

## TRAJETÓRIAS TECNOLÓGICAS DOS BIOCOMBUSTÍVEIS PARA AVIAÇÃO: O CASO DAS ALGAS

JORGE TELLO-GAMARRA

Universidade Federal do Rio Grande (FURG) / Escola de Química e Alimentos (EQA), Brasil  
jorgetellogamarra@gmail.com

MARCELO SILVEIRA BADEJO

Universidade Federal do Rio Grande (FURG) / Escola de Química e Alimentos (EQA), Brasil  
badejo@gmail.com

ANA MÔNICA FITZ DE OLIVEIRA

Universidade Federal do Rio Grande (FURG) / Engenharia Agroindustrial, Brasil  
ana.monica89@hotmail.com

### RESUMO

Com o crescimento da preocupação mundial quanto às emissões de gases poluentes, diversos setores econômicos estão buscando formas de energia alternativas, dentre elas, os biocombustíveis. No setor de aviação comercial, estas formas alternativas de energia estão sendo avaliadas e o biocombustível de algas mostra-se uma interessante alternativa. O objetivo do presente artigo é de identificar as trajetórias tecnológicas possíveis para a produção de biocombustíveis para aviação. Para tanto, o método utilizado foi a revisão bibliográfica. Como resultados desta pesquisa foram identificadas três trajetórias tecnológicas, sendo essas: (a) rota prensagem, (b) rota prensagem e solvente e (c) rota fluido supercrítico.

**Palavras chave:** Trajetórias tecnológicas, biocombustíveis, aviação e algas.

### 1 INTRODUÇÃO

Um dos grandes desafios da atualidade é a criação de políticas voltadas à racionalização do uso de combustíveis fósseis nas atividades de transporte (BOIES *et al.* 2011). Uma série de problemas climáticos e ambientais estão se intensificando e se faz necessário avaliar fontes mais limpas de energia. Esse cenário de perspectivas de escassez impulsiona pesquisas e investimentos em usinas hidrelétricas, parques eólicos, placas solares e outras fontes de energias renováveis. Nesse sentido, o uso de biocombustíveis constitui uma opção mais segura e estratégica para a redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE) (BRENNAN; OWENDE, 2010).

O setor de transportes aéreos é um grande emissor de GEE, mas nos últimos anos busca a sustentabilidade ambiental e testa novos combustíveis, menos poluentes e que configuram oportunidades de novos negócios ainda a serem desenvolvidos. Nesse sentido, as inovações em novos combustíveis buscam soluções alternativas aos problemas sem comprometer a competitividade das firmas (NAIR; PAULOSE, 2014).

Novos combustíveis são paradigmas tecnológicos. Paradigmas tecnológicos, conforme Dosi (1982) são padrões e modelos de soluções de problemas tecnológicos baseados em princípios derivados das ciências naturais, sendo direcionados às mudanças técnicas. Para

Jovane (2003), um paradigma pode ser entendido como o conjunto integrado e finalizado de facilitadores que respondem a uma gama de necessidades envolvidas em um dado contexto, esfera essa que pode ser delimitada por fatores como as tecnologias existentes, a sociedade e o mercado.

Se um paradigma tecnológico é um problema a ser resolvido, uma trajetória tecnológica pode ser entendida como uma rota de passos que tendem a chegar até a almejada solução. No caso dos biocombustíveis para aviação várias alternativas estão sendo testadas e o uso de algas como matéria prima apresenta várias vantagens. Nesse cenário, o presente artigo tem como objetivo analisar e identificar diferentes trajetórias tecnológicas para produção desse biocombustível a partir de algas. Um aspecto é que as algas não competem com áreas agricultáveis, necessárias para produção de alimentos. O cultivo controlado de algas específicas, também pode ser interessante na captação de matéria orgânica dos mananciais de águas e quem sabe contribuir sobremaneira no sequestro de carbono da atmosfera.

O presente trabalho é dividido em tópicos. No tópico 2 é apresentado um aprofundamento teórico a respeito das trajetórias tecnológicas. O tópico 3, mostra o uso de combustíveis na aviação e o desenvolvimento desses combustíveis. O tópico 4, trata diretamente sobre biocombustíveis no setor aeronáutico, mostrando sua importância e apresentando um resumo sobre as matérias-primas em estudo atualmente, salientando aqui o uso da biomassa aquática oriunda de algas. O item 5, subdividido em tópicos revela a trajetória tecnológica dos biocombustíveis a partir de algas, trazendo um panorama dos estudos acerca do assunto e explicando detalhadamente os passos, ou seja, a rota tecnológica para a produção. O item 6 é composto pelos resultados do trabalho. E finalmente o item 7 remete a conclusão feita após a análise.

## 2. TRAJETÓRIAS TECNOLÓGICAS

O termo trajetória tecnológica designa o caminho trilhado no desenvolvimento de uma nova tecnologia, sendo aplicado basicamente na resolução de problemas (PARAYIL, 2003). As trajetórias tecnológicas fornecem explicações a respeito da inovação tecnológica e ilustram como a ciência evolui estimulada pela existência de paradigmas tecnológicos (TEECE, 2008).

O conceito de trajetórias tecnológicas, segundo Fleck *et al.* (1990), explica os padrões da inovação tecnológica e suas implicações, desse modo, a ideia de trajetória tecnológica foi criada para esclarecer mudanças apresentadas na tecnologia em diversas áreas de conhecimento. Uma trajetória é algo muito específico para uma determinada área técnica, independentemente do seu grau de complexidade. Logo esse conceito está baseado na preservação de um conjunto de forças sociais estáveis, econômicas e técnicas que interagem servindo para guiar o desenvolvimento tecnológico.

Apesar das trajetórias serem específicas para um setor, elas são capazes de afetar vários segmentos diferentes, indicando novos caminhos de desenvolvimento e interligando tecnologias. Além disso, as trajetórias tecnológicas são aplicadas para solucionar problemas, estabelecendo todas as etapas a serem seguidas durante o caminho da evolução (PARAYIL, 2003). Dessa forma, seguir uma trajetória tecnológica implica em como fazer acontecer um determinado fenômeno, ou seja, demonstrar todos os passos para o desenvolvimento de uma teoria. Assim, todos os caminhos específicos a serem desenvolvidos em setores tecnológicos, são definidos como trajetórias (ANDERSEN, 1997).

