

## ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA DA ENERGIA ELÉTRICA GERADA ATRAVÉS DAS MICROALGAS

**Laryssa Ramos Holanda<sup>a</sup>**

<sup>a</sup>Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, PE, Brasil

**Francisco de Sousa Ramos<sup>b</sup>**

<sup>b</sup>Professor Adjunto da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, PE, Brasil

---

### Resumo

*Este trabalho analisa a viabilidade econômica de um processo de produção de microalgas para geração de eletricidade, considerado como uma atividade conjunta com o etanol, de modo a suprir a elevação da demanda prevista de energia ocasionada pelo crescimento econômico do país. A produção dessa fonte de energia alternativa em conjunto com uma usina de etanol maximiza os ganhos de ambas, além de trazer benefícios ao meio ambiente, com as microalgas captando o dióxido de carbono emitido pela usina de etanol. Através de estimativas de custo e produção, uma análise de investimento do projeto de produção de energia a partir de microalgas é feita de acordo com os critérios do valor presente líquido, da taxa interna de retorno e da razão benefício/custo. O resultado obtido com a aplicação dos três critérios é a confirmação da viabilidade econômica do processo produtivo de microalgas para geração de bioeletricidade no Brasil.*

**Palavras-chave:** Microalgas. Eletricidade. Análise de investimento.

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente vem crescendo a importância de estudos que visam solucionar o problema que o crescimento econômico desvinculado de desenvolvimento e o consumo inconsciente nos causou: o aquecimento global, decorrente das excessivas emissões de gases na atmosfera.

Estudos afirmam que o crescimento econômico possui uma grande ligação com o consumo de energia elétrica, dado que quanto maior o poder aquisitivo do indivíduo menos satisfeito esse indivíduo estará com seus bens e passará a comprar novos, e em maior quantidade, aparelhos eletroeletrônicos, o que gera um aumento na demanda por eletricidade (ANDRADE & LOBÃO, 1997).

Ao analisarmos o crescimento econômico brasileiro e o aumento da oferta interna de energia – OIE, percebe-se que na última década o Produto Interno Bruto (PIB) tem apresentado taxas de crescimento acima das da oferta de energia, levando a muitas discussões a respeito da capacidade de geração de energia elétrica do país. Além disso, o Ministério de Minas e Energia divulgou, em seu Plano Decenal de Expansão Energética 2007/2016 (2007), que estudos realizados por órgãos ligados ao setor energético nacional têm evidenciado a tendência de que a demanda por energia irá superar a capacidade de geração do país.

Essa questão do país ser ou não auto-suficiente no setor energético foi mais enfatizada com o evento do apagão que ocorreu em 2001, onde foram estabelecidos tetos de consumo de energia para todos os setores da economia nas regiões Nordeste, Sudeste e Centro-Oeste, e nos estados do Pará, Maranhão e Tocantins.

Entre tantas fontes de energia surge uma nova fonte candidata a saciar o aumento na demanda por energia elétrica no país: a combustão da biomassa de microalgas.

A produção das microalgas reduz, através da fotossíntese, o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) em excesso existente na atmosfera, e devolve o oxigênio ( $\text{O}_2$ ), além disso, sua queima não libera mais  $\text{CO}_2$  do que é consumido, reduzindo assim o grave problema do efeito estufa.

Dentro do contexto de expansão energética no país, a produção de energia através das microalgas torna-se uma alternativa possivelmente viável, tendo em vista as condições propícias de temperatura e a grande costa litorânea brasileira.

O objetivo do trabalho é analisar a viabilidade econômica do processo produtivo de microalgas para geração de eletricidade, tentando resolver os problemas do déficit energético e do uso indiscriminado dos recursos naturais, diversificando a matriz energética brasileira.

## 2. CRESCIMENTO ECONÔMICO E A DEMANDA POR ELETRICIDADE

Com uma área de 8,5 milhões de  $\text{km}^2$  o Brasil é o quinto maior país do mundo depois da Rússia, Canadá, China e Estados Unidos. Sua extensão cobre quase a metade da América do Sul (47,3%), fazendo fronteira com dez países: Argentina, Bolívia, Colômbia, Guiana Francesa, Guiana, Paraguai, Peru, Suriname, Uruguai e Venezuela. O oceano Atlântico estende-se por toda costa leste do país, oferecendo 7.367 km de orla marítima.

Em 2009 o país se apresentou como oitava economia mundial, atrás apenas dos Estados Unidos, Japão, China, Alemanha, França, Reino Unido e Itália (BANCO MUNDIAL, 2010). O Gráfico 2.1 apresenta a evolução do PIB brasileiro entre os anos de 1995 e 2008, segundo o IBGE (2010). O panorama atual da economia aponta para baixa vulnerabilidade externa, estabilidade monetária e taxas de crescimento contínuas.

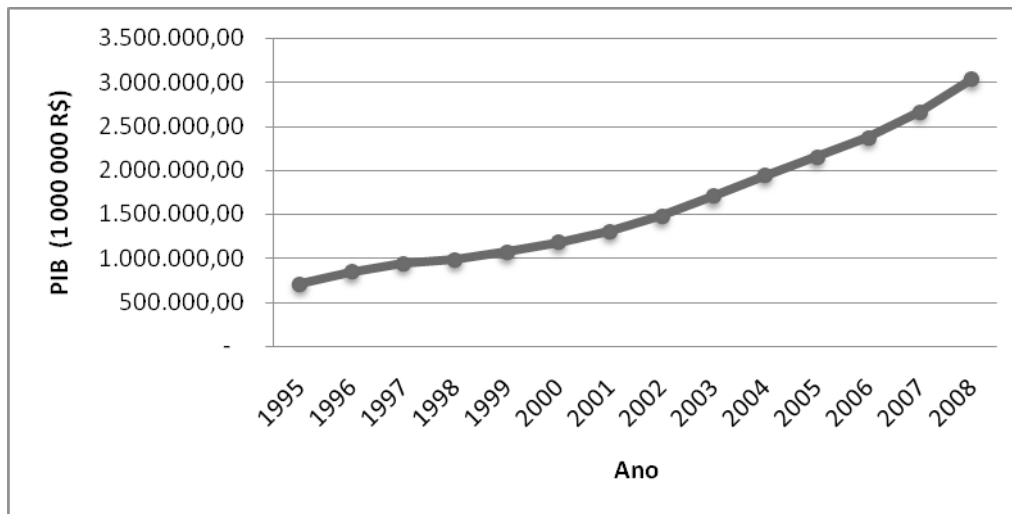


Gráfico 2.1: Evolução do PIB brasileiro entre os anos 1995 a 2008

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados do IBGE (2010)

Como o crescimento da economia o consumo de energia no país também está aquecido, como pode ser visualizado no Gráfico 2.2, a demanda por energia foi intensificada a partir do ano de 2001. Isso acontece porque energia é um dos principais insumos da indústria, se há incentivos para indústrias no país o consumo de energia cresce e a economia do país também, se a economia cresce a renda dos trabalhadores aumenta, possibilitando a aquisição de mais eletroeletrônicos, o que mais uma vez, aquece o consumo de energia.

Segundo Andrade e Lobão (1997), a ampliação no consumo de energia elétrica nas residências certamente é decorrente da crescente entrada de aparelhos eletroeletrônicos no ambiente doméstico, aumentando assim o estoque total dos mesmos, e provavelmente do maior uso dos equipamentos já existentes. Isso foi permitido por causa da duplicação do PIB brasileiro no período de 2002 a 2008, o que aumentou a renda da população e consequentemente o consumo das famílias.

