

Aplicação do Método MACBETH na hierarquização de biocombustíveis para a aviação comercial brasileira: um estudo de viabilidade

Marcos dos Santos

marcosdossantos_doutorado_uff@yahoo.com.br

CASNAV - UFF

Fábio Maurício Bentes Monteiro

fabio_bentes@hotmail.com

UNISUAM

Carlos Francisco Simões Gomes

cfsg1@bol.com.br

UFF

José Cláudio de Souza Lima

logistica@unisuam.edu.br

UNISUAM

Antônio Carlos Rodrigues dos Santos

antonio@afconsultoriaetreinamento.com.br

UNISUAM

Resumo: A incerteza da disponibilidade futura do querosene de aviação, derivado direto do petróleo, associada à emissão de CO₂ na atmosfera, sinalizam a imediata necessidade de se encontrar um biocombustível capaz de contribuir para a reversão desse cenário. Por meio da aplicação de um método multicritério de apoio à decisão, particularmente o Método MACBETH, este estudo foi capaz de rankear as matérias primas com relevante potencial ao desenvolvimento de um biocombustível que possa ser utilizado na aviação comercial brasileira, levando-se em consideração os aspectos ambientais, econômicos e sociais. O método MACBETH foi aplicado a partir dos dados obtidos na Plataforma Brasileira de Biocombustíveis. Diante das três matérias primas disponíveis no contexto nacional, o método foi capaz de apontar o pinhão manso como a opção mais viável. Do ponto de vista ambiental, é seguro afirmar que todas as três matérias primas possuem elevado potencial sustentável, e, caso sejam introduzidas na matriz energética brasileira, trarão uma significativa contribuição para a sociedade no que diz respeito à redução do passivo ambiental gerado pela aviação comercial.

Palavras Chave: Aviação Comercial - Biocombustíveis - Método MACBETH - Sustentabilidade - Viabilidade

1. INTRODUÇÃO

A constante preocupação mundial frente às mudanças climáticas e seus impactos na sociedade, associada à incerteza da disponibilidade futura dos combustíveis fósseis, têm levado a uma crescente demanda por fontes alternativas renováveis de energia. Metas desafiadoras para redução de emissões dos gases de efeito estufa, aliadas à conscientização do cenário energético mundial, reforçam a necessidade global de se buscar soluções para a mudança desse cenário.

Diversas organizações e instituições ligadas direta e indiretamente ao setor ambiental, vêm realizando atividades e projetos no intuito de contribuir com o desenvolvimento de alternativas que visem à redução, com segurança, das emissões de gases de efeito estufa e a maior eficiência energética no mundo. Um exemplo claro se refere à assinatura do Acordo de Paris, onde os países membros ratificaram o interesse na busca de soluções para o combate às mudanças climáticas. Consequentemente, é viável afirmar que haverá uma expansão sem precedentes de fontes de energias mais limpas e sustentáveis nas próximas décadas (IEEFA, 2016). Tais tendências vêm sendo veementemente monitoradas pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), organização com sede na Suíça, responsável por sintetizar e divulgar o conhecimento mais avançado sobre as mudanças climáticas que hoje afetam o mundo.

Mesmo apresentando um percentual pequeno, essas emissões são relevantes pelo fato dos poluentes serem lançados em grandes altitudes, potencializando o efeito do dióxido de carbono, intensificando as consequências do efeito global. Dessa forma, a busca por um biocombustível que substitua o atual querosene de aviação, de origem fóssil, se torna mais intensa, mobilizando companhias aéreas, fabricantes de aeronaves, empresas químicas e o próprio governo, levando ao desenvolvimento de práticas de pesquisas sustentáveis (BETIOLLO, 2009).

Segundo a Agência Nacional de Aviação Civil (2017), o custo do combustível representa quase 30% no conjunto de custos de uma empresa aérea, o que sinaliza a preocupação para reversão deste quadro. No entanto, ao contrário do uso de combustíveis alternativos em outros setores, a aviação apresenta peculiaridades e restrições bastante significativas para qualquer que seja o combustível candidato a substituto. Esse é o grande desafio do setor aéreo: encontrar um combustível que possa substituir com segurança o atual querosene de aviação, sendo ecologicamente correto, provendo de fontes renováveis de energia, e que possa proporcionar uma redução significativa no custo das companhias aéreas. A *International Air Transport Association* (IATA), associação internacional composta pelas companhias aéreas com voos regulares comerciais, sugere a imediata adoção de práticas sustentáveis para redução da emissão de gases na atmosfera.

Este estudo tem o objetivo de identificar a matéria prima com melhor potencial socioeconômico, para a produção e desenvolvimento de bioquerosene de aviação, indicando suas possibilidades à substituição, mesmo que de forma parcial, ao atual querosene de aviação, de origem fóssil. Por se tratar de um setor composto de complexidade e especificidades, a escolha pelo método mais apropriado à resolução deste problema precisa ser preferencialmente através de uma metodologia multicritérios de apoio à decisão, devido à necessidade de se considerar diversos pontos de vista conflitantes entre si, tais como preços de vendas, cadeia de suprimentos, impactos ambientais e sociais, que dificultam a escolha. Desta forma, optou-se pela utilização do Método MACBETH, o qual tem capacidade de avaliar e transformar opções em julgamentos qualitativos, através de diferenças de atratividade.

