



**GRUPO-2**

**GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS - GPT**

**EFICIÊNCIA E INTEGRAÇÃO ENERGÉTICAS NA CONJUGAÇÃO DE BIORREFINARIAS E GERAÇÃO  
DISTRIBUÍDA DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE FONTES RENOVÁVEIS**

**José Geraldo de Melo Furtado (\*)**  
**CEPEL**

**RESUMO**

O conceito de biorrefinaria representa uma interseção entre as tendências energéticas e da indústria química no mundo contemporâneo, uma vez que numa biorrefinaria os recursos biomássicos são processados de forma sustentável com o intuito de produzir um espectro de produtos comercializáveis e de energia. A associação entre biorrefinaria e geração distribuída proporciona condições de maximizar o aproveitamento das biomassas e otimizar a integração e a eficiência energética do empreendimento como um todo.

Nesse contexto, o presente trabalho avalia a utilização da biomassa lignocelulósica, a qual apresenta elevada disponibilidade e baixa competitividade com a produção de alimentos, como matéria-prima de biorrefinarias para produção conjunta de açúcares, etanol, furfural, bio-óleo e energia elétrica. Os resultados evidenciam que o empreendimento é caracterizado pelo elevado investimento, mas que também existem boas perspectivas em termos de impactos econômicos, ambientais e integração material-energética.

**PALAVRAS-CHAVE**

Biorrefinarias, Geração Distribuída, Integração Energética, Biomassa, Bioenergia, Cogeração

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Assim como atualmente as matrizes energética e elétrica do mundo são caracterizadas pelo predomínio dos combustíveis fósseis, também a indústria química tem nos derivados de petróleo suas principais matérias-primas (1, 2). Mas, da mesma forma que as fontes renováveis de energia têm se destacado no atual cenário mundial, em termos do crescimento de suas participações e de suas perspectivas (3, 4), também as indústrias químicas têm intensificado os esforços em Pesquisa, Desenvolvimento & Inovação (PD&I) no sentido de viabilizar produtos que possam ser obtidos a partir de recursos renováveis, o que também abre grandes perspectivas de sustentabilidade e dinamização da cadeia produtiva da indústria química, mormente no âmbito do que tem sido considerado como a Química Verde ou Sustentável (5, 6).

Nesse contexto, o conceito de biorrefinaria representa uma interseção entre as tendências energéticas e produtivas supracitadas, uma vez que numa biorrefinaria os recursos biomássicos são processados de forma sustentável com o intuito de produzir um espectro de produtos comercializáveis e de energia (5-7), denotando assim uma visão multipropósito e multiproduto, que tem lugar em plantas industriais envolvendo diversas rotas, operações e processos à semelhança das refinarias de petróleo, de tal forma que os produtos energéticos aparecem ao lado de produtos químicos. Em função das escalas, das necessidades e da integração dos processos, em algumas plantas ou biorrefinarias, parcela significativa da energia disponibilizada pode ser empregada na própria planta, incrementando a eficiência energética da mesma e reduzindo sua dependência por energia externa.

Ainda que a disponibilidade e a variabilidade de tipos da biomassa possam apresentar fortes dependências em relação ao tempo (sazonalidade) e à localização geográfica (dispersão territorial e clima), no que tange à geração de energia elétrica, seu emprego abre igualmente diversas possibilidades em diferentes escalas, desde o atendimento ao consumidor isolado, passando pela micro (até 100 kW) e mini (até 1 MW) geração distribuída, até atingir as centrais energéticas a biomassa, as quais podem ter potências instaladas superiores a 30 MW. Tais empreendimentos de geração de energia elétrica, quando próximos aos respectivos consumidores, interligados ou não à rede elétrica, são tipicamente de Geração Distribuída (GD) e, dessa forma, podem estar integrados às biorrefinarias, sejam elas centrais ou descentralizadas.

Dessa forma, a associação entre biorrefinaria e GD proporciona condições de maximizar o aproveitamento das biomassas e otimizar a integração e a eficiência energética do empreendimento como um todo, com positivos impactos econômico-ambientais nas localidades onde tal associação seja factível ou mesmo em âmbitos regional e nacional. No caso do Brasil, as diversas cadeias do agronegócio (origem de significativa parcela da biomassa) precisam ser avaliadas no sentido de se identificar as oportunidades e escalas mais consistentes (8). Também o aproveitamento da fração orgânica dos resíduos urbanos constitui uma possibilidade importante no âmbito da lógica das biorrefinarias (5, 8). Nesse complexo cenário, o presente trabalho procura contribuir com uma análise acerca do binômio geração de energia elétrica e produção de compostos químicos resultante da conjugação das biorrefinarias com as potencialidades da GD em função da integração de tecnologias de processamento de materiais biomássicos e de geração de energia. O estudo tem por objeto a utilização da biomassa lignocelulósica, a qual apresenta elevada disponibilidade e baixa competitividade com a produção de alimentos, como matéria-prima de biorrefinarias.

## 2.0 - BIORREFINARIAS

Uma biorrefinaria se refere ao conjunto de processos físico-químico-biológicos integrados e sustentáveis de transformação da biomassa em energia (elétrica e térmica), em biocombustíveis (combustíveis derivados de biomassa, CDB) e em materiais e produtos químicos de valor agregado para uso final ou como intermediário químico, conforme as representações esquemáticas mostradas na Figura 1, com a especial característica do ciclo de carbono fechado ou mesmo negativo (caso haja sequestro de carbono). No que tange à energia (um produto, coproduto ou subproduto, dependendo da estratégia ou lógica da biorrefinaria em questão), a geração de energia elétrica (EE) e a disponibilização de calor ou energia térmica (ET) soma-se àquela dos biocombustíveis, que podem ser considerados vetores energéticos ou portadores de energia, conforme evidenciado na Figura 1, os quais podem ser produzidos por diversos processos, conforme indicado na Figura 2, e são essencialmente o etanol (bioetanol), o biogás (ou biometano, quando intensamente purificado), o gás de síntese (Gas. Sint.), o hidrogênio (H<sub>2</sub>) e misturas gasosas ou mesmo líquidos e sólidos que podem ser empregados como combustíveis.

De fato, na atualidade, cerca de 85% da energia global é transportada sob a forma de combustíveis e cerca de 70% da energia elétrica gerada no mundo é proveniente do processamento de combustíveis, em sua grande maioria fósseis (1-3). Assim, o incremento da participação dos CDB na matriz energética (local ou regional, nacionais ou global) pode ser uma iniciativa em prol da sustentabilidade.

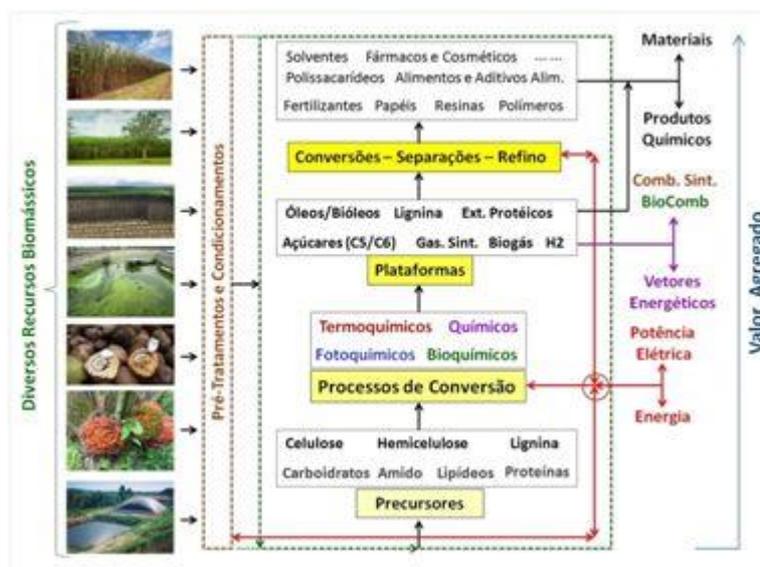


FIGURA 1 – Biorrefinarias: Representação esquemática enfatizando a geração de precursores a partir dos recursos biomássicos e o subsequente processamento para obtenção das plataformas químicas, cujo posterior processamento no âmbito da biorrefinaria resultará na fabricação de produtos químicos e materiais. Paralela ou subsequentemente ocorre a produção de biocombustíveis e a geração de energia.

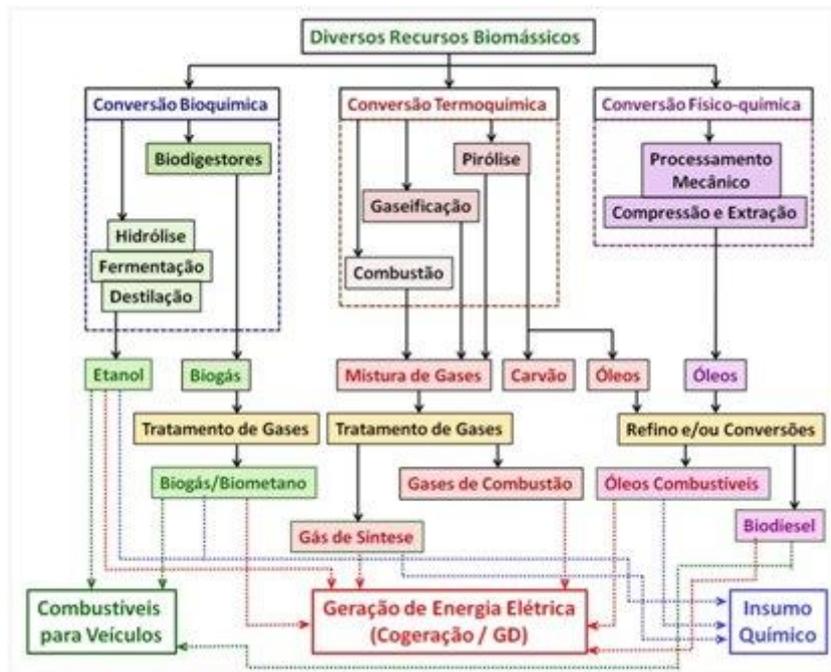


FIGURA 2 – Biorrefinarias: Típicas rotas de processamento e conversão da biomassa em CDB, energia e insumos ou produtos químicos.

## 2.1 Matérias-primas e Processamento

Conforme pode ser observado nas Figuras 1 e 2, diversos são os recursos biomássicos ou matérias-primas para as biorrefinarias, os quais, mediante operações e processos de pré-tratamento e condicionamento, resultarão nos precursores, que, por sua vez, serão processados (Figura 2) de forma a originar as substâncias que constituem tipicamente as plataformas químicas das biorrefinarias. A partir dessas plataformas, através do emprego de diferentes processos de conversão, separação e refino, serão produzidos os materiais e produtos químicos de maiores valores agregados.

Concomitantemente, as biorrefinarias também disponibilizam intermediários energéticos, CDB e energia (ET e EE) em consequência do processamento dos precursores supracitados. O balanceamento entre os diversos produtos e coprodutos que podem ser fabricados a partir de uma dada biomassa ou de um espectro de recursos biomássicos é, certamente, um ponto crucial para a viabilidade de uma biorrefinaria, o qual depende das tecnologias e processos que podem ser implementados, das escalas envolvidas e das demandas dos mercados. Além disso, atualmente, muitas das tecnologias de conversão química para fabricação de bioprodutos encontram-se em franco desenvolvimento e nem todas estão disponíveis em diferentes escalas.

Ainda que a ênfase energética privilegie a produção dos CDB, existem perspectivas que apontam no sentido de incrementos na fabricação de bioprodutos e biomateriais, numa visão não *drop in* (4, 8), os quais podem ser produzidos com vantagens a partir das matérias-primas renováveis, mas que são, de fato, novos em relação aos obtidos pelas vias petroquímicas convencionais (9). Ainda assim, o conjunto de produção energética (CDB, ET e EE) pode desempenhar um papel decisivo em diversas situações e mercados nos quais biorrefinarias estejam presentes.

Conforme mostrado nas Figuras 1 e 2, dentre os diversos recursos biomássicos que podem ser empregados em biorrefinarias, a biomassa lignocelulósica (madeiras, palhas, cascas, bagaços, caules, gramíneas e outros resíduos agrícolas e florestais) ocupa um papel de destaque, apresentando elevada disponibilidade em diversas regiões, relativo baixo custo, baixa competitividade com a produção de alimentos e representa ainda uma fonte alternativa de açúcares (C5 e C6), importante plataforma química, cf. Figura 1, para os diversos processos no âmbito das biorrefinarias e que resultam na produção de substâncias que são empregadas numa ampla cadeia da indústria química, conforme pode ser visto no diagrama da Figura 3 (10). Assim, como um importante caso especial derivado dos esquemas mostrados na Figura 1, a Figura 3 apresenta um diagrama acerca das rotas de processamento e dos típicos produtos de uma biorrefinaria à base de matéria-prima lignocelulósica, a partir do seu pré-processamento e fracionamento nos constituintes básicos (celulose, hemicelulose e lignina). Na figura são mostrados apenas alguns dos possíveis bioprodutos que têm sido continuamente valorizados, mas muito outros podem ser considerados, principalmente em função da esperada progressão das tecnologias de conversão, separação e refino (5-7).

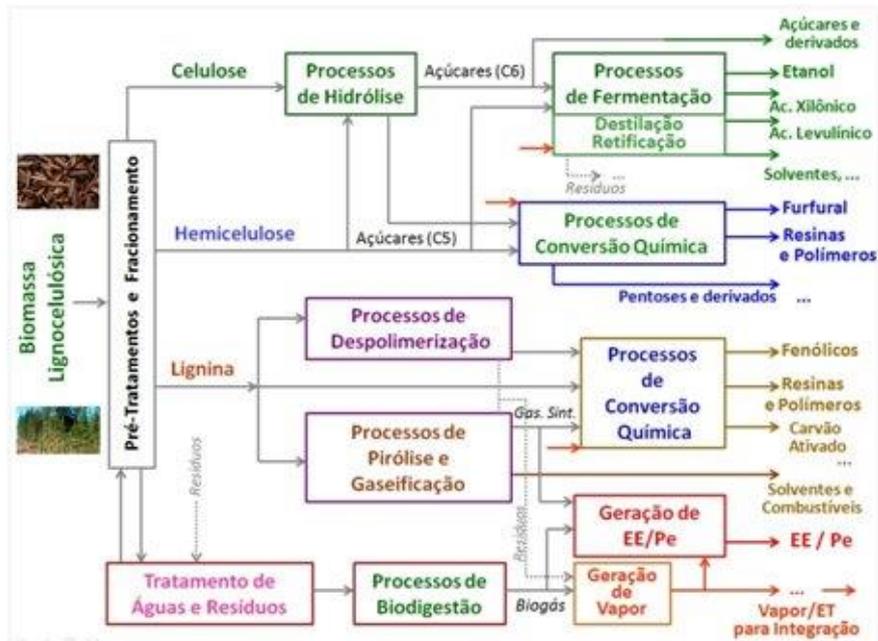


FIGURA 3 – Esquema básico e conceitual de uma biorrefinaria de biomassa lignocelulósica, evidenciando as principais rotas de processamento das frações celulose, hemicelulose e lignina, os processos de conversão em produtos, combustíveis e energia.

Tendo em vista o diagrama representado na Figura 3 pode-se considerar que atualmente as rotas que levam à produção de etanol de segunda geração (ET2G) – obtido a partir de matéria-prima lignocelulósica – e aos produtos químicos derivados de açúcares (C5/C6) encontram-se em desenvolvimento ou, em alguns casos, são mesmo comerciais, fazendo, no caso do Brasil, p. ex., de uma usina de cana-de-açúcar uma verdadeira biorrefinaria, produzindo etanol (de ambas gerações), açúcares e bioeletricidade a partir de uma matéria-prima que é formada por um terço de sacarose e dois terços de material lignocelulósico (11). Ademais, as progressões de tecnologias de processamento, conversão e separação associadas às rotas consideradas na Figura 3 podem, no futuro, ampliar a diversidade de produtos possíveis, inclusive com produtos de maior valor agregado, como os acima considerados (alguns exemplos mostrados na Figura 3). Situações semelhantes, ainda que não se encontrem no mesmo estágio tecnológico do setor sucroalcooleiro energético, podem ser citadas como a do biodiesel (com perspectivas de produção a partir de açúcares, que pode ser complementar ou substitutiva à rota com oleaginosas ou gorduras), do biogás e biometano, além da produção de gás de síntese a partir da biomassa lignocelulósica ou mesmo da conjugação desta com a matéria-prima oriunda de resíduos sólidos urbanos, notadamente nas vizinhanças de regiões metropolitanas ou em regiões de transição urbano-rural/agronegócio, como analisado num trabalho anterior (12). Tanto o gás de síntese quanto o biometano abrem também perspectivas de desenvolvimentos da química do C1 e da produção de hidrogênio com base em recursos renováveis de forma semelhante ao que ocorre com o gás natural.

## 2.2 Combustíveis e Geração de Energia

Dessa forma, pelo viés energético, a produção de CDB no âmbito das biorrefinarias pode resultar na comercialização desses combustíveis para o setor de transporte e/ou sua conversão em energia elétrica (disponibilizando potência elétrica, Pe) para uso local ou despachável, associada à produção de materiais e produtos químicos sustentáveis de interesse comercial.

Em geral, conforme considerado no diagrama esquemático mostrado na Figura 2, os principais processos que resultam na produção de CDB, tanto misturas de gases, quanto líquido ou sólidos, podem ser agrupados em três classes: (I) os processos de base bioquímica que resultam na (I-a) produção de misturas gasosas ricas em metano (biogás) mediante a decomposição anaeróbica da biomassa ou os processos fermentativos que resultam na (I-b) produção de etanol (ou mesmo outras substâncias) a partir da biomassa, (ii) os processos termoquímicos de pirólise e gaseificação da biomassa que produzem CDB gasosos, líquidos ou sólidos, e (iii) o processamento mecânico por compressão e extração que resulta na produção de bio-óleos e derivados. Além disso, sem necessariamente passar por um intermediário (CDB), a simples combustão de parcela da biomassa pode ser empregada na produção de vapor e subsequente geração de EE, como é o comum na indústria sucroalcooleira.

A classe dos processos bioquímicos de biodigestão e de fermentação constitui as tecnologias de produção de biogás/biometano e etanol, bem como de uma gama de produtos derivados de açúcares (C5/C6). O etanol tem importante papel no setor de transportes, mas o subproduto, bagaço de cana-de-açúcar, é processado de forma

convencional para a geração termelétrica de EE (ciclo de combustão-geração de vapor e seu uso em turbinas a vapor). Entretanto, têm sido os processos de pirólise e gaseificação que têm proporcionado as maiores eficiências em termos de recuperação e integração energéticas, mediante, principalmente, a produção de gás de síntese, o qual é tanto um energético para aproveitamento direto na geração de EE, quanto um intermediário energético, inclusive no sentido de possibilitar a produção de hidrogênio (cf. Figura 1), como também constitui a base material para a produção de diversos intermediários químicos e produtos de alto valor agregado (cf. Figura 3).