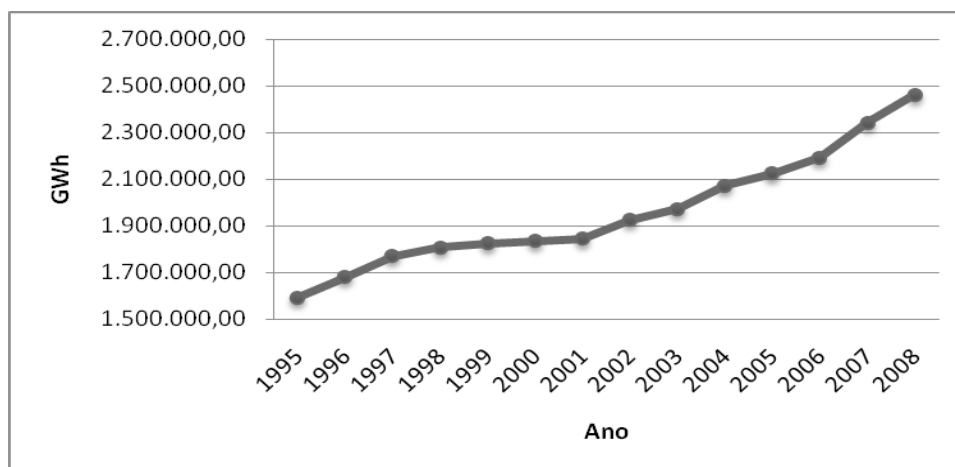


Gráfico 2.2: Evolução da demanda de energia no Brasil (1995-2008)

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados do Balanço Energético Nacional – BEN 2009 (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2009)

Segundo resultados do Balanço Energético Nacional – BEN 2009 (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2009), ano base 2008, o consumo final energético por fonte está mostrado no Gráfico 2.3

onde se observa que a eletricidade representa 17% do consumo final ficando atrás apenas do óleo diesel – 18%, sendo, portanto a segunda forma de energia mais consumida no país.

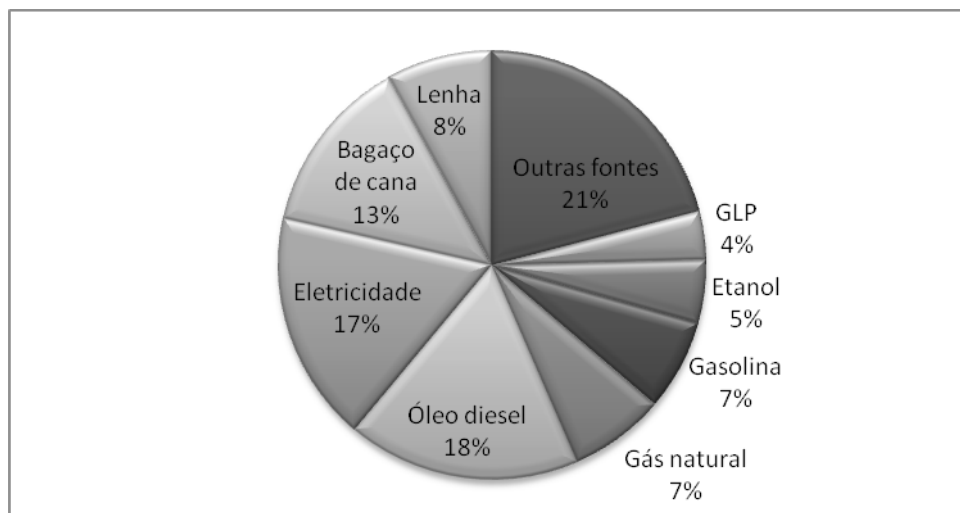


Gráfico 2.3: Consumo final energético por fonte no Brasil em 2008

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados do Balanço Energético Nacional – BEN 2009 (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2009)

No entanto, ao analisarmos a oferta interna de energia (OIE) e o crescimento econômico brasileiro e percebe-se que, o PIB vem crescendo à taxas superiores a oferta de energia, como pode ser visualizado no Gráfico 2.4.

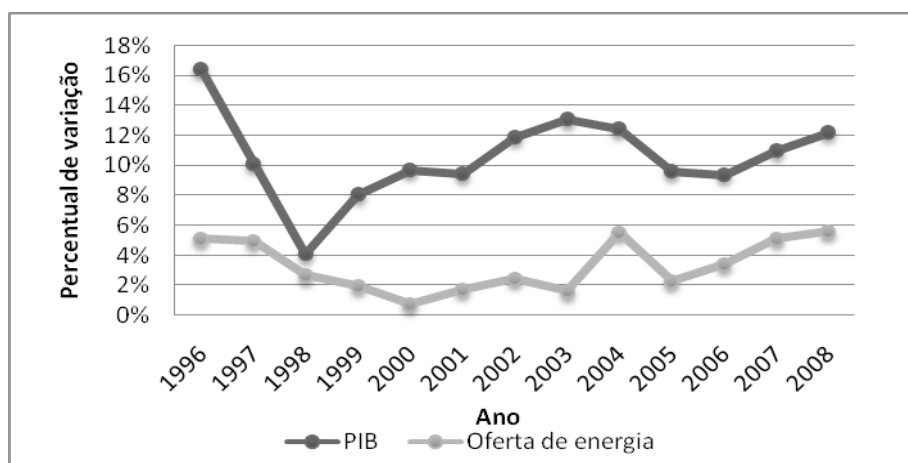


Gráfico 2.4: Evolução das taxas de crescimento do PIB e de oferta de energia no Brasil (1996-2008)

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados do IBGE (2010) e Balanço Energético Nacional – BEN 2009 (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2009)

No Brasil, dentre as fontes primárias e secundárias de energia a fonte hidráulica é a que mais contribui para produção de energia elétrica (66%) estando os locais produtores em regiões quase sempre distantes dos centros consumidores (Gráfico 2.5). Com isso são necessárias grandes extensões de linhas de transmissão e instalações para repartir e distribuir a energia nos centros de consumo.

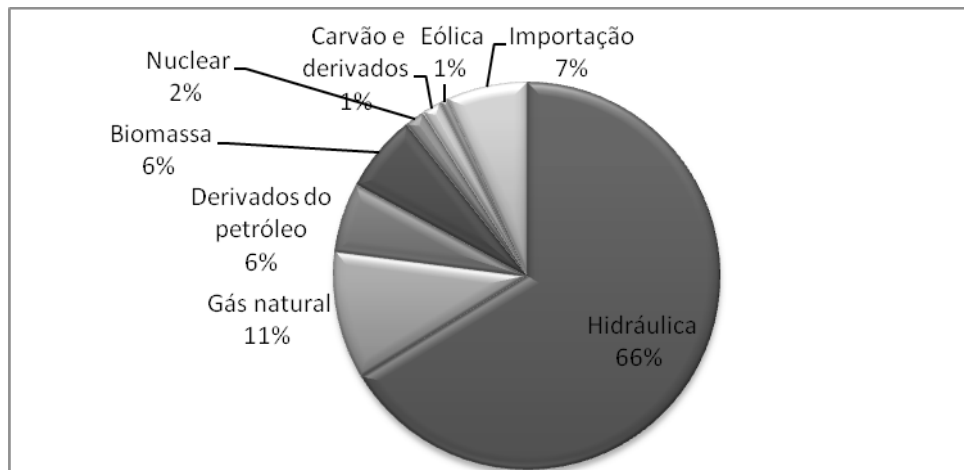


Gráfico 2.5: Estrutura da oferta de energia elétrica no Brasil em 2008

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados do Balanço Energético Nacional – BEN 2009 (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2009)

A investigação de uma nova fonte de energia é necessária de modo a diversificar a matriz energética brasileira, fazendo com que a oferta interna de energia acompanhe o crescimento econômico do país.

### 3. AS MICROALGAS COMO FONTE DE ENERGIA<sup>1</sup>

As algas compreendem vários grupos de seres vivos aquáticos e autotróficos, ou seja, que produzem a energia necessária ao seu metabolismo através da fotossíntese. Podendo ser divididas em dois grandes grupos: microalgas e macroalgas. As macroalgas marinhas são mais populares por serem maiores e visíveis a olho nu. Já as microalgas se referem a microrganismos unicelulares algais que têm o corpo formado por um talo, isto é, desprovido de raiz, caule e folhas, e possuem clorofilas e/ou outros pigmentos fotossintéticos.