1.1 DELIMITAÇÕES DA PESQUISA

As condições extremas em que a combustão é submetida devem ser confiáveis e seguras, o que limita a opção aos atuais combustíveis hoje em utilização no mercado. O Atual combustível utilizado na aviação comercial mundial é o querosene de aviação, aprovado pela Norma D7566 da *American Society for Testing and Materials International* (ASTM, 2017). No Brasil, pela resolução nº 63 de 2014 da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Combustível (ANP, 2017). Ambas as normas somente permitem adições parciais do bioquerosene ao querosene de aviação. Em seguida, qualquer produto com potencial de substituição deve ser plenamente compatível com o uso do combustível de aviação, para evitar problemas de logística aeroportuária com vários combustíveis de diferentes qualidades e possíveis limitações comerciais que isso possa gerar. Por fim, a longa vida útil das aeronaves comerciais implica que qualquer biocombustível candidato precisa ser compatível e adequado para utilização em motores com tecnologia já existente. Diante de todas essas necessidades reais, o foco desta pesquisa será em torno de biocombustíveis do tipo "drop in", termo utilizado para combustíveis alternativos que possam ser usados na frota existente, sem necessidade de alterações nos motores das aeronaves (BOEING, 2007).

Baseado no mapa mental a seguir, onde diversas vertentes do assunto se ramificam e evidências às possibilidades de pesquisa e aprofundamento do tema são passíveis de estudo, é relevante afirmar que, a delimitação deste trabalho terá como ênfase o estudo de viabilidade de biocombustíveis de aviação através do Método *Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique* (MACBETH).

A pesquisa limitou-se a estudar os impactos e funcionalidades, que porventura, venham a ser aplicáveis e estejam em consonância com os sistemas normativos brasileiro e internacional vigentes, órgãos reguladores, especificações técnicas e, sobretudo, com o quesito segurança, comparando sua efetividade e possibilidades de implementação, conforme mapeado na Figura 1.

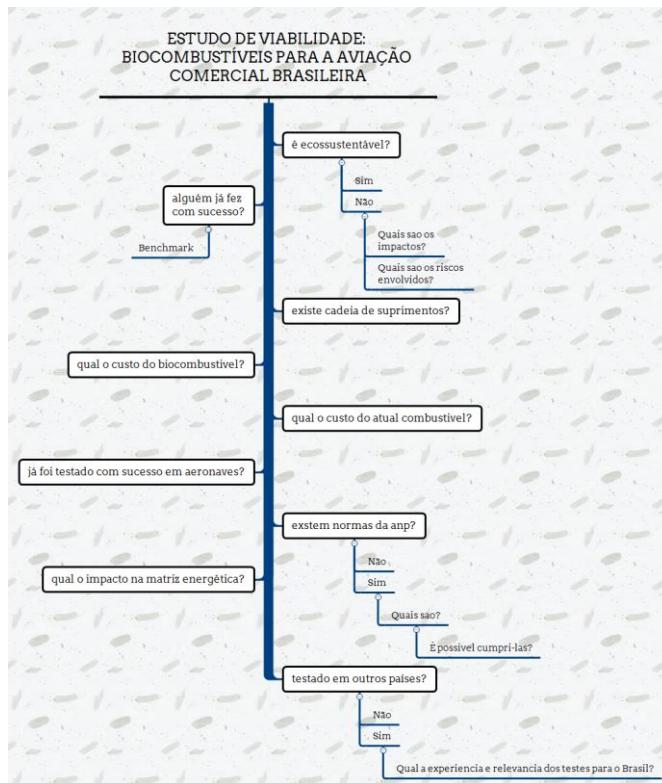


Figura 1: Mapa mental sobre o estudo de viabilidade. **Fonte:** Autores (2017)

2. REVISÃO DA LITERATURA

O incentivo à utilização e aplicação de métodos de apoio multicritério à decisão (AMD) constitui-se em uma importante ferramenta para os gestores de diversos tipos de organizações, considerando-se a grande quantidade de informações disponíveis nas últimas décadas (BRIOZO, 2013). Igualmente, justifica-se a utilização desse tipo de ferramenta para um problema ainda sem solução definida, como o caso da substituição do querosene de aviação.

Nos métodos de apoio multicritério à decisão, objetiva-se a construção de modelos que lidam com uma série de juízos de valor subjetivo. Sendo assim, pressupõe-se aceitar que a subjetividade é um elemento chave e estará presente em todo o processo de decisão. A estrutura de valores dos decisores é associada aos critérios existentes e serão usados na avaliação das alternativas (GOMES, 2008). Os métodos de AMD são aplicados em variadas áreas em que se deseja selecionar, ordenar, classificar ou descrever alternativas presentes em um processo decisório em presença de múltiplos critérios. Toledo (2016) ressalta o uso do método SMART para a aplicação de objetivos que amparam um plano de negócios e sustenta a estratégia empresarial. Costa (2007) usa o ELECTRE TRI na avaliação da satisfação dos consumidores. Muitas classificações são empregadas para designar os métodos do AMD. Esses métodos estão agrupados em duas grandes escolas: A Escola Americana, cujos critérios abordados se sobrepõem, sofrendo comparações hierarquizadas. Do outro lado, tem-se a Escola Francesa, designada também como Escola Europeia, onde os critérios tendem mais para a subjetividade e são independentes entre si. Existem outros métodos multicritério que, no entanto, não se enquadram dentro de uma dessas duas escolas.

Esta pesquisa utiliza os benefícios do método MACBETH, que permite satisfatoriamente uma análise com maior robustez dos critérios quantitativos e qualitativos de cada matéria prima elegível à candidata. Uma notória diferença entre o MACBETH e outros métodos de AMD é que o MACBETH requer apenas julgamentos qualitativo-verbais sobre as diferenças de atratividade entre elementos para, então, gerar pontuações para as opções em cada critério e para ponderar os critérios. A abordagem MACBETH foi considerada como apropriada para a análise do problema, devido ao seu caráter compensatório, seu tipo de problemática e suas vantagens em relação ao julgamento de inconsistência. A Figura 2 apresenta as fases envolvidas na aplicação do método MACBETH.