O termo designado de trajetórias tecnológicas tem a capacidade de compreender várias definições, se adequando a uma grande quantidade de funções e áreas de conhecimento. Elas podem ser usadas na exemplificação de resoluções de problemas, em estratégias de competição, dentre outras possibilidades (PARAYIL, 2003). Dessa forma, as trajetórias tecnológicas podem ser descritas de várias formas, porém sempre com o mesmo significado,

de constituírem o conjunto de etapas rumo ao desenvolvimento da tecnologia junto aos paradigmas tecnológicos.

Trajetórias e paradigmas são termos que se relacionam de forma direta, segundo Dosi (1972), paradigma tecnológico é o conjunto dos procedimentos ou definição dos problemas e do conhecimento científico, relacionados com a solução. Com base nessas premissas, o presente trabalho trata dos biocombustíveis aeronáuticos como um paradigma tecnológico relacionado à possibilidade de sua produção a partir de matérias primas selecionadas, que por sua vez, possuem suas devidas trajetórias tecnológicas com foco na garantia da produção substituindo os combustíveis fósseis convencionais.

De acordo com Parayil (2003), essa rota seguida é conceituada através do termo trajetória tecnológica designando o caminho seguido no desenvolvimento de uma nova tecnologia, sendo aplicado basicamente na resolução de problemas, atendendo por fim a necessidade proposta pelo paradigma. A tabela 1 mostra uma série de definições a respeito de trajetórias tecnológicas a fim de ilustrar mais claramente o conceito conforme alguns autores.

**Tabela 1 – Definições de trajetórias tecnológicas**

TEECE (2008)	Trajетórias tecnológicas explicam a existência da inovação tecnológica e ilustram a evolução da ciência estimulada por um paradigma.
FLECK et al. (1990)	O conceito explica os padrões da inovação tecnológica e suas implicações, esclarecendo dessa forma as mudanças da tecnologia.
DOSI (1982)	Define trajetórias tecnológicas como o conjunto das atividades destinadas a resolução de problemas dentro do contexto do paradigma.
BIONDI, GALLI (1992)	Trajетórias tecnológicas aplicam-se a resolução de problemas usando como instrumento a pesquisa tecnológica.
KIRKELS (2014)	Trajетória tecnológica é uma série de inovações que se acumulam em uma rota, dando complemento umas as outras de modo a definir um caminho.
CASTELLACCI (2008)	Trajетórias tecnológicas são os padrões de atividades para a resolução de problemas normais.
PARAYIL (2003)	Trajетórias tecnológicas relacionam-se diretamente com a pesquisa. Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) é também uma trajetória tecnológica, onde o desenvolvimento ocorre por meio de acordos entre universidades, firmas e o governo, com o propósito de crescimento.

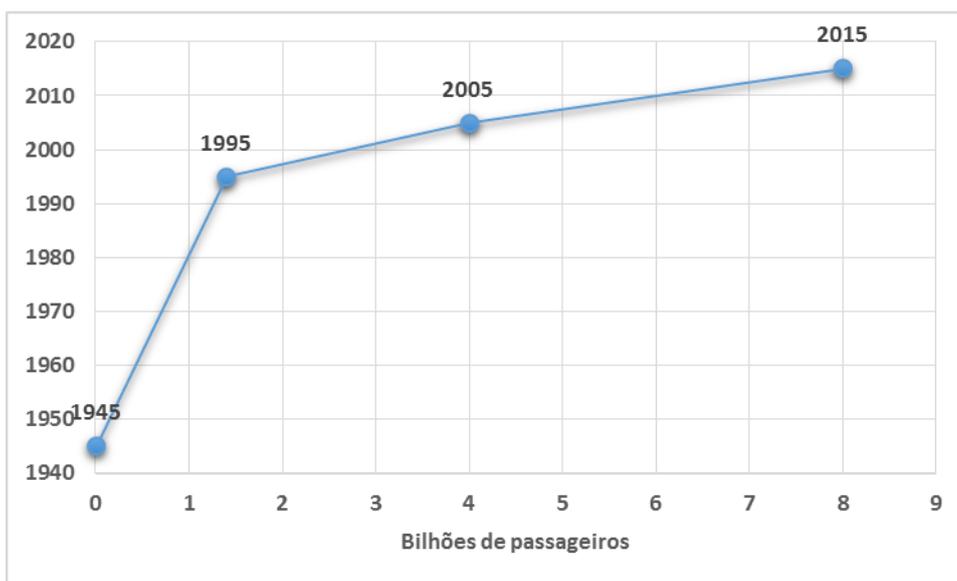
**Fonte: Elaboração própria**

Cada trajetória tecnológica é específica para uma determinada área, independentemente do seu grau de complexidade elas são capazes de afetar vários segmentos diferentes, indicando novos caminhos de desenvolvimento e interligando tecnologias. Dosi (1982) por exemplo, aplica os conceitos de trajetórias tecnológicas na economia e na gestão, enquanto Souitaires (2001), utiliza o conceito em seu estudo aplicando-o em empresas de inovação. Kirkels (2014), fez uso da definição para análise de gaseificadores de biomassa, por outro lado Fleck (1990), adotou a teoria em seu trabalho a respeito da implementação da tecnologia da informação.

### 3 COMBUSTÍVEIS NA AVIAÇÃO

Devido aos efeitos da globalização, a distância entre os países se torna cada vez menor e as suas interações cada vez maiores. Nesse novo contexto a aviação é o meio de transporte que está crescendo subitamente conforme verifica-se na figura 1, e se tornando indispensável ao mesmo passo que cada vez mais acessível.

**Figura 1 – Evolução do setor aéreo de transporte no mundo**



**Fonte: Elaboração própria com base em Santos (2007)**

A figura 1 ilustra o crescimento medido em bilhões de passageiros pelo tempo, apontando também que o setor deve continuar em ascendência contínua.