Esses microrganismos algais são a forma mais primitiva das plantas unicelulares, e foram responsáveis pelo fato que o mundo agora dispõe de oxigênio. Eles podem ser encontrados em meio marinho, água doce e no solo e produzem cerca de 60% da biomassa primária na terra.

As microalgas alimentam-se com dióxido do carbono, e com utilização da luz solar transformam o carbono em açúcares e posteriormente em gorduras. No processo liberam oxigênio, igual a todas as outras plantas, mas de forma mais eficiente.

O interesse no estudo de microrganismos fotossintéticos, como as microalgas, tem crescido nos últimos anos, pela importância destes nas diversas cadeias alimentares e pela possibilidade da aplicação comercial de diversas substâncias sintetizadas por estes microrganismos, como, por exemplo, em indústrias alimentar, química, cosmética e farmacêutica, e em áreas como na nutrição humana e animal.

Além da abrangente aplicação comercial citada, podem-se obter diferentes tipos de biocombustíveis. Estes incluem o metano, hidrogênio, bioetanol, ou biodiesel derivado do óleo extraído da biomassa. Os produtos energéticos obtidos são combustíveis limpos, não tóxicos, biodegradáveis e podem ser usados em todos os motores ou aplicações que usam querosene ou derivados do petro-diesel, incluindo automóveis, barcos, centrais de eletricidade, sistemas de aquecimento, geradores e até aviões.

<sup>1</sup> As informações contidas nesse capítulo foram retiradas de Mulder (2009), exceto quando se fizer referência a outros autores.

As microalgas também podem gerar energia elétrica com eficiência. Este processo se dá através da queima da biomassa desses microrganismos, para cada tonelada de biomassa queimada 8,12 MWh são gerados. Essa seria uma alternativa sustentável para aumentar a oferta de energia elétrica no Brasil, pois a queima da biomassa algal não libera mais CO<sub>2</sub> do que foi consumida na produção, por isso se trata de uma energia de “emissão zero”.

O cultivo de microalgas pode ser realizado em condições não adequadas para a produção de culturas convencionais, não necessitando de terras aráveis ou férteis para produção, pois não utiliza o solo como habitat de sustentação. Por esse motivo o solo pode ser desértico, com baixo valor econômico para outros usos e com alta irradiação solar. Além disso, a produção dessas algas apresenta custos relativamente baixos de colheita, transporte e de gasto de água, quando comparados aos de cultivo de plantas. Este cultivo pode ser em meio salino, doce, ou ainda, em alguns casos, em águas residuais de processos industriais ou urbanos.

Para a produção de microalgas é necessário, principalmente de CO<sub>2</sub>, esses microrganismos apresentam eficiência fotossintética maior que os vegetais terrestres, com crescimento e acúmulo rápido de biomassa vegetal. Ou seja, produzem mais biomassa por hectare em menos tempo. As microalgas também são eficientes fixadoras de carbono atmosférico, fixam mais carbono através da fotossíntese em muito menos tempo. Estima-se que cada tonelada de biomassa algal produzida consome cerca 1,7 toneladas de CO<sub>2</sub> através da fotossíntese. Isso representa de vinte a quarenta vezes mais do que o absorvido pelas culturas oleaginosas.

Além de dióxido de carbono o cultivo de microalgas precisa de luz para realizar fotossíntese, que para minimizar custos a produção deve contar com a luz solar livremente disponível, apesar das variações diárias e sazonais nos níveis de luz. A temperatura propícia para a produção deve permanecer entre 25°C e 35°C, que é a temperatura normal do nordeste brasileiro. Por fim, para o crescimento desses microrganismos, são necessários nutrientes, como ferro, potássio, fósforo e nitrogênio.

A natureza unicelular desses seres assegura uma biomassa com mais pureza bioquímica, ao contrário das plantas terrestres que tem compostos diferentes em diferentes partes do vegetal (frutos, folhas, sementes e raízes).

As microalgas possuem produção contínua, ou seja, não segue regime de safra e a colheita é diária. A *Nannochloropsis oculata* ou *Chlorella vulgaris* são algas de alta produção, com períodos de dobragem variando de 4 a 24 horas.

No cultivo de microalgas podem ser utilizados resíduos de outras produções, como águas residuais contaminadas com resíduos orgânicos de processos industriais, e o sequestro do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) - mitigação dos efeitos nocivos da atividade industrial. A exemplo desse processo o projeto da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Furg) implantou na usina a carvão de Candiota 14 tanques postados ao lado da termoelétrica que servirão para a criação das algas, com o intuito de capturar parte das emissões de gases desta usina.

Atualmente muitos pesquisadores e produtores comerciais vêm desenvolvendo diversas tecnologias de cultivo utilizadas para produção de biomassa de microalgas. Esses sistemas de produção podem ser divididos em dois grupos: os a céu aberto (exposição total ao ambiente) e o cultivo em fotobiorreatores.

O cultivo em sistemas de tanques a céu aberto tem sido usado desde a década de 1950 e é o mais utilizado atualmente, porque eles custam menos para construir e operar. Geralmente é um canal de circuito fechado de recirculação, construído de concreto e chão batido, podendo ser forrado com plástico branco. Com cerca de 30 cm de profundidade, possui uma roda de pás que opera o tempo todo para impedir a sedimentação. Diariamente a cultura é alimentada continuamente na frente da roda de pás, onde o fluxo começa, como pode ser observado na Figura 3.1.



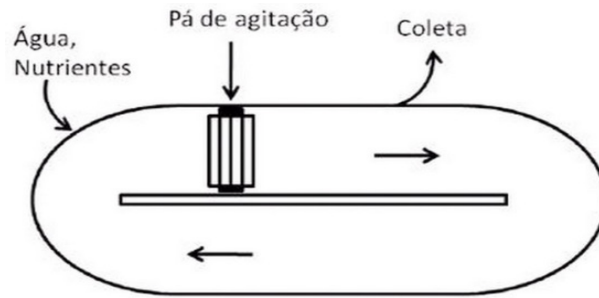


Figura 3.1: Esquema de um tipo de cultivo a céu aberto.

Fonte: Chisti (2007)

Segundo Teixeira & Morales (2006), esse tipo de cultivo permite colheitas anuais de cerca de 180 toneladas por hectare. A produtividade é reduzida pela possibilidade existente de contaminação (competição) e predação por parte de outros microrganismos. É um sistema pouco sofisticado, pela impossibilidade de controlar parâmetros biológicos e físico-químicos. Por ser um sistema a céu aberto a captação do  $\text{CO}_2$  não é eficiente, havendo perdas para atmosfera. Neste tipo de cultivo o consumo de água é superior além dos circuitos ocuparem muito espaço.

Por outro lado, o cultivo em fotobiorreatores proporciona um volume maior da produção, por ser possível garantir intervalos ótimos de parâmetros que favorecem o crescimento das espécies, além de se obter, pela ausência de contaminação, um produto final (biomassa algal) semelhante à produzida anteriormente, de modo a garantir a qualidade e quantidade dos compostos a extrair.

A produção de microalgas dentro de um fotobiorreator cria um ambiente propício em termos de luminosidade e temperatura à produção de microalgas que constituirão a matéria-prima para a produção de biomassa.

Um fotobiorreator tubular consiste de uma matriz de tubos transparentes que são montados e alinhados em postos, e normalmente são feitos de plástico, PET, acrílico ou vidro. Os tubos são coletores solares que geralmente possuem 10 cm de diâmetro ou menos. O diâmetro do tubo é limitado porque a luz não penetra tão profundamente no caldo denso da cultura, o que é necessário para garantir uma alta produtividade da biomassa no fotobiorreator.

Os tubos são colocados em horizontal paralelamente uns aos outros, são muitas vezes organizados como uma cerca, na tentativa de aumentar o número de tubos que podem ser acomodados em uma determinada área. O chão embaixo do coletor solar é muitas vezes pintado de branco para aumentar a refletância. Como pode ser observado na Figura 3.2, o caldo de microalgas é distribuído a partir de um tanque para os tubos e depois retorna para o tanque de recirculação.