Figura 2: Fases do método MACBETH. **Fonte:** BANA E COSTA (1995)

As matérias primas elegíveis a candidatas possuem elevado grau de confiabilidade, sendo obtidos a partir de diversas origens, tratadas e submetidas a processos especiais de obtenção de bioquerosene de aviação. Várias são as matérias primas utilizadas em testes no Brasil e no exterior. Como exemplo citamos a soja, colza, palma, sebo, pinhão manso, babaçu, camelina, cana de açúcar e algas. A justificativa pelo interesse nessas culturas inclui a produtividade potencial, a possibilidade de cultivo em terras marginais, a cultura já adquirida pelo país, através da cana de açúcar e o reaproveitamento do óleo de cozinha usado, o qual não necessita de cultivo e favorece um destino ao seu descarte. Isso vem levando diversas companhias aéreas em todo o mundo a realizar fomento a pesquisas e testes em seus voos

comerciais (CGEE, 2010). O pinhão manso vem sendo fonte de pesquisas para reafirmar sua efetiva potencialidade, principalmente no que se refere às mudanças genéticas para que se possa acelerar a formação de uma cadeia produtiva (CAPDEVILLE, 2013).

Com isso, existe um ambicioso comprometimento das companhias aéreas em todo o mundo em atingir metas de redução de emissão de CO₂ até 2050 (IATA, 2015). Enquanto vantagens tecnológicas podem ser capazes de determinar a velocidade dessas mudanças, o desenvolvimento de biocombustíveis de aviação será um fator determinante neste sentido. Essa afirmação, constante no site da IATA, nos remete a uma valiosa reflexão de que o Brasil é destaque nos investimentos em hidrelétricas e biocombustíveis. No ano de 2015, o país era o segundo maior produtor e investidor do setor de biocombustíveis mundial, considerando o etanol e o biodiesel (REN21, 2016).

A partir da base de dados da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (2017), foram feitas consultas em inglês com a palavra Biofuels Aviation (Biocombustíveis de Aviação, em português). Assim, gerou-se uma série histórica no período de 1996 a 2016.

No que diz respeito à palavra-chave Biofuels Aviation, a Figura 3 apresenta um crescimento considerável na quantidade de publicações, com uma leve suavização ao final do período, evidenciando assim a relevância e a aplicabilidade desta pesquisa.

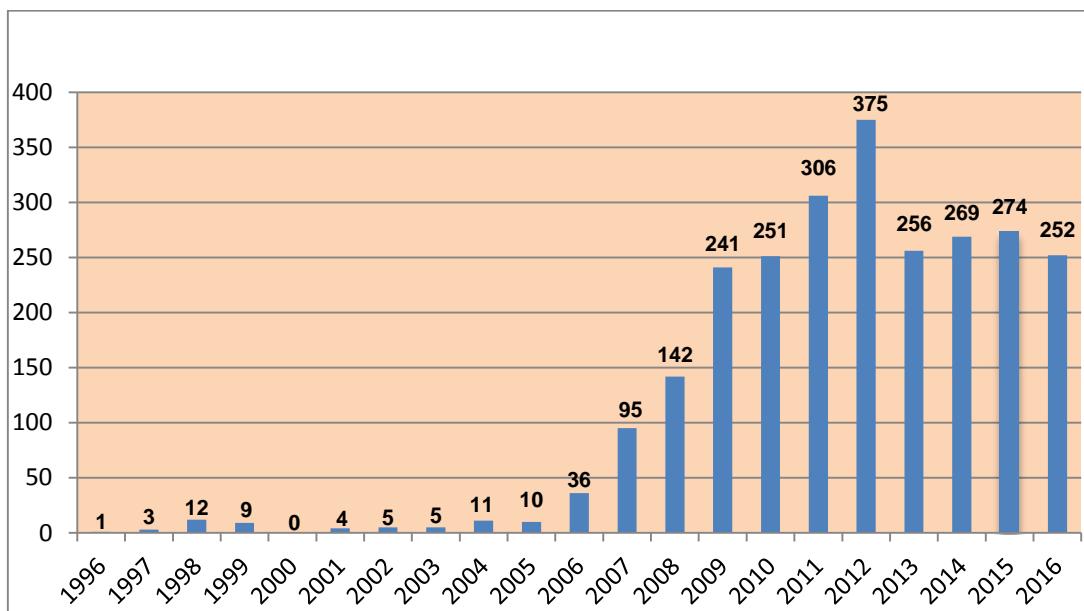


Figura 3: Bibliometria. Fonte: Autor (2017)

3. DESAFIOS DO SETOR AÉREO

No atual cenário competitivo da indústria da aviação, não existe considerável economia para as companhias aéreas em utilizar biocombustíveis para aviação. Estudos apontam que, devido ao custo de produção elevado, aliado ao baixo incentivo a pesquisas que promulguem a sua utilização, certamente haveria uma duplicação do valor da passagem, havendo repasse direto desses custos ao passageiro (IATA, 2015). Mesmo com iniciativas que visem baixar o índice de emissão de gases, como por exemplo, a fabricação de modernas aeronaves produzidas através de novas tecnologias que proporcionem redução do peso das aeronaves, implicando diretamente em um menor consumo de combustível, essa realidade vem em contrapartida a três fatores que, fatalmente, implicarão na reversão dessa pré ideia: a) Primeiramente, políticas de proteção às mudanças climáticas irão adicionar custos aos usuários de combustíveis fosseis. Como exemplo temos o mercado de compra e venda de carbono. Os países que, porventura,

não conseguirem atingir as metas estabelecidas pelo ONU (Organizações das Nações Unidas) na redução de CO₂, deverão comprar créditos em carbono; b) Em seguida, o cenário econômico e político mundial sugere significativo crescimento no preço do querosene de aviação; c) Por último, o custo de produção e distribuição de biocombustíveis de aviação tende a cair, uma vez que incentivos, pesquisas e mobilização global, para definição de estratégias que viabilizem a utilização de biocombustíveis, é uma realidade aguardada por todos.

A velocidade e extensão desses três fatores, desenvolvidos em conjunto, irão determinar a rapidez com que os biocombustíveis se tornarão econômicos e também agregará valor à importância na redução da emissão de gases de efeito estufa através do setor aéreo.

