-de-açúcar no setor sucroalcooleiro: uso de ciclos combinados para o aumento da oferta de eletricidade*. 2015. 172 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá/SP, 2015.

MORAES, S. L. DE et al. Cenário brasileiro da geração e uso de biomassa adensada. *Revista IPT Tecnologia e Inovação*, v. 1, n. 4, p. 58–73, 2017.

NAQVI, M. et al. Gasification Integrated with Small Chemical Pulp Mills for Fuel and Energy Production. *Energy Procedia*, v. 142, p. 977–983, 2017.

Bioenergia em revista: diálogos. ano/vol. 12, n. 2, jul./dez. 2022. P. 100-117

Uma análise da biomassa como fonte de energia elétrica e investigação de suas tecnologias

COSTA, Bruno Perpétuo; ALTOÉ, Leandra

PANG, S. Advances in thermochemical conversion of woody biomass to energy, fuels and chemicals. *Biotechnology Advances*, v. 37, n. 4, p. 589–597, 2019.

PEDROSO, D. T. et al. Technical assessment of the Biomass Integrated Gasification/Gas Turbine Combined Cycle (BIG/GTCC) incorporation in the sugarcane industry. *Renewable Energy*, v. 114, p. 464–479, 2017.

PRADO, T. G. F. *Externalidades do ciclo produtivo da cana-de-açúcar com ênfase na produção de energia elétrica*. 2007. 236 f. Dissertação (Mestrado em Energia) - Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

RODRIGUES, T. O.; ROUSSET, P.; RÁPIDA, P. Bioóleo: Uma Alternativa para Valorização Energética da Biomassa. *Revista Brasileira de Energia*, v. 17, p. 39–56, 2011.

SALES, C. A. V. B. DE. *Avaliação Técnico Econômica da Conversão da Biomassa em Eletricidade Utilizando Tecnologias de Gaseificação*. 2007. 188 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia da Energia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia da Energia, Universidade de Itajubá, Itajubá/MG, 2007.

SANTOS, F. A. et al. Dendroenergy. *Nucleus*, v. 13, n. 1, p. 131–142, 2016.

SHAHBAZ, M. et al. The effect of renewable energy consumption on economic growth: Evidence from the renewable energy country attractive index. *Energy*, v. 207, p. 118162, 2020.

TOLMASQUIM, M. T. *Alternativas energéticas sustentáveis no Brasil*. 1. ed. Rio de Janeiro: Relume-Dumará, 488 p., 2004.

TOLMASQUIM, M. T. et al. *Energia Termelétrica: Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear*. 1. ed. Rio de Janeiro: EPE, p. 417, 2016.

WETTERLUND, E.; PETERSSON, K.; HARVEY, S. Systems analysis of integrating biomass gasification with pulp and paper production - Effects on economic performance, CO₂ emissions and energy use. *Energy*, v. 36, n. 2, p. 932–941, 2011.

ZANONI, P. R. S.; SCHAITZA, E. G. Processos termoquímicos. *Revista Opiniões*, n. 49, p. 22-23, 2017.

1 COSTA, Bruno Perpétuo é estudante de graduação em Engenharia Química da Universidade Federal do Espírito Santo e, atualmente, presidente do Centro Acadêmico de Engenharia Química - CAEnQ. brunoperpetuocosta@gmail.com

2 ALTOÉ, Leandra. Possui graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental pela Universidade Federal de Viçosa (2010), mestrado em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa (2012) e doutorado em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa (2016), com período sanduíche e acordo de cotutela com a Universidad de Valladolid - Espanha (2016), pelo programa de doutorado em Ciencia e Ingeniería Agroalimentaria y de Biosistemas (2016). Atualmente, é Professora do Departamento de Engenharias e Tecnologia da Universidade Federal do Espírito Santo, Campus São Mateus. Tem experiência nas áreas de Mecânica dos Sólidos, Fontes Renováveis de Energia e Eficiência Energética. leandra.altoe@ufes.br