Uma bomba, um sistema de válvulas e ligações adequadas permitem a passagem e controle do fluxo entre os reatores e o tanque. As microalgas reproduzem-se a um ritmo elevado nos tubos do fotobiorreator e, seguidamente vão para o depósito sendo, no momento propício, colhidas no fundo, e canalizadas para um dispositivo que separa as microalgas da água. A água deve ser reutilizada para aproveitar os nutrientes nela contida e reduzir o consumo de água, esse processo pode ser melhor visualizado na Figura 3.3.

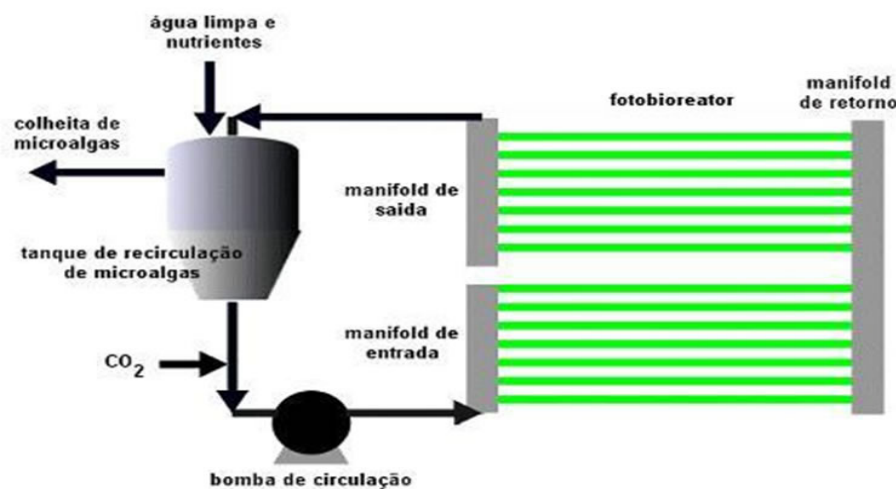


Figura 3.2: Esquema dos fotobiorreatores

Fonte: Excalibur Project (2010)

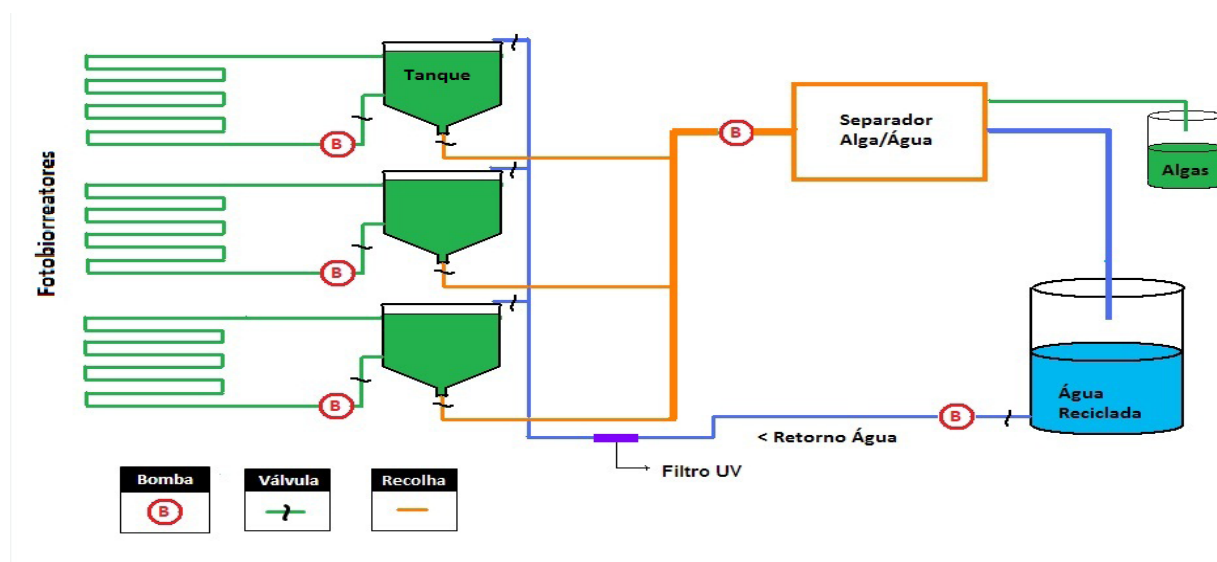


Figura 3.3: Esquema dos fotobiorreatores e reciclagem de água

Fonte: Mulder & Oliveira (2010)

Além da vantagem de consumir pouca água, os fotobiorreatores ocupam pouco espaço, um metro quadrado de área usada para cultivo de microalgas pode ser estendido verticalmente produzindo centenas de vezes mais do que algumas plantações no mesmo espaço, não precisando derrubar mata nativa.

#### 4. PROCESSO PRODUTIVO PROPOSTO

A geração de eletricidade através da queima da biomassa algal no Brasil seria uma alternativa sustentável para aumentar a oferta de energia do país e resolver os gargalos de infra-estrutura que dificultam a entrada de investimentos privados impedindo o crescimento da economia.

Com o intuito de maximizar a produção dessa fonte de energia Mulder & Oliveira (2010) desenvolveram um projeto do processo produtivo de modo a se realizar em conjunto com a produção de etanol de uma usina de cana-de-açúcar que usa o bagaço da cana para a geração de energia elétrica como subproduto. O fluxo do processo de produção elaborado pode ser visualizado na Figura 4.1.



Os custos de produção de microalgas para a geração de bioeletricidade são reduzidos quando o processo é feito em conjunto com a produção de uma usina de cana-de-açúcar, pois todo  $\text{CO}_2$  emitido pelo processo de fermentação do etanol é absorvido pelas algas. Para cada 1.000 litros produzidos de álcool são emitidos 800 kg de  $\text{CO}_2$ , que é suficiente para produzir 470 kg de biomassa algal, esta quantidade queimada gera cerca de 3,82 MWh.

Além de todo  $\text{CO}_2$  necessário para a produção de microalgas, também se tem custo zero com a água utilizada no processo, pois pode ser utilizada a água do sistema de lavagem da cana.

Como já mencionado, a produção de algas necessita de luz para a realização da fotossíntese. Nesse processo produtivo seria utilizada a luz solar durante o dia e o uso de lâmpadas durante a noite, pois a produção seria em larga escala e necessitaria realizar fotossíntese durante a noite também.

A produção das microalgas se daria em fotobiorreatores construídos de acordo com a quantidade desejada a ser produzida. Nos fotobiorreatores as algas são alimentadas com nutrientes e  $\text{CO}_2$ , e através da fotossíntese se reproduzem e liberam oxigênio ( $\text{O}_2$ ). Para cada tonelada de  $\text{CO}_2$  absorvida são liberados cerca de 500 kg de  $\text{O}_2$ . Esse  $\text{O}_2$  pode ser vendido gerando receita para a produção de microalgas.

Depois da separação do  $\text{O}_2$ , as algas passam por um processo de engorda até chegar ao processo de colheita. Em seguida são separadas da água em um processo no qual o ar é inserido por baixo de um compartimento onde o caldo (água + microalgas) está armazenado formando muitas bolhas, fazendo com que, através de um processo de decantação, as microalgas se concentrem na superfície separando-as da água.