Basicamente, as companhias aéreas associadas à IATA, estabeleceram três grandes metas para o setor de aviação na área do meio ambiente: a melhoria de 1,5% ao ano na eficiência das aeronaves, a neutralização das emissões de CO₂ em 2020 e a redução em 50% até 2050, do nível das emissões de CO₂, tendo como referência o ano de 2005.

O consumo de combustível é um assunto muito importante em termos ambientais e econômicos para o setor aeronáutico. No Relatório mensal da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2017), referente ao Balanço Energético Nacional, pode-se observar que a evolução no consumo do querosene fóssil de aviação passou dos sete milhões de m³, Figura 4.

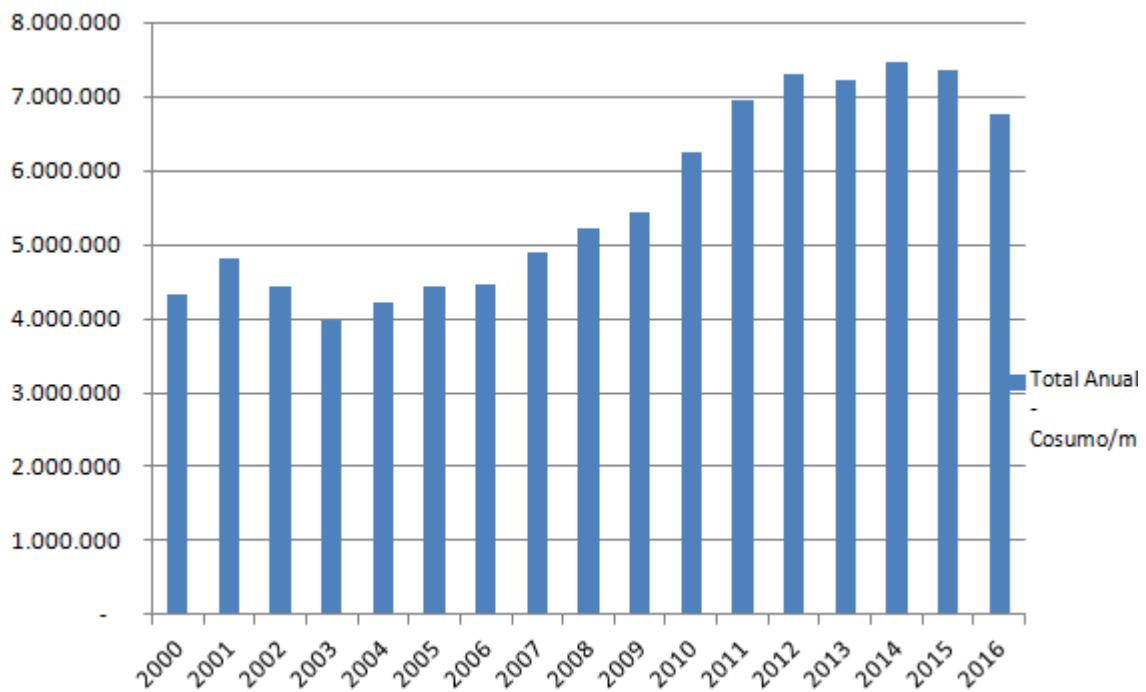


Figura 4: Consumo anual de querosene de aviação (m³). **Fonte:** ANP (2017)

Vale ressaltar que quanto maior for o consumo, maior será o custo que as companhias aéreas terão e maior será a emissão dos gases do efeito estufa.

A inserção do bioquerosene na matriz energética brasileira sinaliza o compromisso brasileiro em mitigar a emissão dos gases produzidos pelo setor aéreo. Por esse motivo stakeholders com interesse direto e indireto no desenvolvimento de biocombustíveis para a aviação, estruturaram em 2013 a Plataforma Brasileira de Biocombustíveis Aeronáuticos. O objetivo desta plataforma é desenvolver projetos, análises e fomentar pesquisas que visem à criação de uma cadeia de valor através de um alicerce de quatro pilares básicos do desenvolvimento sustentável, visando atender os seguintes critérios: econômico, social,

ambiental e inovação (CDIESELBR, 2017). Esta plataforma realça o potencial de liderança do Brasil para criar e fornecer biocombustíveis para a aviação, voltados aos mercados doméstico e internacional. É natural que o pilar inovação seja uma consequência direta do desenvolvimento em conjunto de todos os três outros pilares. Com isso, é relevante afirmar que esses pilares carecem de um pilar extra (aspectos logísticos), pois é fundamental que a cadeia produtiva do bioquerosene seja efetiva em sua totalidade, desde a produção da matéria prima até o abastecimento das aeronaves nos aeroportos.

3.1 PINHAO MANSO, CANA DE AÇÚCAR E ÓLEO DE COZINHA REUTILIZADO

Diante de diversas matérias primas aplicáveis como substitutas, este estudo selecionou três matérias primas com potencial a candidatas por sua efetiva relevância para compor a análise de viabilidade, visando comparar essas opções entre si através do método MACBETH. A justificativa pelo interesse nessas culturas inclui a produtividade potencial, a possibilidade de cultivo do pinhão manso em terras marginais, a cultura já adquirida pelo país através da cana de açúcar e o reaproveitamento do óleo de cozinha usado, o qual não necessita de cultivo e favorece um destino ao seu descarte (logística reversa). Isso vem levando diversas companhias aéreas em todo o mundo a realizar fomento a pesquisas e testes em seus voos comerciais com essas matérias primas (CGEE, 2010).

3.2 ROTAS TECNOLÓGICAS IDENTIFICADAS E APROVADAS

Após o pré-tratamento, as possíveis matérias-primas são submetidas a diferentes processos de conversão agrupados em três categorias: processos químicos para lipídeos, processo bioquímico e termoquímico para biomassas. Os processos químicos para lipídeos e processos termoquímicos foram as primeiras rotas tecnológicas aprovadas pela ASTM. Recentemente, a rota bioquímica foi aprovada pela ASTM, a qual reconhece o processo de obtenção oferecido pela empresa americana Amyris. Com isso, a ANP também reconheceu a aprovação deste processo.