Segundo Tony Tyler, diretor geral da Associação Internacional do Transporte Aéreo (IATA), em 2014 o número de passageiros do setor aéreo deveria alcançar a marca dos 3.300.000, e esperava-se que a indústria da aviação movimentasse nesse ano, 746 bilhões de dólares, o equivalente a 1% do Produto Interno Bruto (PIB) mundial. Desse montante, a margem de lucro líquido correspondente seria de 2,4%, ou, menos de seis dólares por passageiro transportado (PARANÁ-ONLINE, 2014).

Nesse contexto, a fatura energética deveria representar um custo de 3 bilhões de dólares, que se previa serem contrabalançados pelo aumento da procura. A busca por viagens domésticas aumentou na taxa de 5,8% em abril de 2014 relacionado ao mesmo período do ano anterior, com maior crescimento no Brasil, China e Rússia (PARANÁ-ONLINE, 2014).

Em março de 2014, a IATA previa para o ano que o setor da aviação continuaria em contínuo crescimento assim como observado no gráfico 1, com lucros de 18,7 bilhões de dólares, abaixo das estimativas iniciais que registravam um lucro de aproximadamente 19,7 bilhões de dólares. Essa correção justifica-se ao aumento do uso de combustíveis cujo preço se mantém em 108,2 dólares o barril (PARANÁ-ONLINE, 2014).

Nesse mérito, o combustível por si só corresponde a cerca de 30% dos custos de uma companhia aérea (PARANÁ-ONLINE, 2014). Somente o mercado americano representa 140 bilhões de galões de gasolina e diesel consumidos por ano, onde médios 3 bilhões de galões são utilizados somente pela USAF como combustível para aviação representando cerca de 10% de todo o mercado de aviação americana (MAURICE, 2001).

Ainda segundo a United States Air Force (USAF), a previsão é de que até o ano de 2020 existe uma grande possibilidade de não mais haver as fontes usuais à produção de querosene de aviação que possam atender à crescente demanda mundial (MAURICE, 2001). Dessa forma, é necessário investigar fontes alternativas e procurar aperfeiçoá-las através de pesquisas de modo a viabilizar o suprimento das expectativas de demanda em tempo hábil.

### 3.1 Desenvolvimento de novos combustíveis

A exploração de biocombustíveis já data de mais de 40 anos, pois durante a década de 1970, a ocorrência de duas crises do petróleo incentivou a busca por novas fontes de energia. Através da fermentação da sacarose, o álcool anidro, mais comumente chamado de etanol passou a ser significativamente utilizado em veículos motores oferecendo menos emissões de gases poluentes entre outras vantagens ambientais (GAZZONI, 2012).

A preocupação com os impactos ambientais foi uma questão relevante e influenciou também o rumo das pesquisas científicas nas últimas décadas. Com a pauta das discussões deslocada para a emissão de gases de efeito estufa (GEE), uma fase determinante na história dos combustíveis é iniciada. E os biocombustíveis e outras formas de utilização de energias alternativas começaram a fazer parte mais significativamente da realidade de vários setores (DEFANTI *et al.*, 2010). Atualmente, a procura por fontes de energia mais limpa é intensa e pode ser observada através da busca por usinas hidrelétricas, placas solares, parques eólicos, biocombustíveis para automóveis provindos de várias fontes até a recente “investida” que está já sendo largamente explorada, os biocombustíveis para aviação.

Tendo em vista a geração de gases poluentes oriunda da queima dos combustíveis empregados na aviação, faz-se especialmente interessante e necessário o aumento do uso de biocombustíveis nesse setor.

## 4 BIOCOMBUSTÍVEIS NA AVIAÇÃO

Várias pesquisas, (Boeing, *et al.*, (2013), Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (2010), Velázquez (2012)) estão sendo realizadas no intuito de desenvolver e viabilizar esses novos combustíveis. Os biocombustíveis para aviação têm o objetivo de melhorar o balanço de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) sobre a atmosfera, atendendo sob todos os aspectos os requisitos ambientais, desde a matéria-prima até o seu consumo final incluindo os resíduos gerados pela queima, considerando a minimização da degradação ambiental (SIMÕES, SCHAEFFER, 2002).

Os compromissos são com o meio ambiente, mas os impactos vão das questões técnicas da área da química até a viabilidade em termos dos custos de produção, de adaptação da frota de veículos e também de toda cadeia produtiva para atender as alterações necessárias.

Uma análise do setor da aviação comercial permite perceber que durante a última década houve um grande interesse no desenvolvimento de biocombustíveis, no entanto as preocupações com a compatibilidade do combustível com as aeronaves limitaram o desenvolvimento. Ou seja, ainda são necessárias muitas pesquisas relacionadas ao assunto até a viabilização de sua aplicação em larga escala. O combustível alternativo para ser adequado à aviação deve apresentar uma série de características (CHUCK, 2014).

Dentre as características técnicas que o biocombustível deve apresentar, estão inclusas a necessidade de alta densidade energética, boa atomização, evaporação rápida, viscosidade adequada, ponto de congelamento baixo, boa estabilidade química, ser não tóxico, além de ser amplamente disponível e capaz de competir com os combustíveis atuais em termos de custos e disponibilidade (KALLIO, 2014).

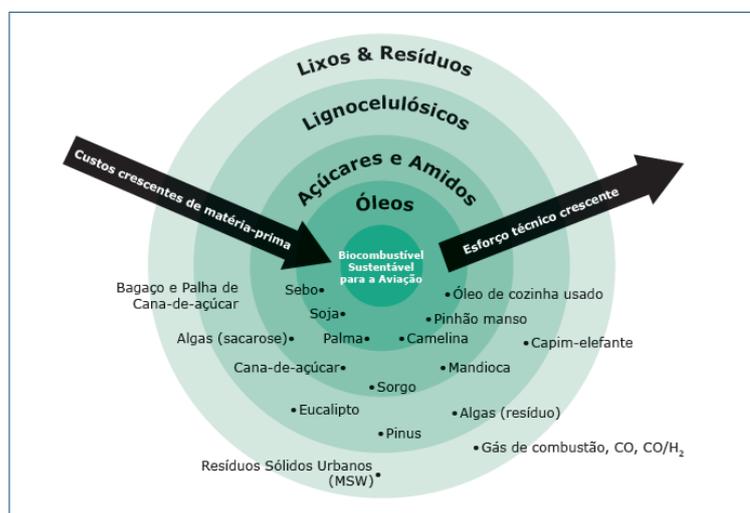
Tendo em vista essas condições, novas estratégias para substituir de forma sustentável os combustíveis fósseis são amplamente estudadas, contudo se devem levar em consideração as principais dimensões envolvidas, como a escolha e produção da matéria-prima, as questões técnicas do processo e ainda as questões sociais no que tange ao meio ambiente e a segurança alimentar.

#### 4.1 Matérias-primas

Com o intuito de avaliar as possibilidades de produção, comercialização e uso dos biocombustíveis aeronáuticos, todas as iniciativas têm foco na produção de moléculas parecidas com o querosene usando matérias primas renováveis, garantindo custos competitivos e benefícios ambientais (BOEING, *et al.*, 2013).

As matérias primas analisadas por estudos já citados anteriormente e vistas como as mais promissoras aliadas a realidade brasileira são as plantas que contém açúcares e amidos, as oleaginosas e em longo prazo os resíduos urbanos e industriais (BOEING, *et al.*, 2013). Apesar de essas matérias-primas terem elevados custos de produção comparados com as outras, como por exemplo, com os resíduos sólidos e a lignocelulose, elas necessitam um esforço técnico menor quando relacionado aos demais insumos, conforme a figura 2, fato crucial para a produção em curto e médio prazo.

**Figura 2- Matérias-primas e sua posição a respeito de custos e esforços técnicos para serem convertidas a biocombustíveis para aviação.**



Fonte: Plano de voo para biocombustíveis de aviação no Brasil: Plano de ação (2013, p. 33)

A figura 2 ilustra as matérias-primas com potencial para a produção de biocombustíveis aéreos relacionando os dois mais importantes fatores, que são os custos de matéria-prima e os esforços técnicos.

#### 4.2 Questões técnicas

Cada uma dessas matérias-primas presentes na figura 2 representa uma trajetória tecnológica a ser percorrida até tornar-se um biocombustível para aviação, contando com todos os elementos que fazem parte do conjunto que forma a rota a ser percorrida. No entanto, qualquer uma delas fornece um ou mais caminhos diferentes a serem trilhados incluindo os vários fatores que devem ser considerados na escolha do insumo como a matéria-prima ideal.

De modo geral, existem algumas lacunas na Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) a serem preenchidas no estágio de cada *pathway* (rota) em particular, por exemplo, desenvolver catalisadores mais seletivos, melhorar a eficiência da conversão, reduzir o custo dos processos e superar a fase de pesquisa atingindo as unidades comerciais e ainda corresponder com as expectativas ambientais e sociais (Boeing, *et al.*, (2013).

### 4.3 Demanda X Alimento X Energia

É importante frisar a necessidade de produzir um biocombustível que seja capaz de atender a demanda em longo prazo, não competir com as fontes de alimento (VELÁZQUEZ, 2012), não impactar o meio ambiente, além de ser economicamente viável ao longo de toda a cadeia de produção independentemente da matéria-prima escolhida.

Porém, conforme Sandquist (2012), uma das principais questões relacionadas às culturas oleaginosas, por exemplo, é o fato de que a produção sustentável requer quantidades grandes de terras agricultáveis e que estejam disponíveis para os cultivos. E em função de questões como essa do uso da terra, atualmente há uma polêmica muito forte sobre a viabilidade do uso de cereais e terras férteis para produzir biocombustíveis em detrimento de seu uso tradicional destinado apenas a alimentação.

Tendo em vista esses requisitos, a biomassa aquática enquadra-se bem às expectativas com uma série de vantagens em seu cultivo que a tornam uma opção interessante (DEFANTI, 2010).

Porém, para garantir a produção de biocombustível a partir de algas de forma sustentável e economicamente eficaz, deve-se analisar toda a trajetória tecnológica a ser seguida, buscando melhorar sempre as etapas da produção de modo a suprir as dificuldades e possíveis falhas no percurso.

## 5 TRAJETÓRIAS TECNOLÓGICAS DO BIOCMBUSTÍVEL A PARTIR DE ALGAS

Pode-se contextualizar o termo trajetória tecnológica através do desenvolvimento dos biocombustíveis para aviação, mais especificamente com as suas rotas tecnológicas a serem seguidas para o desenvolvimento de tal. Os biocombustíveis aéreos como um paradigma atual, orientam uma trajetória tecnológica acentuando a necessidade do estudo específico acerca de suas rotas tecnológicas de forma a determinar quais são os passos a serem seguidos na busca pelo desenvolvimento (BOEING, *et al.*, 2013).

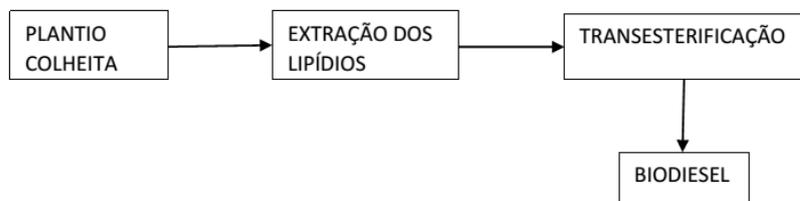
No caso dos biocombustíveis aéreos, uma série de possíveis rotas tecnológicas podem ser consideradas para seu desenvolvimento, sendo cabíveis pesquisas, análises sobre o assunto e comparação entre os diferentes caminhos a fim de auxiliar a tomar a decisão pelas melhores formas aos interesses do paradigma (BOEING, *et al.*, 2013).

Analisando e comparando então essas trajetórias apresentadas sob vários pontos de vista na incumbência de determinar a rota mais viável levando em consideração, custo, processos de produção e sustentabilidade é possível chegar próximo a rota de produção a partir de algas. O caminho identificado reflete nas necessidades propostas pelo paradigma, convindo às necessidades anteriormente ressaltadas.

Para suprir as necessidades do paradigma, como mencionado precedentemente, significativos estudos, como, (Boeing, *et al.*, (2013), Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (2010), Velázquez (2012)) são realizados antes da escolha de uma matéria-prima para a produção, pois vários fatores têm que ser minuciosamente avaliados e considerados de modo a obter uma produção sustentável do ponto de vista técnico, econômico e ambiental.

Diante dessa realidade, a figura 3 se apresenta, de forma geral, as etapas chaves envolvidas na produção de biocombustível a partir de algas. Já a figura 4 ilustra os detalhes das possíveis trajetórias tecnológicas a serem percorridas para se chegar ao biocombustível a partir de algas. A identificação dessas trajetórias tomou como base os trabalhos realizados por Schalargemann, *et al.*, (2012) e Rogers, *et al.*, (2014).

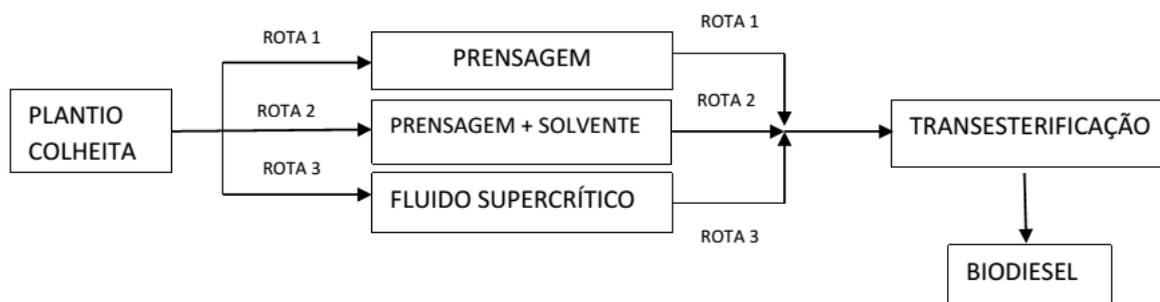
**Figura 3 – Etapas chave envolvidas na produção de biocombustível a partir de algas**



Fonte: Elaboração própria

A ilustração 3 fornece os passos necessários para a transformação de algas em biodiesel independentemente da trajetória tecnológica que se segue para tal (SCHALARGEMANN, *et al.*, 2012; ROGERS, *et al.*, 2014). Aqui observa-se que de modo detalhado a etapa constituída pela extração de lipídios é que fornece as possíveis rotas, já que ela pode ser determinada de três maneiras diferentes, fornecendo as três trajetórias tecnológicas por meio das rotas 1, 2 e 3 respectivamente.

**Figura 4 – Trajetórias tecnológicas da produção de biocombustível a partir de algas**



Fonte: Elaboração própria

Agora analisando já de forma trivial a figura 4, podemos facilmente identificar as possíveis rotas para a produção de biocombustíveis a partir de algas, sendo elas caracterizadas pelas três realizáveis formas de extração de lipídios, a prensagem, uso de fluido supercrítico ou então a combinação de prensagem e solvente (SCHALARGEMANN, *et al.*, 2012; ROGERS, *et al.*, 2014). Cada uma dessas rotas será brevemente discutida posteriormente.

## 5.1 Conhecendo a matéria-prima

Alga é um nome que designa um grande e diversificado grupo de organismos aquáticos unicelulares (microalgas) e multicelulares (macroalgas) que fixam CO<sub>2</sub> em moléculas orgânicas, através da luz (BENSON, *et al.*, 2014). As microalgas, por serem organismos unicelulares diferenciam-se dessa maneira das estruturas celulares complexas encontradas em plantas superiores (SLADE, BAUEN, 2013). Sua posição está localizada na parte inferior da cadeia alimentar, sendo este grupo considerado um dos grupos de organismos mais antigos da Terra, contando com uma diversidade acima de 300.000 espécies conhecidas, espécies essas que são pertencentes ao sub-reino *thallophytes*, ou seja, são plantas que não possuem caule, raiz ou folhas, e tem a clorofila como seu pigmento fotossintético primário (ALAM, *et al.*, 2012).

Algas, sejam macroalgas ou microalgas, são utilizadas em várias áreas, como por exemplo, na indústria alimentícia, indústria farmacêutica, na produção de cosméticos, agora sendo estendida a produção de biodiesel (OLTRA, 2011).

Pesquisas recentes têm concentrado esforços sobre a mitigação dos impactos ambientais e econômicos causados pelo uso de combustíveis de primeira geração, preocupando-se com a segurança energética e alimentar. Está sendo levado em consideração de vários estudos o potencial da tecnologia da produção de biocombustíveis oriundos de microalgas para remediar as fontes de poluição (OLTRA, 2011).

Esses estudos provaram que as algas apresentam um potencial considerável como matéria-prima do biodiesel alternativo, pois quando comparada a outras culturas, elas se destacam na rapidez do seu ciclo reprodutivo e sua produtiva conversão energética (KLEINOVÁ, *et al.*, 2012). E talvez tão importante quanto isso, a produção de algas não concorrem com o uso de solos férteis agricultáveis e podem ser utilizadas águas que não potáveis, logo não concorrem com a água potável também. Isso sem considerarmos as possibilidades de utilização de algas filtrantes de água (FIGUEROA, *et al.*, 2013).

## 5.2 Cultivo e colheita

O cultivo das algas é possível de duas formas considerando seu favorável ambiente de crescimento, tais como luz, tipo de água, seja doce ou salina, faixas de pH adequadas, condições de temperatura, presença de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e sais inorgânicos (ABDALA, 2011). A escolha do método de cultivo é feita considerando vários fatores envolvidos, como custos, a disponibilidade de espaço e temperatura média do ambiente.

O sistema mais comum para a produção de algas é em lagoas abertas, sendo elas naturais ou corpos de água artificiais de cerca de 20 a 30 centímetros de profundidade (SCHALARGEMANN *et al.*, 2012). Considerando-se o rápido crescimento das algas, é comum adaptar a essa lagoa um sistema com uma roda de pás para fazer circular toda a água garantindo a não sedimentação de modo a não prejudicar o crescimento, tendo em vista que as algas que se encontram na superfície acabam sombreando a área inibindo a passagem de luz solar para as algas adjacentes (SLADE, BAUEN, 2013).

Dadas essas condições para as lagoas abertas, uma das alternativas, é a produção em fotobiorreatores, nos quais podem ser controlados todos os parâmetros fundamentais, e serem disponibilizados CO<sub>2</sub>, luz e sais inorgânicos necessários. Nesse sistema de cultivo, o volume de cultura é desligado do meio ambiente, sendo disposto em tubos ou placas de vidro com paredes transparentes, favorecendo a não evaporação, fato comum em lagoas abertas (SCHALARGEMANN *et al.*, 2012). Além disso, esse sistema diminui o contato com outras espécies de algas que competem por nutrientes, e minimiza então possíveis contaminações por bactérias ou a presença de predadores, também possibilitando assegurar melhor controle sobre pH e temperatura, porém seu custo de instalação é alto (SCHALARGEMANN *et al.*, 2012).

Dependendo do tipo de cultivo escolhido, o ciclo de colheita varia entre um e dez dias, sendo que algumas espécies tem a capacidade de duplicar suas biomassas em 24 horas e o menor tempo de duplicação durante o seu crescimento é de cerca de 3,5 horas (ALAM, *et al.*, 2012).

## 5.3 Extração dos lipídios sob três possíveis rotas

O primeiro passo para a recuperação dos lipídios, ou óleo, é a colheita da biomassa, compreendendo nesse estágio a separação e a desidratação das células (SCHALARGEMANN *et al.*, 2012). A etapa de extração dos lipídios constitui-se de grande importância técnica e econômica para toda a produção do biocombustível, o custo da produção é amplamente

induzido pelo teor e eficiência dos lipídios extraídos a partir das algas (ROGERS, *et al.*, 2014).

Desse ponto de vista, a extração de lipídios pode ocorrer sob três formas diferentes, que são a prensagem da biomassa, disposição da biomassa a um fluido supercrítico ou então a combinação entre prensagem e utilização de solventes. Cada uma das formas mencionadas designa uma possível trajetória tecnológica remetendo a uma taxa de lipídios extraídos e a um custo relativo da técnica.

A prensagem, denominada aqui, **rota 1**, é o método mais comum e mais conhecido, consiste em espremer as algas retirando o máximo de óleo possível, nessa técnica pode-se remover até 75% do total de óleo presente (DEFANTI, *et al.*, 2010). Visando maior aproveitamento da biomassa para retirada do óleo, pode-se utilizar o método de prensagem combinado ao solvente hexano, constituindo **a rota 2**, desse modo, a prensa extrai o máximo de óleo possível, e depois disso, a sobra da biomassa, no caso as algas são misturadas ao solvente hexano, sendo posteriormente essa solução filtrada para não ficar nenhum resíduo químico presente no óleo, essa técnica garante a extração de até 95% de lipídios (DEFANTI, *et al.*, 2010).

O terceiro método, **a rota 3**, é caracterizado pelo emprego de fluidos supercríticos, assegurando até 100% de extração do óleo, nessa técnica, o dióxido de carbono age como fluido supercrítico e quando combinado às algas transforma-as totalmente em óleo, não restando resíduo, porém o equipamento e o trabalho necessários para a execução dessa técnica transformam-na em uma opção bem menos viável do ponto de vista econômico (DEFANTI, *et al.*, 2010).

#### 5.4 Processo de Transesterificação

Um óleo seja ele de origem vegetal, ou animal no seu estado natural não pode ser considerado biodiesel e é difícil utilizá-lo em um motor a diesel moderno devido a sua viscosidade, portanto é comum utilizar-se de um processo químico para a transformação do óleo em biodiesel (SOUZA, 2006).

Assim, depois de extraídos o máximo de lipídios possíveis, o biodiesel pode ser obtido por diferentes processos, como o craqueamento, a esterificação ou então a transesterificação (DEFANTI, *et al.*, 2010). Nessa etapa, os lipídios são submetidos à transesterificação que é o processo mais utilizado dentre os mencionados, obtendo como produto o biocombustível (SCHALARGEMANN *et al.*, 2012).

Esse processo químico viabiliza a transformação do óleo extraído das algas em biodiesel por meio de uma reação específica, que visa a remoção da glicerina contida no óleo vegetal, deixando-o mais fino e menos viscoso, segundo Defanti *et al.* (2010), os reagentes empregados nesse processo podem ser óleos vegetais, gorduras animais ou residuais com álcool.

Conforme Souza (2006), o óleo depois que submetido a este processo adquire as mesmas características do diesel, sendo que ocorre com uma reação relativamente simples.

Depois dessa fase, obtém-se diretamente o biocombustível, um biodiesel derivado de algas que pode ser misturado ao combustível convencional de aviões para reduzir a emissão de gases de efeito estufa e poluentes na atmosfera.

## 6 RESULTADOS

Existem ainda poucos estudos que buscam quantificar e avaliar com precisão os custos envolvidos na produção do biodiesel de algas. Analisando a primeira etapa de qualquer trajetória da produção de biocombustíveis a partir de algas, sendo ela o plantio, pode-se destacar a pesquisa de Rogers, *et al.* (2014), nela os autores analisaram uma planta de produção em escala industrial para o México onde existe um clima bastante favorável para a produção de algas em lagoas abertas. Na tabela 2 são abordadas algumas das variáveis técnico-econômicas inclusas na produção de biodiesel de algas a partir de lagoas abertas.

**Tabela 2 – Variáveis técnico-econômicas com base na produção por lagoas abertas no México**

Área	4.875 ha
Produção de biomassa	730 mil ± 2000 kg/dia
Produção de óleo de algas	1.000 bbl/dia
Custo da produção	\$ 4,10/L de óleo bruto em 10 anos de investimento \$3,21/L de óleo bruto em 20 anos de investimento
Dispêndio anual	\$ 134 milhões
Extração com solvente hexano a partir 20% de sólido	\$ 3.000/tonelada

Fonte: Elaboração própria com base em Rogers, *et al.* (2014)

Algumas das informações mais recentes sobre algas provam que elas podem oferecer um retorno de energia favorável ao investimento quando comparadas aos combustíveis fósseis, biocombustíveis de primeira ou segunda geração. Porém a existência das possíveis rotas de produção em escala comercial representadas na tabela 3 torna difícil estabelecer uma equação que descreva o equilíbrio teórico entre a massa e a energia produzida (ROGERS, *et al.*, 2014).

**Tabela 3 – Rotas tecnológicas encontradas para produção de biocombustível de algas e suas características**

	ROTA 1: Prensagem	ROTA 2 : Prensagem+solvente	ROTA 3: Fluido Supercrítico
<b>CARACTERIZAÇÃO</b>	Constitui o método mais comum para extração	Após realizar a prensagem, a sobra da biomassa é combinada com um solvente no intuito de maior aproveitamento	As algas são dispostas a um fluido supercrítico que as transforma em óleo
<b>PECULIARIDADES</b>	É capaz de extrair até 75% do óleo presente na biomassa.	A capacidade de extração é de até 95%.	Rendimento máximo, de 100% de óleo
<b>VANTAGENS</b>	É um processo simples e de baixo custo	Alto nível de extração	Não há sobra de biomassa
<b>DESVANTAGENS</b>	A quantidade de óleo extraída não é alta	É necessário o uso de um solvente	O processo se torna caro, apresentam-se inviável economicamente

Fonte: Elaboração própria

De acordo com Rogers *et al.* (2014), a eficiência da extração do óleo e o teor de lipídios colhidos estão relacionados de maneira direta com a produtividade da operação. Esses agentes mostram grandes interferências na economia, sendo fundamental que o processo de extração seja eficiente para minimizar os custos e aumentar a produtividade, assim podendo

viabilizar o processo, justificando dessa forma a avaliação destes três processos como rotas tecnológicas.

Partindo do pressuposto que se deve produzir um biocombustível que atenda os padrões técnicos e econômicos chega-se próximo então da rota 2, extração dos lipídios através do processo de prensagem unido ao uso de um solvente sendo que ela nos fornece uma maior quantidade de lipídios extraídos, cerca de 95%, com o uso de um solvente como o hexano.

O último passo para transformar o óleo de algas em biodiesel, é o processo de transesterificação sendo fundamental para a produção de biodiesel. Já foram feitos voos teste usando óleos alternativos misturados ao combustível convencional de aviação, em um desses voos já realizados foi feita uma mistura de 90% de querosene para aviação com 10% de biodiesel de algas.

Na Alemanha, foi realizada uma apresentação durante o show aéreo internacional em Berlim, onde a EADS (fabricante do Airbus), apresentou o Diamond Aircraft DA42, usando biodiesel provindo de Algas ao invés de diesel de aviação. Segundo a empresa, durante o voo teste, o avião consumiu quase a metade de um galão de combustível comparado a um avião tradicional do mesmo porte (A TRIBUNA, 2010).

## 7 CONCLUSÃO

As algas se mostram uma fonte promissora para a produção de biocombustível, mais precisamente de biodiesel para aviação. Esse fato é animador principalmente no setor aéreo que está em constante crescimento e dessa forma demandando maiores quantidades de combustível.

Um fato importante para a escolha de algas como matéria-prima deve-se a circunstância de que não competem com as fontes alimentares, fornecem a opção de produção em terras não cultiváveis, podendo ainda serem melhoradas geneticamente para servirem de biofiltros em águas impróprias para uso humano, além da opção de usar fotobiorreatores para a produção.

É perceptível que a rota tecnológica que causa maior impacto na produção de biodiesel, é a chamada extração do óleo das algas, pois a quantidade de óleo bruto extraído está diretamente associada com a produção final.

Avaliando a extração de lipídios certamente unindo os anseios econômicos aos técnicos a opção mais viável é extração com prensagem e solvente já que ela nos garante maior rentabilidade, sendo essa etapa de grande valia na produção total.

É necessário alavancar as pesquisas e serem feitos fortes investimentos financeiros buscando implementar o estudo nessa área, principalmente nas tecnologias de refino, pontuando novamente que essa etapa é de grande importância para a produção total, sendo que nesse estágio, podem ser garantidos os maiores lucros possíveis da produção final.

O Brasil tem mais de 30 anos em experiência com rotas de produção de biocombustível para veículos terrestres e uma grande história na busca por matérias-primas economicamente capazes de afirmar uma produção lucrativa. Diversas instituições como a Petrobrás investem em tecnologias para o processamento e produção desse tipo de combustível.

Se existirem fortes financiamentos que darão suporte as pesquisas, é possível o desenvolvimento de biocombustíveis para o setor aeronáutico, de forma benéfica do ponto de vista econômico e sustentável. Assim como já existem as pesquisas de Nair e Paulose (2014), Cremones *et al.* (2015), Hari *et al.* (2015), novos estudos surgirão, e com isso, ideias inovadoras capazes de superar os problemas relacionados a esse paradigma de forma competente.

## REFERÊNCIAS

ABDALA, LUIZA, 2011, Teste de diferentes fontes de nitrogênio para o crescimento das espécies *Dunaliella tertiolecta* e *Chlorella* sp. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Química.

A TRIBUNA, 2010, Avião decola com biodiesel feito a partir de algas. Disponível em: < [http://www.pesca.sp.gov.br/noticia.php?id\\_not=7076](http://www.pesca.sp.gov.br/noticia.php?id_not=7076) >. Acesso em maio de 2015.

ALAM, *et al.*, 2012, Biofuel from Algae- Is It a Viable Alternative? *Procedia Engineering*, 49, 221 – 227.

BENSON, D.; KERRY, K.; MALIN, G., 2014, Algal biofuels: impact significance and implications for EU multi-level governance. *Journal of Cleaner Production*, 72(1), 4 – 13.

BIONDI, Leonardo; Galli, Riccardo, 1992, Technological Trajectories. *Futures*, 24(6), 580-592.

BOEING, EMBRAER, FAPESP, UNICAMP, 2013. Plano de voo para biocombustíveis no Brasil: Plano de ação. Brasil.

CASTELLACCI, Fulvio, 2008, Technological paradigms, regimes and trajectories: Manufacturing and service industries in a new taxonomy of sectoral patterns of innovation. *Research Policy*, 37(6), 978–994.

CHUCK, Christopher, J.; DONNELLY, Joseph, 2014, The compatibility of potential bioderived fuels with Jet A-1 aviation querosene. *Applied Energy*, 118, 83 – 91.

CREMONEZ, Paulo A. *et al.* 2015, Biofuels in Brazilian aviation: Current scenario and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 1063 – 1072.

DEFANTI, L. S.; SIQUEIRA, N. S.; LINHARES, P.C., 2010, Produção de Biocombustíveis a partir de algas fotossintetizantes. *Revista de divulgação do Projeto Universidade Petrobras e IF Fluminense*, 1, 11-21,

DOSI, Giovanni. 1982, Technological paradigms and technological trajectories. A suggested interpretation of the determinants and directions of technical change. *Research Policy*, 11, 147 – 162.

FIGUEROA, Félix L. *et al.*, 2010, Biofiltración de efluentes mediante algas: valorización de la biomassa (alimentos funcionales e biodiesel). IN: *Las Algas como recurso. Valorización. Aplicaciones industriales y tendencias*. Málaga. 209 – 225.

FLECK, J.; WEBSTER, J.; WILLIAMS, R., 1990, Dynamics of information technology implementation. A reassessment of paradigms and trajectories of development. *Futures*, 22(6), 618 – 640.

GAZZONI, Décio Luiz, 2012, Os desafios do biodiesel de algas. Disponível em: < <http://www.biodieselbr.com/noticias/colunistas/gazzoni/desafios-biodiesel-algas-060212.htm> >. Acesso em maio de 2015.

HARI, Thushara K. *et al.*, 2015, Aviation biofuel from renewable resources: Routes, opportunities and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 1234 – 1244.

JOVANE, F.; KOREN, Y.; BOER, C. R. 2003, Present and Future of Flexible Automation: Towards New Paradigms. *Research Policy*, 52(2), 543 – 560.

KALLIO, Pauli. *et al.*, 2014, Renewable jet fuel. *Current opinion in biotechnology*, v. 26, pp. 50 – 55.

KIRKELS, Arjan F., 2014. Punctuated continuity: The technological trajectory of advanced biomass gasifiers. *Energy Policy*, 68, 170 – 182.

KLEINOVÁ, A., *et al.*, 2012, Biofuels from algae. *Procedia Engineering*, 42, 231 – 238.

MAURICE, L. Q. *et al.*, 2001, Advanced aviation fuels: a look ahead via a historical perspective. *Fuel*, 80(5), 747 – 756.

NAIR, Sujith; PAULOSE, Hanna, 2014, Emergence of green business models: The case of algae biofuel for aviation. *Energy Policy*, 65, 175 – 184.

OLTRA, Christian., 2011, Stakeholder perceptions of biofuels from microalgae. *Energy Policy*, 39(3), 1774 – 1781.

PARANÁ-ONLINE, 2014, Iata reduz previsão de lucro para US\$ 18,7 bi em 2014. Disponível em: <<http://www.paranaonline.com.br/editoria/economia/news/786406/?noticia=IATA+REDUZ+PREVISAO+DE+LUCRO+PARA+US+187+BI+EM+2014>>. Acesso em maio de 2015.

PARAYIL, Govidan, 2003, Mapping technological trajectories of the Green Revolution and the Gene Revolution from modernization to globalization. Singapore. *Research Policy*, 32, 971-990.

ROGERS, J. *et al.* 2014, A critical analysis of paddlewheel-driven raceway ponds for algal biofuel production at commercial scales. *Algal Research*, 4, 76 – 88.

SANDQUIST, Judit; GÜELL, Berta M., 2012, Overview of Biofuels for Aviation. *Chemical Engineering*, 29.

SANTOS, M. L. F. M, 2007, Análise da demanda em relação à capacidade instalada no Sistema Aeroportuário: destaque para a Área Terminal São Paulo. Seminário Novo Modelo de Gestão do Transporte Aéreo, Edu Brasilis, Brasil: São Paulo.

SCHALARGEMANN, Pascal. *et al.* 2012, Composition of Algal Oil and Its Potential as Biofuel. *Journal of Combustion*, 2012, 14.

SIMÕES, André Felipe; SCHAEFFER, Roberto, 2002, Emissões de CO<sub>2</sub> devido ao transporte aéreo no Brasil. *Revista Brasileira de Energia*, 9(1).

SOUTARES, Vangelis. 2001, Technological trajectories as moderators of firm-level determinants of innovation. London. *Research Policy*, 31, 877-898.

SOUZA, Carlos A., 2006, Sistemas catalíticos na produção de biodiesel por meio de óleo residual. *Energ. Meio Rural*, [S.l.: s.n.].

SLADE, Raphael; BAUEN, Ausilio, 2013, Micro-algae cultivation for biofuels: Cost, energy balance, environmental impacts and future prospects. *Biomass and Bioenergy*, 53, 29 – 38.

TEECE, David J., 2008, Dosi's technological paradigms and trajectories: insights for economics and management. *Industrial and Corporate Change*, 17(3), 507-512.

VELÁZQUEZ, R. S. G.; KUBOTANI, R. T.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G., 2012, Novos combustíveis para aviação: um estudo de caso. *Revista Mackenzie de Engenharia e Computação*, 12(1), 77 – 93.