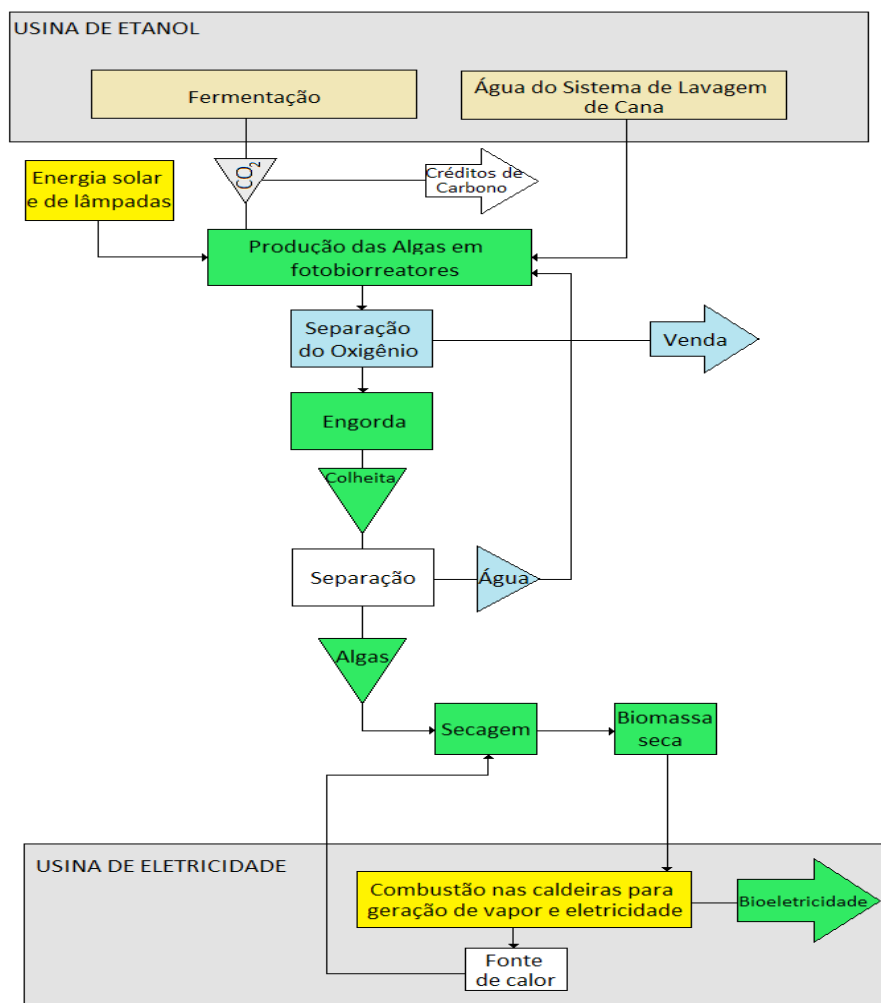


Figura 4.1: Fluxo do processo produtivo de microalgas

Fonte: Mulder & Oliveira (2010)

Depois da separação do  $O_2$ , as algas passam por um processo de engorda até chegar ao processo de colheita. Em seguida são separadas da água em um processo no qual o ar é inserido por baixo de um compartimento onde o caldo (água + microalgas) está armazenado formando muitas bolhas, fazendo com que, através de um processo de decantação, as microalgas se concentrem na superfície separando-as da água.

Na fase de separação, existe ainda um retorno para as águas recicladas contendo os nutrientes e adubos ainda existentes na água, permitindo reaproveitamento dos mesmos assim como da água.

Depois de extraídas as microalgas passam por um processo de secagem no qual é utilizada água quente em um processo exemplificado na Figura 4.2. A água utilizada nessa fase é aquecida pelo calor proveniente da combustão nas caldeiras.

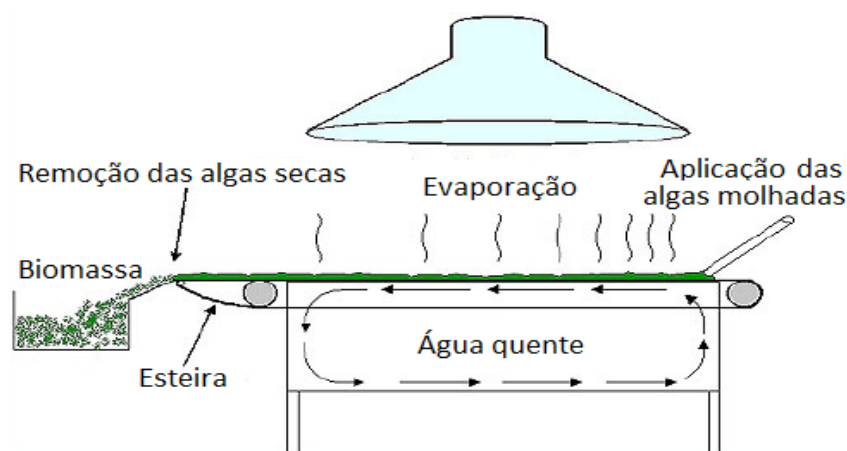


Figura 4.2: Processo de secagem das microalgas

Fonte: Mulder & Oliveira (2010)

Depois de seca a biomassa está pronta para ser queimada e gerar energia elétrica. A combustão da biomassa das algas deve ser realizada nas mesmas caldeiras utilizadas na queima do bagaço da cana, gerando bioeletricidade.

O processo em conjunto com a usina de etanol maximiza a produção de microalgas. Desse processo obtêm-se receitas oriundas de créditos de carbono, venda de oxigênio puro e energia elétrica.

Atualmente a maioria das usinas de cana-de-açúcar do país gera energia elétrica<sup>2</sup>, porém a produção sucroalcooleira só está em atividade durante a safra da cana, no restante do ano os equipamentos ficam ociosos. Desse modo, a eletricidade de microalgas seria um produto complementar ao bagaço da cana nos meses de safra e substituto no restante do ano.

A produção de microalgas aumentaria a produtividade da indústria de etanol, através da utilização dos resíduos de seu processo produtivo capaz de produzir biomassa com baixo consumo energético para a geração de bioeletricidade nas instalações existentes.

O sequestro de carbono reduziria o índice de emissão da usina, melhorando a percepção de sustentabilidade da produção de etanol perante a comunidade e os mercados internacionais.

<sup>2</sup> Segundo a ANEEL (2002) existem 319 usinas no Brasil que produzem eletricidade, possuindo capacidades de geração de até 111 MWh (Usina Bonfim, em Guariba/SP).

#### 4.1. ESTIMAÇÃO DO INVESTIMENTO NECESSÁRIO

Para a geração de 10MWh de bioeletricidade é necessário a produção de 30 toneladas de microalgas por dia, para isso é preciso a absorção de 51 toneladas de CO<sub>2</sub> sem custo nenhum, pois essa quantidade é emitida diariamente pelas usinas de etanol.<sup>3</sup>

Para a produção de microalgas ser implantada seria necessário investimento em mão de obra, na instalação da iluminação, na confecção dos fotobiorreatores e dos sistemas de separação e secagem das algas.

Para a produção de 30 toneladas de algas é preciso a confecção de 50 fotobiorreatores. Cada fotobiorreator é constituído de 3 reatores de 30 tubos de altura com 15 metros de comprimentos montados longitudinalmente aos pares. Os tubos devem ser ligados nos extremos de modo a formar uma serpentina.

Para a construção de 50 fotorreatores serão necessários tubos PET transparentes de 5 metros, com diâmetro interno de 72 mm e 3 mm de parede, além de luvas de junção, joelhos de 90°, válvulas, tanques de 10 m<sup>3</sup>, bombas peristálticas, abraçadeiras e estruturas montantes totalizando um investimento de R\$ 1.080.180,00 (os custos e as quantidades de cada material estão listados na Tabela 4.1).

Tabela 4.1: Custo dos materiais para confecção dos fotobiorreatores a preços correntes de 2010

Material	Unidade	Preço da unidade (R\$)	Total (R\$)
Tubos PET	27.000	8,84	238.680,00
Luvas de junção	18.000	3,50	63.000,00
Joelhos 90°	18.000	3,75	67.500,00
Válvulas	300	120,00	36.000,00
Tanques de 10m <sup>3</sup>	50	3.500,00	175.000,00
Bombas Peristálticas	50	4.000,00	200.000,00
Abraçadeiras	75.000	2,00	150.000,00
Estrutura Montante	1.050	142,85	150.000,00
Fotobiorreatores	50	-	1.080.180,00

Fonte: Elaboração própria, com dados/estimativas de Mulder & Oliveira (2010)

Para a iluminação noturna o investimento em um sistema de captação de energia solar reduziria o custo mensal com energia. Para a iluminação dos fotobiorreatores são necessários 400 coletores solar cada um custando R\$ 250,00, totalizando um investimento de R\$ 100.000,00.