Para melhor entendimento das rotas tecnológicas, uma descrição dos processos de obtenção do bioquerosene de aviação é descrita a seguir:

- Rota ASTM 7566 A2 – Processos Químicos para Lipídios: contempla processamento do tipo HEFA (hydroprocessed esters and fatty acids), permitindo a adição de até 50% em volume ao querosene de aviação. A variação de custo de conversão neste processo está ligada à demanda de hidrogênio requerida para os diferentes tipos de matéria-prima utilizada. Neste tipo de processo pode-se utilizar óleos vegetais de diferentes matérias-primas, como o óleo de palma, camelina e pinhão-manso ou pode-se também fazer uso da gordura animal ou óleo de cozinha reutilizado (ASTM, 2017);

- Rota ASTM 7566 A1 – Processo Termoquímico para Biomassa: contempla o processamento de conversão do tipo Fischer Tropsch (FT), podendo também ser adicionado ao querosene de aviação ao volume de até 50%. Nesta rota as fontes da biomassa incluem resíduos agrícolas ou resíduos verdes urbanos. O custo do processo ainda é considerado alto, devido às condições muito especiais exigidas pelas reações (alta temperatura e pressão), baixa densidade da biomassa, logística e transporte (IATA, 2015);

- Rota ASTM 7566 A3 – Processo Bioquímico, conhecida como SIP (synthesized iso paraffinic) ou querosene isoparafina: é obtido da fermentação de açúcares utilizando microorganismos e leveduras modificadas geneticamente para transformar a matéria prima constituída de carboidratos (açúcares) em hidrocarbonetos. Como exemplo, citamos o caldo da cana, que é evaporado e fermentado em um biorreator por uma levedura recombinante. O resultado da fermentação com a utilização desta levedura é o farnesene ao invés do etanol. Neste processo podem-se utilizar diversas culturas agrícolas que oferecem resíduos não comestíveis,

ou seja, espigas de milho, trigo, palha de arroz e bagaço de cana. A plataforma bioquímica faz uso de tecnologias estritamente inovadoras e são potenciais pontos de ruptura de processos tecnológicos (IATA, 2015). A tecnologia desenvolvida pela Empresa Amyris é um processo de alto desempenho que produz o bioquerosene *drop-in* com origem no bagaço da cana-de-açúcar e que já está sendo comercializado no mercado nacional e internacional, podendo ser adicionado ao volume de até 10% ao querosene de aviação. As demais rotas, possui elevado custo de produção.

4. MODELAGEM MATEMÁTICA

4.1. INFORMAÇÃO ORDINAL E CARDINAL

Seja X um conjunto finito de opções. Medir ordinalmente a atratividade das opções x de X consiste em associar a cada x um valor numérico – um número real $v(x)$ – tal que satisfaça as condições de preferência estrita (1) e de indiferença (2), conforme descritas a seguir.

$$\forall x, y \in X: [x \text{ é mais atrativa do que } y (xPy) \Leftrightarrow v(x) > v(y)] \quad (1)$$

$$\forall x, y \in X: [x \text{ e } y \text{ são igualmente atrativas } (xIy) \Leftrightarrow v(x) = v(y)] \quad (2)$$

A escala numérica $v: X \rightarrow R: x \rightarrow v(x)$ pode ser construída solicitando a um avaliador informação ordinal sobre a atratividade relativa das opções de X . Isto é, pedindo a esse avaliador que ordene as opções por ordem decrescente de atratividade. Além disso, pode-se utilizar uma informação mais detalhada sobre a atratividade das opções, solicitando ao avaliador informação cardinal, isto é, que associe a cada opção x um valor numérico $v(x)$ tal que satisfaça, não somente as condições (1) e (2), mas também a condição adicional (3), a seguir.

$\forall w, x, y, z \in X$ com x mais atrativo que y e w mais atrativo que z , o quociente $[v(x) - v(y)] / [v(w) - v(z)]$ mede a diferença de atratividade entre x e y quando a diferença na atratividade entre w e z é tomada como unidade de medida. (3)

Esta nova escala numérica $v: X \rightarrow R: x \rightarrow v(x)$ pode ser definida posicionando as opções de X sobre um eixo vertical de tal forma que:

$\forall x, y \in X: x$ é posicionado acima de y se e somente se x é mais atrativa do que y , ou seja, tem-se a informação de valor ordinal.

As distâncias relativas entre as opções no eixo vertical refletem as diferenças relativas de atratividade entre elas, ou seja, tem-se a informação de valor cardinal. Uma escala v que satisfaça as condições (1), (2) e (3) é uma escala numérica de intervalos.

4.2. CONSTRUÇÃO DO MODELO E INSERÇÃO DOS CRITÉRIOS

Os aspectos norteadores da Plataforma Brasileira de Bioquerosene precisam ser levados em consideração por ocasião da seleção dos critérios. Por esse motivo, foram destacados os seguintes critérios:

a) Aspectos Econômicos – o critério a ser utilizado considera o preço estimado de vendas, obtido apor meio dos valores pesquisados nos testes pelas companhias aéreas e pelo estudo proposto por Yao (2017), utilizando métodos estocásticos, mais precisamente Simulação de Monte Carlo, a qual preconiza parâmetros de cenários probabilísticos futuros, baseados em possibilidades e tendências. Por não ser objeto direto dessa pesquisa, tal simulação não será abordada neste trabalho.

b) Aspectos ambientais – o critério a ser utilizado considera o nível de emissão de CO₂, emitido por cada matéria prima, proposto e disponibilizado pela IATA.

c) Aspectos sociais – o critério a ser utilizado considera o impacto social da produção da matéria prima em larga escala.

d) Aspectos logísticos – o critério a ser utilizado considera a disponibilidade da cadeia de suprimentos, desde o cultivo da matéria prima até o efetivo abastecimento das aeronaves nos aeroportos.