A partir dos processos de pirólise e gaseificação de biomassa (ou mesmo da simples combustão) existem diversas tecnologias que podem ser acopladas para geração de EE, tais como motogeradores, ciclo a vapor, turbinas a gás, motores Stirling, ciclo Rankine orgânico, ou combinações destas, como os Sistemas Integrados de Gaseificação de Biomassa e Ciclo Combinado (BIGCC, *Biomass Integrated Gasification Combined Cycle*), além de células a combustível (CaC). Contudo, muitas dessas alternativas tecnológicas não se mostram adequadas para aplicações em pequenas escalas, de forma que nessa situação o aproveitamento do biogás tem merecido destaque, ainda que com foco somente energético (8, 12).

### 3.0 - COGERAÇÃO MATERIAL-ENERGÉTICA A PARTIR DA BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA

Como acima considerado, a biomassa lignocelulósica é comumente a maior parte da biomassa disponível em condição de não competição com alimentos. Assim, grandes esforços de pesquisa e desenvolvimento têm sido focados na otimização do aproveitamento deste recurso renovável, principalmente através do processamento termoquímico por pirólise e gaseificação da fração lignínica, geralmente associado a parcelas dos dois outros constituintes (celulose e hemicelulose), ainda que estes também sejam geralmente processados pelas vias químicas e bioquímicas. De fato, a valorização dos produtos derivados da lignina (como compostos e polímeros aromáticos, resinas fenólicas, adesivos, corantes e vanilina) tem sido apontada como fundamental para a viabilidade das biorrefinarias de lignocelulose (10).

Dependendo do tipo de biomassa, o teor (% em massa) de lignina pode variar desde cerca de 4%, p. ex. na palha de arroz, até por volta de 45%, como na fibra de coco e em sementes de uva, estando também na faixa entre 15 e 35% para muitas espécies de madeira (10, 13). Em termos de conteúdo energético, o poder calorífico da lignina é cerca de 24-26 MJ/kg, contra uma média igual a 18,0 MJ/kg para a biomassa lignocelulósica e 7,0 MJ/kg para o bagaço da cana-de-açúcar que é um atual importante insumo energético (8, 13). Dessa forma, verifica-se que a lignina tem também grande potencial como insumo energético, em especial em sistemas de cogeração.

Ainda que, conforme ilustrado nas Figuras 1 e 3, seja bastante elevada a variabilidade da biomassa lignocelulósica, bem como das rotas de processamento, dos intermediários e dos produtos que potencialmente podem ser obtidos, no presente estudo se avalia, essencialmente, como uma simplificação ou caso particular da situação mais genérica considerada na Figura 3, o conceito e a aplicação de uma biorrefinaria de lignocelulose cuja matéria-prima básica pode ser representada pela combinação de celulose  $[(C_6H_{10}O_5)_n]$ , hemicelulose  $[(C_5H_8O_4)_n]$  e lignina  $[(C_{10}H_{11,1}O_{3,3})_n]$ , as quais foram aproximadas pelas respectivas fórmulas básicas – nas quais  $n$  indica, em cada caso, aproximadamente, os graus de polimerização; tipicamente de 1.000 a 15.000 para a celulose, 180 para a hemicelulose e 60 para a lignina isolada –, sendo o conteúdo energético médio tomado como igual a 18,0 MJ/kg (13).

Os produtos da biorrefinaria considerada são representados pela combinação de químicos, açúcares e furfural, energéticos ou intermediários químicos (etanol, bio-óleos e gás de síntese), além de energia (EE e ET). Quanto ao aproveitamento da biomassa para geração de energia, o processo de geração de energia pode ser representado pelo ciclo combinado (BIGCC) mostrado (com linhas pretas) na Figura 4, mas também se avalia os resultados do acoplamento ao BIGCC do ciclo suplementar (CS) representado pelas linhas verdes, também mostrado na Figura 4, o qual é formado por um sistema de CaC de baixa temperatura de operação (CaC-bT, 500 kW) e um sistema de CaC de alta temperatura de operação (CaC-AT, 2 MW), com respectiva turbina a gás do sistema híbrido (500 kW). Os principais parâmetros empregados no estudo são mostrados na Tabela 1 e os modelos reacionais termocinéticos para as variantes tecnológicas da planta representada nas Figuras 3 (esquema geral) e 4 (planta de cogeração), baseados na gama de processos e operações considerados, bem como nos equipamentos principais e respectivos balanços de massa e de energia, foram então implementados e simulados utilizando-se os sistemas EMSO (*Environment for Modeling, Simulation, and Optimization*) e HYSYS (*Hyprotech Systems process modeling software*).

A análise com base no BIGCC e variantes tem por finalidade avaliar processos e situações que tendem a proporcionar elevada recuperação, tanto energética quanto material, dependendo da lógica de operação da biorrefinaria, a partir dos recursos biomássicos, ainda que tais processos não constituam a atual base instalada. De fato, os simples processos de combustão e geração de vapor são os mais comuns, principalmente na médio-grande escala, para potências instaladas superiores a 200 kW e, mais ainda, para acima de 1 MW. Já para a micro e pequena escalas o emprego de motores e grupos geradores é o usual, ainda que existam pequenas instalações com microturbinas, de 10 a 150 kW, que possibilitam ganhos em eficiência, mas também apresentam custos significativamente mais elevados. Nesse caso trata-se essencialmente do foco energético, geralmente

descentralizado ou em área isoladas, a partir do aproveitamento de misturas de gases combustíveis, produzidos por via bioquímica ou por gaseificação. As possibilidades de associação desses sistemas com biorrefinarias descentralizadas, empregando principalmente processos de pirólise rápida e produzindo maior proporção de bio-óleos, tem sido recentemente enfatizada (14, 15).

Mas, é certamente nas grandes escalas que as plantas com maiores perspectivas de integração material-energética encontram aplicação, processando grande quantidade de recursos biomássicos e empregando subsistemas e equipamentos que podem alcançar elevadas eficiências. Os estudos e projetos iniciais envolvendo BIGCC contemplaram a faixa de 5 a 9 MW, sendo esta, atualmente, pensada para sistemas na faixa de 30 a 250 MW, ainda que os custos sejam também elevados (15, 16).

No presente caso da modelagem e simulação de biorrefinaria de lignocelulose acoplada à geração de EE em sistema com BIGCC, na alimentação à unidade de gaseificação considera-se separadamente as vazões mássicas das três frações da biomassa lignocelulósica, conforme os valores apresentados na Tabela 1, o que supõe a inserção no sistema da unidade de fracionamento e separação, representada pela potência específica também indicada na Tabela 1. Na prática, pode-se considerar apenas a alimentação em termos de biomassa lignocelulósica ou sua conjugação com outros recursos biomássicos ou residuais (ORBR) conforme anteriormente considerado e sugerido nas Figuras 1 e 3. Como caso base foi considerado uma capacidade instalada de geração elétrica igual a 50 MW no BIGCC e, no caso mais amplo, um valor igual a 3 MW no CS, sempre a partir da alimentação de 80 t/h de biomassa lignocelulósica, resultando na concomitante produção material também apresentada na Tabela 1.

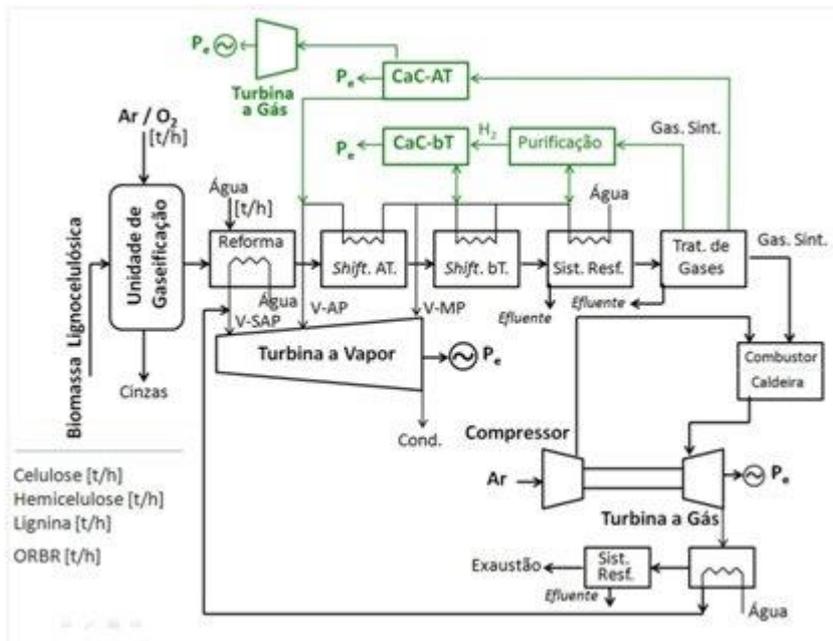


Figura 4 – Esquema conceitual da planta de cogeração associada à biorrefinaria de lignocelulose representada na Figura 3: O diagrama em linhas pretas representa o modelo do sistema integrado de gaseificação de biomassa e ciclo combinado (BIGCC) e suas variantes tecnológicas avaliadas, ao passo que o setor do diagrama mostrado em linhas verdes representa o ciclo suplementar que potencialmente poderia estar acoplado ao IGCC.

O modelo econômico base para a simulação considera a vida útil da biorrefinaria (produção química e energética) igual a vinte e cinco anos a partir da inicialização da planta, depreciação linear em uma década e com valor residual igual a zero, correspondendo o capital de giro a 10% do valor total de investimento fixo determinado a partir dos equipamentos principais, além de taxa de juros padrão do mercado igual a 12,00%aa, tributos em situação padrão e valores de comercialização dos produtos em valores de mercado no primeiro trimestre de 2017.

Verifica-se que para os casos analisados é elevada a proporção do investimento na planta de geração de EE em relação ao investimento total na biorrefinaria. No caso base este valor corresponde a 57,5% ao passo que com a participação do CS o valor torna-se igual a 59,3%. Em ambos os casos tem-se então a indicação de alto investimento para as condições analisadas, o que, de fato, é corroborado pela realidade, uma vez que muitas plantas reais acabam por empregar sistemas de geração de EE bem mais simples, notadamente a combustão associada ao ciclo vapor (14, 16), minimizando assim o investimento, ainda que a eficiência e a recuperação energético-material da biomassa também sofram redução (5, 12). Com efeito, em termos de investimento por capacidade instalada de geração de energia, tem-se 4.097 US\$/kW para o BIGCC e 4.423 US\$/kW para o sistema

com CS, valores estes que são típicos da faixa geralmente considerada para sistema do tipo BIGCC, 3.500 a 4.300 US\$/kW, dependendo da escala e tipos de equipamentos e insumos (16), ainda que para o acoplamento do CS tenha-se um resultado ligeiramente superior, reflexo principalmente do elevado investimento fixo nos sistemas de CaC (12, 16). Entretanto, esta configuração também proporciona um ganho em termos de eficiência de geração elétrica que alcança o valor de 65,7%, contra 57,4% do BIGCC e cerca de 31 a 36% em termelétrica convencional à base de resíduos (16).

Tabela 1 – Principais parâmetros utilizados na simulação e resultados acerca da produção material-energética do projeto conceitual da planta de biorrefinaria de lignocelulose avaliada

Parâmetro/Indicador	BIGCC	BIGCC + CS
Alimentação (Celulose, Hemicelulose, Lignina) [t/h]	36, 20, 24	
Poder calorífico médio da biomassa lignocelulósica [MJ/kg]	18,00	
Potência instalada no pré-tratamento [MW]	1,43	
Produtos [t/dia]: Açúcares (C6) / Furfural (C5) / Etanol / Bio-óleo	17,5 / 12,0 / 27,3 / 2,5	
Energia Elétrica gerada líquida [MWh/dia]	1.162	1.294
Eficiência de Geração [%]	57,4	65,7
Investimento Total na Planta/Biorrefinaria [milhões US\$]	356,40	372,73
Parcela do Investimento – Geração Elétrica [milhões US\$]	204,85	221,17
Custo da biomassa lignocelulósica [US\$/t], [US\$/MWh]	65,0 / 13,0	
Custo da Energia Elétrica gerada [US\$/MWh]	117,5	122,8

As considerações acima estão restritas à geração de EE, mas este é apenas um dos produtos da biorrefinaria, de forma que a receita total pode ser avaliada, envolvendo a comercialização das vazões dos demais produtos (Tabela 1) e a respectiva pesquisa de mercado (Em US\$/t: açúcar 24,0; etanol 530; furfural 1.400, bio-óleo 950). Para os valores de mercado para os demais produtos considerados seria possível ter uma receita em produtos da ordem de 12 a 14 milhões de US\$/ano. Na situação analisada a comercialização da EE seria prejudicada em função do seu elevado custo. Dessa forma, seria possível incrementar a produção dos produtos de maior valor agregado, desde que exista demanda para os mesmos. Alternativamente, o custo da EE poderia ser reduzido mediante a redução do investimento fixo específico, o que também depende das progressões das tecnologias consideradas, o que tem ocorrido nos últimos anos, mas, em geral, de uma forma lenta (5, 7).

Um aspecto importante numa biorrefinaria deste tipo é que a alimentação do sistema também poderia ser enriquecida em termos do componente de maior conteúdo energético (lignina), o qual, atualmente, também apresenta as maiores dificuldades de processamento para a obtenção de bioprodutos. Dessa forma, alterando-se o mix na alimentação da biorrefinaria poderia-se obter algum ganho energético, otimizando a integração energética da biorrefinaria. Por exemplo, incrementando em 1% a proporção de lignina na alimentação do gaseificador (em detrimento em igual proporção para a celulose e a hemicelulose) poderia-se ter um impacto de até 74 MWh/dia na geração, entre 5 e 6% de incremento em relação ao caso base, com concomitante maior aproveitamento da celulose e da hemicelulose para a produção de bioprodutos de maior interesse comercial, p. ex., o furfural.

#### 4.0 - CONCLUSÃO

É crescente a importância das biorrefinarias no atual cenário econômico-energético mundial, ainda que muitas das tecnologias e processos envolvidos no conceito de biorrefinaria se encontrem em estágios de pesquisa e desenvolvimento ou em aplicações de demonstração ou pré-comerciais. Não obstante, diversos empreendimentos, com rotas tecnológicas já bem conhecidas ou dominadas, têm sido implementados em todo o mundo. Neste trabalho foi apresentada uma visão acerca de alguns aspectos relacionados a integração material-energética no âmbito da interseção entre biorrefinarias e geração distribuída de energia, em função da integração de tecnologias de processamento de materiais biomássicos e de geração de energia. O estudo tem por objeto a utilização da biomassa lignocelulósica, a qual apresenta elevada disponibilidade e baixa competitividade com a produção de alimentos, como matéria-prima de biorrefinarias.

A partir da concepção de uma planta para processamento das frações da biomassa lignocelulósica (celulose, hemicelulose e lignina), conjugando rotas bioquímicas e termoquímicas, foi modelado o sistema para produção dos bioprodutos, açúcares, etanol, furfural e bio-óleo, acoplado a um sistema integrado de gaseificação de biomassa e ciclo combinado para geração de energia elétrica, com a opção ainda de um ciclo suplementar envolvendo um sistema híbrido de células a combustível e turbina a gás. Os resultados do estudo de simulação mostram que o empreendimento é caracterizado pelo elevado investimento, tipicamente na faixa de 4.097 a 4.423 US\$/kW instalado, o qual se reflete no custo da energia elétrica gerada, dependendo das configurações envolvidas, sendo superiores aos tipicamente considerados no mercado nacional, mas podem se tornar competitivos frente aos crescentes valores da geração termelétrica convencional, em especial quando também se

leva em consideração o ganho ambiental e as possibilidades de sinergia e integração com a produção de biocombustíveis para o setor de transporte e de produtos químicos com altos valores agregados.

#### 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) WORLD ENERGY COUNCIL. World Energy Resources, Londres, 2015.
- (2) SAYGIN, D., PATEL, M. K., TAM, C., GIELEN, D. J. Chemical and Petrochemical Sector. IEA information paper, IEA, 2009.
- (3) Renewables Global Status Report. Global Trends in Renewable Energy Investment Report. Frankfurt School UNEP Collaborating Centre, 2016.
- (4) OBAMA, B. The irreversible momentum of clean energy. Science, 9 January 2017.
- (5) JONG, E., HIGSON, A., WALSH, P., WELLISCH, M. Bio-based Chemicals - Value Added Products from Biorefineries. IEA Bioenergy Task 42 Biorefinery, 2016.
- (6) BNDES. Potencial de diversificação da indústria química Brasileira – Relatório 4. Bain & Company / Gas Energy, 2014.
- (7) DEMIRBAS, A. Biorefineries: Current activities and future developments. Energy Conversion and Management, v. 50, p. 2782-2801, 2009.
- (8) VAZ Jr, S. Biorrefinarias: cenários e perspectivas. Embrapa, 2011.
- (9) BOMTEMPO, J. V. A Bioeconomia e os produtos-plataforma. GGN - O Jornal de Todos os Brasis, 2015.
- (10) REITH, J. H. Lignocellulosic feedstock biorefinery for co-production of chemicals, transportation fuels, electricity and heat. International Workshop on Biorefinery, Madrid, 2009.
- (11) PACHECO, T. F. Produção de Etanol: Primeira ou Segunda Geração? Circular Técnica n. 4, 2011.
- (12) FURTADO, J. G. M., WANDERLEY, R. R. Concepção e avaliação técnico-econômica de uma usina integrada de geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos. XXIII SNPTEE, Foz do Iguaçu, 2015.
- (13) QUIRINO, W. F., VALE, A. T., ANDRADE, A. P. A. Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósicos. Revista da Madeira, n. 89, p. 100-106, 2005.
- (14) BORGES, F. C. Proposta de um modelo conceitual de biorrefinaria com estrutura descentralizada. Dissertação de Mestrado. UFRGS, 2010.
- (15) PLANO NACIONAL DE ENERGIA – 2030. Empresa de Pesquisa Energética – EPE, 2007.
- (16) IRENA. Renewable energy technologies: Cost analysis series. International Renewable Energy Agency, 2012.

#### 6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



José Geraldo de Melo Furtado

Nascido no Rio de Janeiro, RJ em 29 de março de 1969.

Doutorado (2005) e Mestrado (2001) em Ciência e Engenharia de Materiais: COPPE/UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro). Graduação (1997) em Engenharia Química: UFRJ.

Empresa: Eletrobras CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, desde 2002.

Pesquisador do Departamento de Tecnologias Especiais (DTE), atuando nas áreas de materiais e sistemas energéticos, modelagem e simulação de processos de cogeração, eletroquímica, sistemas de armazenamento de energia, baterias, tecnologias do hidrogênio e células a combustível, bioenergia e ciências térmicas.