Estima-se que para construção dos processos de separação e secagem das algas é preciso um investimento de R\$ 200.000,00 em cada processo. Com mão-de-obra o investimento estimando é de R\$ 1.300.000,00. Os investimentos na implantação do processo produtivo de microalgas podem ser visualizados na Tabela 4.2.

Ao compararmos com os investimentos na produção de outras fontes de energia alternativa pode-se comprovar que a geração através das microalgas apresenta investimento inferior, pois, segundo a Agência de Desenvolvimento Econômico de Pernambuco (Addiper), 12 turbinas eólicas que estão sendo instaladas em Pernambuco irão gerar 8 MWh com um investimento de R\$ 150 milhões. Com relação à energia solar, segundo a ANEEL (2002), para a geração de 10 MWh é necessário um investimento de R\$ 115 milhões, esse valor é explicado pelo alto custo das células solares, que fazem a conversão da radiação solar para energia elétrica.

3 Para captação de 51 toneladas de CO<sub>2</sub> é necessário que uma usina produza aproximadamente 64 mil litros de etanol por dia, a maioria das usinas tem produção superior, como é o caso da Usina Itaenga, em Pernambuco, que produz cerca de 400 mil litros por dia (Grupo Petribu, 2010).

Tabela 4.2: Estimativa dos investimentos necessários para a produção de microalgas a preços correntes de 2010

<b>Processo</b>	<b>Investimento (R\$)</b>
Fotobiorreatores	1.080.180,00
Iluminação	100.000,00
Separação	200.000,00
Secagem	200.000,00
Mão de obra	1.300.000,00
<b>Total</b>	<b>2.880.180,00</b>

Fonte: Elaboração própria, com dados/estimativas de Mulder & Oliveira (2010)

Após a implantação a produção de microalgas apenas apresentará custos mensais de operação, sem necessidade de outros investimentos.

#### 4.2. ESTIMAÇÃO DOS CUSTOS DE PRODUÇÃO

Os custos de operação correspondem aos nutrientes para alimentação das algas, mão-de-obra e a energia do processo, com a exceção da iluminação dos fotobiorreatores fornecida pelo sistema de captação solar, e da energia gasta para aquecer a água na fase de secagem das algas. É preciso cerca de 7 MWh para aquecer toda a água necessária para a secagem das algas, esse consumo não é contabilizado como custo porque a queima da biomassa algal gera calor que é suficiente para a secagem, sem custo, pois o calor das caldeiras geralmente é perdido sem adicionar valor agregado para o produto final. Na Tabela 4.3 são apresentados os custos de operação do processo de produção proposto, considerando 30 dias no mês e 200 dias no ano (produzindo apenas nos meses que a usina de etanol se encontra ociosa).

Tabela 4.3: Estimativa dos custos de operação do processo de produção das microalgas a preços correntes de 2010

<b>Descrição</b>	<b>Custo/Mês (R\$)</b>	<b>Custo/ano (R\$)</b>
CO <sub>2</sub>	0	0
Água	0	0
Nutrientes	12.000,00	80.000,00
Iluminação dos Fotobiorreatores	0	0
Energia do Processo	6.000,00	40.000,00
Energia da Secagem	0	0
Mão de obra	6.000,00	40.000,00
<b>Total</b>	<b>24.000,00</b>	<b>160.000,00</b>

Fonte: Elaboração própria, com dados/estimativas de Mulder & Oliveira (2010)

#### 4.3. ESTIMAÇÃO DAS RECEITAS

O processo de produção de algas além de gerar 10 MWh de eletricidade, gerando receitas, também obtém-se receita com a venda do O<sub>2</sub> liberado na produção das microalgas, no entanto, essa receita não irá ser considerada pois não se tem idéia dos custos dos equipamentos para captação e armazenamento do oxigênio. Na geração de 10 MWh são liberados 25,5 toneladas de O<sub>2</sub> por dia através da absorção de 51 toneladas de CO<sub>2</sub>, que também gera receitas para o processo, remunerando cada tonelada de CO<sub>2</sub> absorvida. Na Tabela 4.4 estão listadas as receitas obtidas com a produção de microalgas, considerando 30 dias do mês e apenas 200 do ano (considerando a produção apenas nos meses de ociosidade da usina).

Tabela 4.4: Receitas oriundas do processo produtivo de microalgas

Produção	Preço da unidade	Quantidade/ Mês	Receita/ Mês (R\$)	Quantidade/ Ano	Receita/ Ano (R\$)
Bioeletricidade	156,00/ MWh	7.200 MWh	1.123.200,00	48.000 MWh	7.488.000,00
Créditos de Carbono	31,50/ tonelada	1.530 toneladas	48.195,00	10.200 toneladas	321.300,00
<b>Total</b>	-		1.171.395,00		7.809.300,00

Fonte: Elaboração própria, com dados/estimativas de Mulder & Oliveira (2010)

Tendo em mãos as estimativas de investimentos, custos e receitas, é de grande relevância verificar a viabilidade econômica do projeto de implantação do processo de produção de energia elétrica através da queima da biomassa de microalgas no Brasil.

## 5. METODOLOGIA

Por meio de alguns critérios da matemática financeira objetiva-se fazer uma análise da viabilidade econômica da implantação do processo produtivo de microalgas a fim de gerar energia alternativa no Brasil. Através da análise de investimentos têm-se instrumentos para a tomada de decisão econômico-financeira.

O investimento é entendido como toda aquela aplicação de recursos no presente objetivando auferir receitas líquidas futuras, tanto através da produção/elaboração de novos bens e serviços, como na expansão de uma atividade econômica.

Para avaliar a viabilidade econômica do processo produtivo de microalgas serão adotados os seguintes critérios da análise de investimento: Valor Presente Líquido, Taxa Interna de Retorno e, a Razão Benefício Custo.

Todos os critérios levam em consideração a taxa mínima de atratividade, que é a taxa de mercado financeiro, a qual remunera o capital aplicado no fluxo de caixa.

Na análise será levado em consideração o investimento na implantação, os custos de operação (produção) e as receitas provenientes da produção de microalgas.

### 5.1. CRITÉRIO DO VALOR PRESENTE LÍQUIDO (VPL)

Segundo Ferreira (2000), esse critério mensura o lucro ou prejuízo líquido de um projeto antes de sua implementação, recebendo como resposta o VPL do projeto em análise. Com a equação (5.1) obtemos o VPL do projeto. Para o projeto em análise apresentar viabilidade econômica precisa oferecer um VPL positivo.

$$VPL(i_M) = -I + \sum_{t=0}^n \frac{R_t - C_t}{(1+i_M)^t} \quad VPL(i_M) = -I + \sum_{t=0}^n \frac{R_t - C_t}{(1+i_M)^t} \quad (5.1)$$

onde:

VPL = Valor presente líquido do projeto de investimento;

I = Investimento ou capital aplicado;

$R_t$  ( $t = 0, 1, 2, \dots, n$ ) = Receita ou benefício financeiro ao final do período “t”;

$C_t$  ( $t = 1, 2, \dots, n$ ) = Custo ou despesa financeira ao final do período “t”;

$n$  = Vida útil, vida produtiva ou horizonte de planejamento da alternativa analisada;

$i_M$  = Taxa mínima de atratividade fornecida pelo mercado financeiro ou custo de oportunidade do capital a investir.

Para a análise da viabilidade do projeto do processo produtivo das microalgas além do cálculo do VPL, será feita uma análise de sensibilidade correlacionando o VPL com um intervalo de taxas mínimas de atratividade para determinar a que taxas o investimento é viável.

## 5.2. CRITÉRIO DA TAXA INTERNA DE RETORNO (TIR)

A avaliação econômica através desse critério é simplesmente a determinação de uma taxa incógnita “i” na equação (5.1), representativa do VPL, igualando a zero. Essa incógnita é a taxa interna de retorno da alternativa de investimento. O resultado significa a própria taxa de lucro periódica do projeto analisado (FERREIRA, 2000).

O parâmetro que irá decidir sobre a viabilidade econômica do projeto será o custo de oportunidade do capital a investir, representado pela taxa mínima de atratividade ( $i_M$ ). O confronto entre a taxa interna de retorno do projeto ( $i$ ) e a taxa mínima de atratividade ( $i_M$ ) indicará se há ou não retorno quando se executa o projeto em análise. Compreendendo:

Se  $i > i_M$  = o projeto é rentável economicamente e, portanto, deverá ser realizado.

Se  $i < i_M$  = o projeto deve ser rejeitado economicamente e o investimento deve ser aplicado no mercado de capitais.

Se  $i = i_M$  = indiferença na aplicação dos recursos financeiros.

No projeto em análise será determinada a TIR e o confronto com a taxa mínima de atratividade deve ser feito, determinando se o processo produtivo das microalgas apresenta retorno.

## 5.3. CRITÉRIO DA RAZÃO BENEFÍCIO/CUSTO (B/C)

O indicador deste critério consiste na relação entre o valor presente dos benefícios e o valor presente dos custos, afirmando-se que o projeto é economicamente viável quando esse indicador -  $R(i_M)$  - for maior que a unidade, ou, no limite, igual a esta, no mínimo.

$$R(i_M) = \frac{VPL \text{ Benefícios}}{VPL \text{ Custos}} R(i_M) = \frac{VPL \text{ Benefícios}}{VPL \text{ Custos}} \quad (5.2)$$

A sistemática da razão benefício/custo é a seguinte:

$$R(i_M) = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+i_M)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+i_M)^t}} R(i_M) = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+i_M)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+i_M)^t}} \quad (5.3)$$



onde:

$R(i_M)$  = Razão benefício/custo atualizado à taxa mínima de atratividade ( $i_M$ );

$B_t$  = Benefícios na data “t”;

$C_t$  = Custo na data “t”;

$i_M$  = Taxa mínima de atratividade.

Na análise benefício/custo do processo produtivo de microalgas o custo será interpretado como os custos de investimento na implantação e custos de operação (cultivo, extração e produção), e os benefícios estão relacionados às receitas anuais oriundas da bioeletricidade e dos créditos de carbono.

#### 5.4. DADOS

Os dados utilizados nesse trabalho são estimativas feitas pelos pesquisadores Jan Mulder e Paulo Oliveira (2010) das quantidades dos materiais necessários para construção do processo produtivo, com base em experimentos em laboratório/protótipo, aliados a uma pesquisa de preços feita em diversas empresas. Vale ressaltar que as estimativas foram necessárias, devido o método de produção ser inovador, não possuindo dados precisos desse tipo de processo produtivo. Já os dados de demanda e oferta de eletricidade no Brasil foram retirados do Balanço Energético Nacional.

### 6. RESULTADOS

Através das estimativas dos custos e receitas anuais oriundas do processo de produção de microalgas em conjunto com a produção em uma usina de etanol esquematizou-se um fluxo de caixa para um período de 8 anos, que é a vida útil do investimento, pois no 9º ano estima-se que alguns equipamentos estarão defasados e outros precisando de manutenção, sendo necessário um novo investimento. Como pode ser visto no fluxo de caixa da Figura 6.1, com um investimento estimado de R\$ 2.880.180,00 na implantação do processo, obtém-se receitas anuais de R\$ 7.809.300,00, provenientes da venda de bioeletricidade e da aquisição dos créditos de carbono, e tendo custos de produção anuais de R\$ 160.000,00.

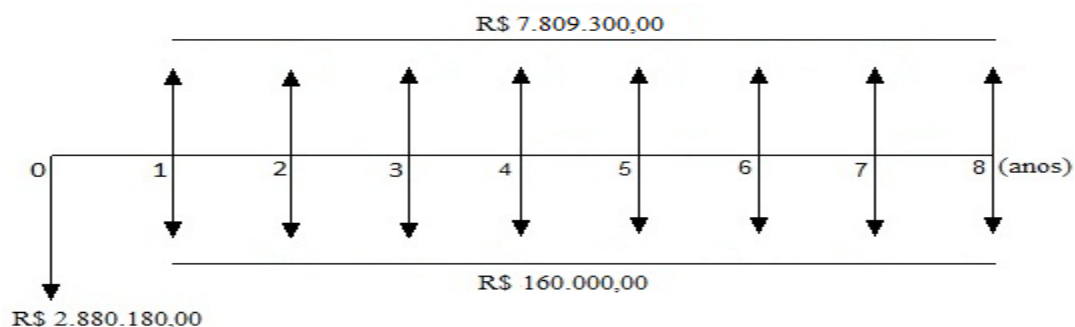


Figura 6.1: Fluxo de caixa da movimentação financeira da produção de microalgas

Fonte: Elaboração própria

Como já mencionado, o valor presente líquido (VPL) mensura o lucro ou prejuízo líquido de um projeto antes de sua implementação. Para a avaliação do projeto em análise adotou-se uma taxa de juros de 12% ao ano, que é aproximadamente a taxa de juros aplicada no mercado financeiro, essa seria a taxa mínima de atratividade ( $i_M$ ), ou seja, é o custo de oportunidade do capital a investir nesse projeto. Com a adoção da taxa de juros o VPL desse projeto é:

$$VPL (i_M) = -I + \sum_{t=0}^n \frac{R_t - C_t}{(1+i_M)^t} \quad (5.1)$$

$$VPL (12\%) = -2.880.180 + \sum_{t=1}^8 \frac{7.809.300 - 160.000}{(1+0,12)^t}$$

$$VPL (12\%) = -2.880.180 + \sum_{t=1}^8 \frac{7.649.300}{(1,12)^t}$$

$$VPL (12\%) = R\$ 35.118.786,87$$

Sob a ótica do critério do valor presente líquido o investimento no projeto de produção de microalgas é viável, pois o VPL deste é maior que zero.

Ainda de acordo com o critério do VPL pode-se afirmar que a partir do primeiro ano de produção já se tem todo o retorno do investimento feito no início, e ainda obtém-se lucro líquido de R\$ 3.949.552,14, como pode ser acompanhado a seguir:

$$VPL (i_M) = -I + \sum_{t=0}^n \frac{R_t - C_t}{(1+i_M)^t} \quad (5.1)$$

$$VPL (12\%) = -2.880.180 + \frac{7.809.300 - 160.000}{(1+0,12)^1}$$

$$VPL (12\%) = -2.880.180 + \frac{7.649.300}{(1,12)^1}$$

$$VPL (12\%) = R\$ 3.949.552,14$$

A determinação da taxa interna de retorno (i) para esse projeto é importante para determinar se a produção é rentável economicamente.

$$VPL (i) = -I + \sum_{t=0}^n \frac{R_t - C_t}{(1+i)^t} = 0 \quad (5.1)$$

$$0 = -2.880.180 + \sum_{t=1}^8 \frac{7.649.300}{(1+i)^t}$$

$$i = 265,57\% \text{ a.a}$$

Como a TIR (i) é superior ao custo (real) de oportunidade do capital a investir ( $i_M$ ) o projeto da produção de microalgas apresenta rentabilidade econômica e, portanto, é viável.

O Gráfico 6.1 expõe uma análise de sensibilidade do VPL desse projeto em relação às taxas de juros. O VPL é decrescente com as taxas de juros, anulando-se exatamente para uma taxa idêntica à taxa interna de retorno (i). Dessa forma, o investimento no projeto do processo produtivo de microalgas é viável até uma taxa de 265,57% ao ano.

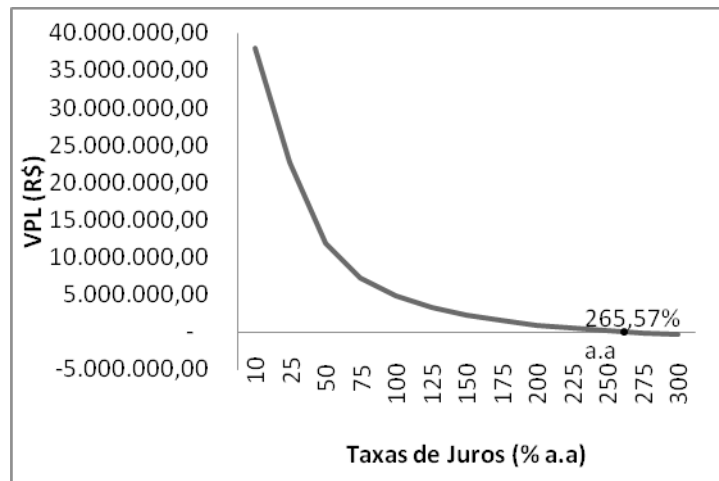


Gráfico 6.1: Valor presente líquido do projeto correspondente às taxas de juros

Fonte: Elaboração própria

O ultimo critério para avaliação desse investimento é a razão benefício/custo, onde os benefícios são as receitas anuais e os custos são os custos de produção anuais e custo de investimento de implantação.

$$R(i_M) = \frac{\text{VPL Benefícios}}{\text{VPL Custos}} \quad (5.2)$$

$$R(i_M) = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+i_M)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+i_M)^t}} \quad (5.3)$$

$$R(12\%) = \frac{\sum_{t=1}^8 \frac{7.809.300}{(1+0,12)^t}}{2.880.180 + \sum_{t=1}^8 \frac{160.000}{(1+0,12)^t}}$$

$$R(12\%) = \frac{38.793.789,23}{3.675.002,36}$$

$$R(12\%) = 10,55$$

A uma taxa de 12% ao ano o projeto oferece benefício líquido de R\$ 38.793.789,23 superior ao custo líquido de R\$ 3.675.002,36, gerando uma razão benefício custo de 10,55 –  $R(12\%) > 1$  – afirmando que o projeto de implantação do processo produtivo de microalgas em conjunto com uma usina de etanol é economicamente viável.

## 7. CONCLUSÃO

Neste trabalho analisou-se o potencial produtivo das microalgas, que além de sua aplicabilidade em diversas áreas como na produção de biocombustíveis e em indústrias alimentar, química, cosmética e farmacêutica, também revela grande potencial na produção de eletricidade.

Um processo produtivo de microalgas para geração de energia elétrica foi proposto a fim de suprir a crescente demanda por eletricidade no Brasil, devido ao forte crescimento econômico do país ocorrido nos últimos anos e previsto para os próximos anos.

O processo produtivo de microalgas em conjunto com a produção de uma usina de etanol maximiza a produção dessa última, pela oportunidade de obter ganhos além dos meses de safra, reduzindo a ociosidade do maquinário, além de maximizar também a produção de microalgas, reduzindo custos de investimento e produção. Além disso, pôde-se verificar a oportunidade de agregar valor a produção de microalgas através dos créditos de carbono e da produção de oxigênio.

Através de estimativas de custos e receitas fez-se uma análise da viabilidade econômica da implantação do processo produtivo de microalgas no país, gerando bioeletricidade.

Para a análise do investimento no projeto de produção de microalgas utilizou-se os critérios do valor presente líquido, da taxa interna de retorno e da razão benefício/custo.

O resultado obtido foi o mesmo através dos três critérios, a afirmação que o projeto do processo produtivo de microalgas é rentável, ou seja, apresenta viabilidade econômica. E o retorno do investimento se dá logo no primeiro ano de produção.

Apesar da restrição de não conseguir trabalhar com dados de produção real, pois ainda não existem, sendo necessário utilizar estimativas, o trabalho dá sua contribuição no sentido de fornecer a comprovação que a produção de eletricidade através da combustão da biomassa algal é viável para o Brasil, dando subsídios para o projeto de produção ser posto em prática, reduzindo os gargalos de infra-estrutura que dificultam o crescimento econômico do país.

## 8. REFERÊNCIAS

AGÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE PERNAMBUCO - ADDIPER. Disponível em: <http://www.addiper.pe.gov.br>. Acesso em: Jan/2010.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica no Brasil**. Disponível em: [www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/livro\\_atlas.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/livro_atlas.pdf). Brasília, ANEEL, 2002. Acesso em: Nov/2010.

ANDRADE, T.; LOBÃO, W. Elasticidade-renda e preço da demanda residencial de energia elétrica no Brasil. **Texto para Discussão**, n. 489. Rio de Janeiro: Ipea, 1997.

BANCO MUNDIAL. Disponível em: [www.worldbank.org/](http://www.worldbank.org/). Acesso em: Dez/2010.

CHISTI, Y. Biodiesel from Microalgae. **Biotechnology Advances**, Elsevier, Palmerston North, Nova Zelândia, v. 25, p. 294–306, 2007.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA/MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (EPE/MME). **Plano Decenal de Expansão Energética 2007/2016**. Brasília, MME, 2007. Disponível em: [www.epe.gov.br/PDEE/20080111\\_2.pdf](http://www.epe.gov.br/PDEE/20080111_2.pdf). Acesso em: Jan/2010.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA/MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (EPE/MME). **Balanco Energético Nacional – BEN 2009**. Disponível em: [www.ben.epe.gov.br/](http://www.ben.epe.gov.br/). Brasília, MME, 2009. Acesso em: Jan/2010.

EXCALIBUR PROJECT, disponível em: <http://www.excaliburproject.com/pt/>. Acesso em: Nov/2010.

FERREIRA, R. G. **Matemática Financeira Aplicada: Mercado de capitais, administração financeira e engenharia econômica**. 5ª edição, Editora Universitária da UFPE. Recife/PE. 2000.

GRUPO PETRIBU. Disponível em: [www.petribusa.com.br](http://www.petribusa.com.br). Acesso em: Nov/2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Censo Demográfico 2000**. Brasil.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Contas Regionais 2008**. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: [www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/contasregionais/2008/publicacao2008.pdf](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/contasregionais/2008/publicacao2008.pdf). Acesso em: Nov/2010.

MULDER, J. P. **Micro-Algas: A nova Agricultura**. Mimeo, Recife/PE: UFPE, 2009.

MULDER, J. P.; OLIVEIRA, P. E. **Micro-Algas: A nova energia**. Mimeo, Recife/PE: UFPE, 2010.

Plano Decenal de Expansão de Energia 2007/2016, MME/EPE - Ministério de Minas e Energia/ Empresa de Pesquisa Energética, Brasília, 2007.

TEIXEIRA, C. M. L. L.; MORALES, E. Microalga como matéria-prima para a produção de biodiesel. In: I Congresso da Rede Brasileira de Tecnologia de Biodiesel. Brasília. **Anais...** p. 91-96. 2006.

## ANALYSIS OF THE ECONOMIC FEASIBILITY OF ELECTRICITY GENERATED BY FROM MICROALGAE

### Abstract

*This study examines the economic viability of a production process of microalgae to generate electricity, considered as a joint activity with ethanol in order to meet rising demand provided energy caused by the country's economic growth. The production of this alternative energy source in conjunction with an ethanol plant maximizes the gains of both, and bring benefits to the environment, with the microalgae capturing the carbon dioxide emitted by the ethanol plant. Through production and cost estimates, an investment analysis of the project to generate energy from microalgae is done according to the criteria of net present value, internal rate of return and the ratio of benefit to cost. The result obtained by applying the three criteria is to confirm the economic viability of the production process of microalgae to generate bio-electricity in Brazil.*

**Keywords:** Microalgae. Electricity. Investment analysis.