Tais critérios encontram-se elencados na Figura 5, a seguir.

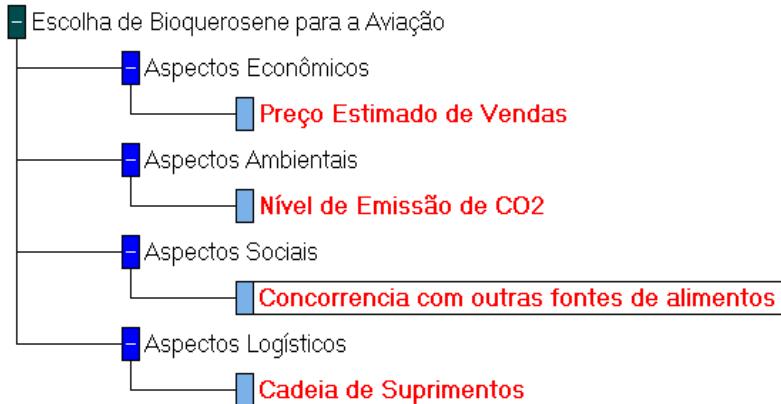


Figura 5: Critérios para o rankeamento dos biocombustíveis. **Fonte:** Autores (2017)

4.3. DEFINIÇÃO E INSERÇÃO DAS OPÇÕES (MATÉRIAS PRIMAS)

A fim de escolher o biocombustível com maior potencialidade, tomando por base o item 3 deste estudo, onde foram listadas as matérias primas com potencial a candidatas ao querosene de aviação, foram considerados o pinhão manso, o óleo de cozinha reutilizado e a cana de açúcar. O pinhão manso e óleo de cozinha reutilizado foram as matérias primas mais utilizadas em testes pelas companhias aéreas durante o período de 2011 e 2014 (IATA, 2015). Já a cana de açúcar traz vantagem competitiva ao Brasil, pelo vasto sucesso e know-how adquirido através dos anos com o desenvolvimento e produção do etanol automotivo. Com isso, tais afirmativas reforçam a escolha por essas três opções, que servirão de parâmetro base para a simulação proposta neste estudo. A Figura 6 apresenta a inserção no software das matérias primas escolhidas como candidatas.

Opções			
-	+	Nome	Nome abreviado
		1 Pinhão Manso	Pinhão Manso
		2 Óleo Cozinha Reutilizado	Óleo Cozinha
		3 Cana de Açúcar	Cana de Açúcar
<input type="button" value="Inserir"/>		<input type="button" value="Remover"/>	<input type="button" value="Propriedades"/>
<input type="button" value="Performances"/>			

Figura 6: Inserção das opções no software M-MACBETH

4.4. ADEQUAÇÃO DOS VALORES DOS CRITÉRIOS À ESCALA MACBETH

Foi necessário, adequar todos os valores dos critérios quantitativos e qualitativos à escala MACBETH que compara a diferença de atratividade de cada critério, utilizando escala fixa textual, cujas opções são: Nula, Muito Fraca, Fraca, Moderada, Forte, Muito Forte e Extrema.

4.4.1. CRITÉRIOS QUANTITATIVOS

Com o objetivo de se obter um valor que se aproxime ao máximo das opções da escala MACBETH, toda a escala recebeu proporções percentuais. A Tabela 1 apresenta o esquema de proporcionalidade utilizado.

Tabela 1: Proporcionalidade – Escala de Diferença

Percentual	Escala MACBETH
100%	Extrema
83,3%	Muito Forte
66,7%	Forte
50,0%	Moderada
33,3%	Fraca
16,7%	Muito Fraca
0	Nula

Fonte: Autores (2017)

Foi possível adequar o custo e o nível de emissão de CO2 de cada matéria prima, que possuem valores quantitativos, às opções da escala MACBETH, identificando assim os percentuais de atratividade de cada matéria prima, conforme as Tabelas 2, 3 e 4.

Tabela 2: Preço Estimado de Venda e Emissão de C02

Matéria Prima	Preço Venda (USD/Litro)	Emissão CO2%
Pinhão Manso	1,90	30,0
Cana de Açúcar	2,63	15,5
Óleo reutilizado	2,50	14,0

Fonte: Autores (2017)

Tabela 3: Percentuais de atratividade – preço estimado de venda

Preço Estimado de Venda			
	Pinhão Manso	Cana de Açúcar	Óleo Reutilizado
Pinhão Manso	-	100%	83%
Cana de Açúcar	-	-	-
Óleo Reutilizado	-	17%	-

Fonte: Autores (2017)

Tabela 4: Percentuais de atratividade – emissão de CO2

Emissão de CO2			
	Pinhão Manso	Cana de Açúcar	Óleo Reutilizado
Pinhão Manso	-	-	-
Cana de Açúcar	90,63%	-	-
Óleo Reutilizado	100%	9,37%	-

Fonte: Autores (2017)

Identificadas as proporções de diferenças entre os critérios Preço de Vendas e Emissão de CO2, foram preenchidas as opções no software M-MACBETH, conforme as figuras 7 e 8. Em análise, identificou-se que o preço de vendas do pinhão manso é muito distante da cana de açúcar e distante também do óleo de cozinha reutilizado. No entanto, o preço da cana de açúcar é bem próximo ao preço do óleo de cozinha reutilizado. Para os índices de emissão de CO2, constatou-se que o pinhão manso possui um índice maior de emissão do que os outros dois itens. Já o óleo de cozinha apresenta uma discreta vantagem em relação à cana de açúcar.



Figura 7: Atratividade de critérios – Preço Estimado de Vendas. **Fonte:** Autores (2017)



Figura 8: Atratividade de Critérios – Emissão de CO2. **Fonte:** Autores (2017)

4.4.2. CRITÉRIOS QUALITATIVOS

Os critérios qualitativos precisam também ser adequados à escala MACBETH. Neste caso, optou-se pela adequação dos critérios por meio de uma escala likert de 5 pontos, conforme ilustra a Figura 9. A escala Likert ou escala de Likert é um tipo de escala de resposta psicométrica usada habitualmente em questionários, e é a escala mais usada em pesquisas de opinião. Ao responderem a um questionário baseado nesta escala, os perguntados especificam seu nível de concordância com uma afirmação.

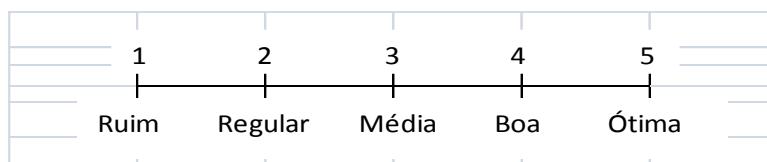


Figura 9: Escala Likert. **Fonte:** LIKERT (1932)

Assim sendo, tornou-se possível a pontuação dos dois critérios restantes, conforme apresenta a Tabela 5. Foi selecionada a base de comparação indireta níveis quantitativos de desempenho, que indica ao software que se pretende avaliar indiretamente a atratividade das alternativas no critério usando uma função de valor para converter as performances das opções em pontuações.

Tabela 5: Critérios qualitativos de performance

Matéria Prima	Concorrência fontes alimentares	Cadeia de Suprimentos
Pinhão Manso	Ótima	Ruim
Cana de Açúcar	Boa	Média
Óleo Reutilizado	Regular	Ótima

Fonte: Autores (2017)

O óleo de cozinha reutilizado apresenta-se como “ótima” opção em relação aos outros dois candidatos no critério concorrência com outras fontes alimentares, pois não concorre diretamente com nenhuma outra fonte alimentar. Porém seria necessário considerável investimento e desenvolvimento de toda sua cadeia de suprimentos, incluindo um amplo trabalho de logística reversa, o que ainda precisa ser desenvolvido e comprovado através de estudo de viabilidade específico. Por essa razão recebe pontuação “ruim” neste critério.

O pinhão manso aparece como “boa” opção no critério concorrência com outras fontes alimentares, por não disputar espaço diretamente com nenhuma outra fonte alimentar, sendo imprópria para consumo humano e animal. No entanto, mesmo cultivada em solos pobres, haveria um risco de ocupar o espaço reservado para o cultivo de algum tipo de plantação destinada ao consumo alimentar. Além disso, a produção em larga escala poderia conflitar com outras fontes do setor agrícola. Já no critério cadeia de suprimentos, recebe pontuação “média”. Mesmo não possuindo uma cadeia de suprimentos existente, poderia facilmente se valer em boa parte, da cadeia implantada no país de outros produtos, como a da soja por exemplo.

A cana de açúcar concorre diretamente com outras fontes de alimentos (ocupa espaço de plantação com outras fontes de alimentos), por isso recebe uma pontuação “regular”. No entanto, graças ao desenvolvimento da cultura do etanol, a qual coloca o Brasil em posição de absoluto destaque no mercado doméstico e internacional, já possui uma cadeia de suprimentos desenvolvida, precisando somente, de adequações ao setor aéreo. Por esta razão, foi elencada como “ótima”. A Figura 10 apresenta a tabela de performances.

Opções	Concorren. alimentos	Cad Suprimentos
Pinhao Manso	Boa	Média
Óleo Cozinha	Ótima	Ruim
Cana de Açúcar	Regular	Ótima

Figura 10: Critérios qualitativos de performances. Fonte: Autores (2017)

4.5. REFERÊNCIAS DE PONDERAÇÃO

Após a definição dos critérios é necessário identificar seus itens de referências ponderadas globais (inferior e superior) para que se faça um julgamento e pontuação da maneira mais assertiva possível. Baseado nas informações colhidas e inseridas nas tabelas de critérios (valores quantitativos e qualitativos), faz-se essa ponderação, indicado os itens que possuem o menor e o maior valor. Por exemplo, o preço de venda da cana de açúcar é o menor, portanto, servirá como parâmetro inferior dentro do critério Preço Estimado de Vendas. O oposto ocorre com o pinhão manso. A Figura 11 apresenta as referências de ponderação, indicando os itens que possuem o menor e o maior valor.

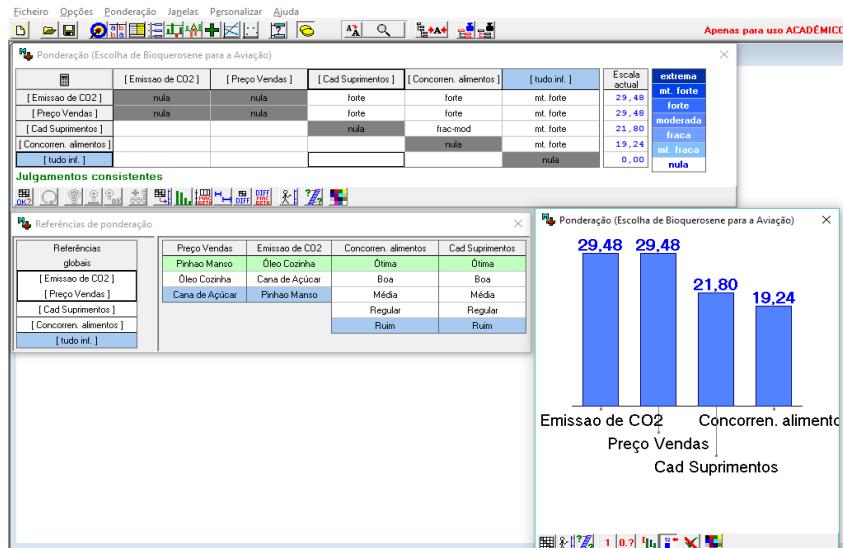


Figura 11: Referências de ponderação

Nota-se que, por uma questão evidente, os itens critérios “Emissão de CO₂” e “Preço de Vendas” possuem a mesma ponderação devido à importância e relevância entre si.

4.6. APLICAÇÃO DO MODELO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A aplicação do modelo para os biocombustíveis teve como resultado as pontuações relacionadas da Figura 12. Pode-se observar que nenhuma alternativa obteve pontuação global igual a 100, o que significa que não há um biocombustível que seja excelente quando considerados diversos critérios. Porém, a maior pontuação global (54,81) é a do pinhão manso. Além de ecologicamente sustentável, é uma matéria prima que apresenta baixo custo de cultivo e gera impacto positivo em comunidades locais.

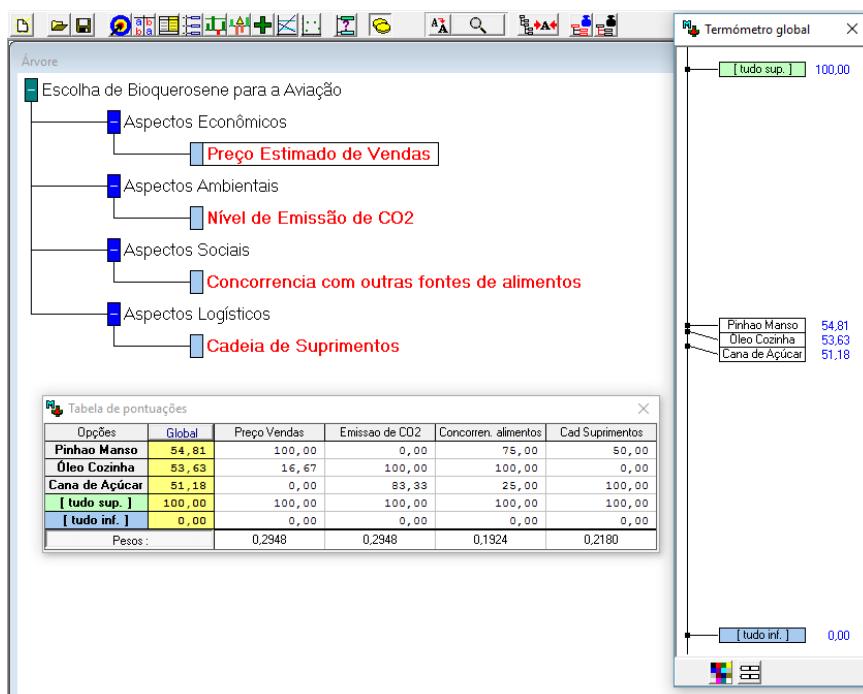


Figura 12: Pontuação global das opções

O modelo mostrou-se robusto, pois, mesmo com a alteração dos pesos dos critérios a classificação das alternativas mostrou-se consistente.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo mostrou que a Pesquisa Operacional pode ser uma importante ferramenta à tomada de decisão. Como todo método multicritério de apoio à decisão, embora pareça uma trivialidade, a opção selecionada dependerá, em última instância, da informação introduzida pelo decisor no processo. Vale ressaltar que nenhuma opção obteve a pontuação 100%, o que significa que não há um biocombustível que seja excelente quando considerados diversos critérios. Assim, o método MACBETH apontou o pinhão manso como a melhor opção, obtendo a pontuação 54,81. Por fim, o desafio é atingir uma produção em larga escala que atenda às demandas da aviação, considerando a participação dos biocombustíveis na matriz energética brasileira.

Do ponto de vista ambiental, é seguro afirmar que todas as três matérias primas possuem elevado potencial sustentável, e, caso sejam introduzidas na matriz energética brasileira, trarão uma significativa contribuição para a sociedade no que diz respeito à redução do passivo ambiental gerado pela aviação comercial.

6. REFERÊNCIAS

- AMYRIS.** Trans-β-Farnesene – Amyri’s Renewable Hydrocarbon Building-Block. Disponível em: <http://farnesene.net/>. Acesso em 06/06/2017.
- ANAC - Agencia Nacional de Aviação Civil.** Disponível em <http://www.anac.gov.br>. Acesso em: 06/05/2017.
- ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis.** Disponível em <http://www.anp.gov.br>. Acesso em: 06/05/2017.
- ASTM – American Society for Testing and Materials.** Disponível em: <https://www.astm.org/Standards/D7566.htm>. Acesso em 26/04/2017.
- BANA E COSTA, C. A.; VANSNICK, J. C.** A theoretical framework for Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique (MACBETH). In: CLÍMACO, J. (Ed.). Multicriteria Analysis. Berlim: Springer Verlag, 1995. pp. 15-24.
- BANA E COSTA, C.A.; DE CORTE, J. M.; Vansnick, J.C.** M-MACBETH Versão 2.4.0: Guia do utilizador, v. 15, 2005. Disponível em: <http://www.m-macbeth.com>. Acesso em: 19/04/2017.
- BETIOLO, C. R.; ROCHA, G. C.; MACHADO, P. R. DE C.** Iniciativas da aviação para redução das emissões de CO₂. In: VIII Sintraer/III Ridita, São Paulo, 2009. pp.1-9.
- BOEING, EMBRAER, FAPESP, UNICAMP.** Plano de voo para biocombustíveis de aviação no Brasil: Plano de Ação. 2013 ed. Disponível em: <http://www.fapesp.br/publicacoes/plano-de-voo-biocombustiveis-brasil-pt.pdf?x=2>. Acesso em: 26/04/2017.
- BRIOZO, R. A.** Localização de uma Unidade de Pronto Atendimento - UPA 24h: uma aplicação de método multicritério de tomada de decisão. 2013. 121f. Tese (Mestrado em Gestão de Operações) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2017.
- CAPDEVILLE, G.D.; LAVIOLA B. G.** Pinhão-manso: insucesso ou erro de estratégia?. Biodselbr, 2013. