



Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Química
Departamento de Desenvolvimento de Processos e Produtos - DDPP
Laboratório de Otimização, Projeto e Controle Avançado - LOPCA

**ANÁLISES TÉCNICO-ECONÔMICA E EXERGÉTICA DA INTEGRAÇÃO
ENTRE UMA USINA SUCROENERGÉTICA E UMA PLANTA DE PRODUÇÃO
DE BIOMASSA DE MICROALGAS.**

Aluno: Murilo dos Santos Gabriel RA:203895

Orientador: Prof. Dr. Adriano Pinto Mariano

Co-orientador: Dr. Pablo Silva Ortiz

O protagonismo do Brasil no mercado nacional e de exportação de açúcar e etanol é um dos principais fatores que promovem o incentivo na busca de rotas alternativas de redução dos custos operacionais e diversificar as receitas das biorrefinarias nacionais. Além disso, a pauta do viés sustentável necessário ao segmento industrial, incluindo o setor sucroenergético, está cada vez mais presente na expansão da matriz energética brasileira visando reduzir os efeitos negativos ao meio ambiente, além de tentar aproveitar o máximo de recursos e subprodutos disponíveis para serem utilizados em outras formas de gerarem valor.

Nesse sentido, a produção de biodiesel a partir da biomassa de microalgas em grande escala apresenta-se como uma forma promissora de proporcionar os dois vieses, sustentável e rentável, no contexto sucroalcooleiro. Com base no dióxido de carbono, o principal dos gases de efeito estufa, biogênico no processo fermentativo do caldo da cana, tais microrganismos podem, através do mecanismo fotossintético, serem cultivados para o enriquecimento de lipídios de alta qualidade em sua composição. O biodiesel, por sua vez, pode ser vendido ao mercado consumidor de forma a aumentar as receitas da usina integrada. Apesar de não ter sido explorado no escopo do projeto, outra possibilidade de faturamento nesse contexto é o da negociação de Créditos de Descarbonização (CBIOS) a outros players que buscam ser neutros em emissão de carbono, mas não possuem mecanismos para tal no seu respectivo modelo de negócios. Com a inserção na Política Nacional de Biocombustíveis – RenovaBio, a partir da utilização do dióxido de carbono gerado nas termelétricas e com a economia deste ao disponibilizar biodiesel ao mercado, seria possível aumentar as receitas da planta de forma alternativa, explorando as iniciativas sustentáveis.

Além disso, pode-se minimizar um dos principais gargalos do setor, uma vez que o meio de cultivo para as microalgas pode ser adaptado para aproveitar a vinhaça da usina de etanol, um subproduto da destilação, não necessitando de gastos excedentes com o tratamento do efluente. Ainda, pode-se aproveitar da demanda bioquímica e química (DBO e DQO) da vinhaça para o processo de digestão anaeróbica desta, produzindo o biogás que por sua vez é empregado como combustível nas unidades de cogeração da usina para a geração de energia elétrica e produção de vapor como utilidade para as instalações.

Assim, as análises exergética e técnico-econômica deste projeto contemplam todas as etapas da planta de biomassa a ser convertida em biodiesel, incluindo as correntes integradas provenientes da sucroenergética, tais como: vazão de gás carbônico biogênico; vinhaça não biodigerida; eletricidade e utilidades (vapor) para a autossuficiência da planta. O fluxograma apresentado na **Figura 1** expõe os volumes de controle de integração relacionados ao escopo das análises:

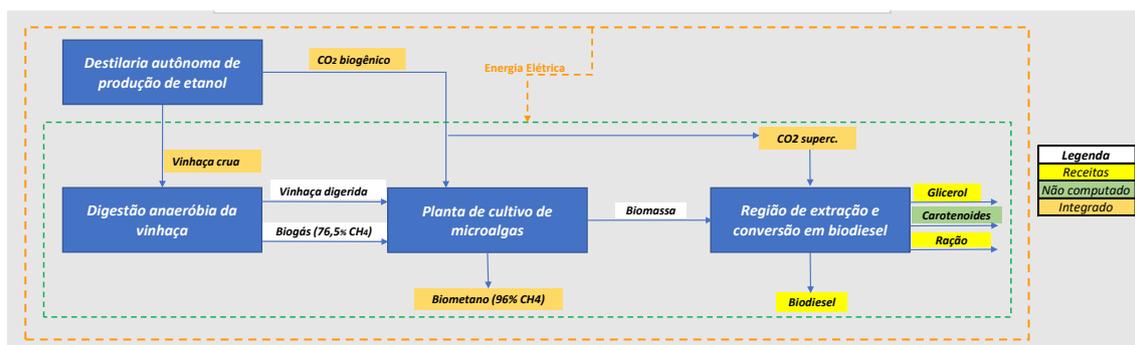


Figura 1 – Fluxograma descritivo da usina integrada com as outras etapas do processo. A linha tracejada laranja representa a integração energética que abrange toda a planta, enquanto a linha verde indica as etapas que englobam o escopo do projeto em termos dos balanços desenvolvidos e custos de aquisição considerados.

A partir de uma destilaria de etanol de primeira geração, com capacidade de processamento por safra de 4 milhões de toneladas de cana, utiliza-se dos recursos necessários para a planta de cultivo das microalgas, cujas etapas são: sistema de inóculo; cultivo em tanques abertos do tipo “raceways”; decantação e blowdown; drenagem com membrana e centrífuga; secagem por secadores rotativos. Anexa à planta encontram-se mais duas instalações complementares, sendo a primeira responsável pela digestão anaeróbica da vinhaça e purificação do biogás, e a segunda vinculada à extração com carbono supercrítico dos ácidos graxos da biomassa e conversão destes em biodiesel por meio do processo de transesterificação. Além do biodiesel e do próprio glicerol (gerado na transesterificação), o resíduo da biomassa oriundo da extração supercrítica também pode ser aproveitado como fonte de receita para o consumo do setor pecuário, isto é, ração para a criação de gado.

Com o processo descrito acima, avaliou-se, através das análises mencionadas, quatro diferentes configurações de integração da usina sucroenergética produtora de etanol de primeira geração com a planta de biomassa de microalgas para a venda de biodiesel ao mercado nacional. A tabela a seguir explicita os principais aspectos divergentes de cada um dos cenários:

Tabela 1 – Parâmetros base dos Cenários I a IV.

Parâmetro	Cenário I	Cenário II	Cenário III	Cenário IV
Vinhaça crua (ton.h ⁻¹)	703	757	703	757
CO ₂ biogênico (ton.h ⁻¹)	52	58	52	58
Área requerida (ha)	1076	1216	1076	1216
Reagente utilizado	Metanol	Metanol	Etanol	Etanol

Os Cenários I e III consideram como limite de operação a oferta do gás carbônico fermentativo da usina, requisitando menos vinhaça para o cultivo e reposição à planta de microalgas, enquanto os Cenários II e IV aproveitam integralmente da disponibilidade do subproduto da destilaria. O excesso de dióxido de carbono dos dois últimos (6 ton.h⁻¹) é suprido pela oferta do gás gerado pela queima do bagaço e palha (e biogás, a ser comentado no próximo subtópico) da cana-de-açúcar nas caldeiras das unidades de cogeração, que em totalidade pode fornecer, dada a capacidade da usina, até **175,2 ton.h⁻¹** de CO₂. Ressalta-se que a área requerida, assim como o excesso de dióxido de carbono nos Cenários II e IV e a redução de aproveitamento da vinhaça em I e III foram obtidos a partir dos balanços materiais, mas para reforçar as diferenças entre cada um dos quatro já foram expostos previamente.

Com tal balanço mássico, assim como do energético e exergético, foi determinado o cenário mais favorável em termos de performance e índice de irreversibilidade dentro das configurações estudadas. Neste caso, sob tais indicadores, o Cenário I apresentou-se como o de melhor configuração, com a eficiência exergética, N_B, de **48,77%** e índice de irreversibilidade, (I), de **157.000 kW**. Ainda, em relação à análise técnico-econômica, nenhum dos cenários demonstrou-se viável quando comparado o resultado obtido com o preço de venda de biodiesel nacional, no entanto, o Cenário II, a uma dada taxa interna de retorno (TIR), destacou-se entre os demais, apresentando uma razão do preço mínimo de venda (MBSP ratio) de **7,09** em relação ao valor de mercado do biocombustível, ou **US\$ 4,67/L**. Em termos de sensibilidade, o parâmetro que mais afeta o preço mínimo de venda de todos os cenários é a produtividade da alga, ao passo que o CAPEX se mostrou como o principal minimizador do MBSP ratio. Dessa forma, sob o viés de melhoria ou aprimoramento, pesquisas subsequentes devem focar na redução dos principais gargalos relacionados a esta variável, como outras tecnologias e equipamentos que consigam reduzir os custos de aquisição destes no investimento do projeto.

Por fim, com os resultados do projeto pôde-se concluir que, diante da análise exergética, o aumento de escala e a maior necessidade de energia elétrica e vapor desfavorecem a iniciativa. Já sob os aspectos de lucratividade, nenhum dos cenários se aproxima de um preço competitivo em relação ao biocombustível, tendo apenas uma sinalização de que os ganhos de escala, neste caso, favorecem a instalação do projeto, contrariamente à análise anterior. Além disso, não houve alterações significativas com a alteração entre os solventes metanol e etanol, sendo o último, portanto, prioritário, dadas as vantagens para aquisição deste composto (tributações, qualidade e logística) que é produzido na própria usina, diferentemente do metanol.

Assim, ressalta-se que o compromisso firmado na busca do barateamento das tecnologias relacionadas ao cultivo das microalgas e a potencial exploração de integração energética entre as correntes quentes e frias de ambas as plantas podem contribuir para melhores resultados em todas as análises. Contudo, sob um viés realista, isto é, baseado apenas nos resultados atuais, o distanciamento da viabilidade econômica dos projetos é grande, dado que, para que o produto atingisse o mesmo preço mínimo de venda que o do biodiesel comercializado atualmente, seria necessária uma redução de 90% do CAPEX e mais de 80% das necessidades energéticas da planta no melhor dos cenários apresentados, uma possibilidade remota.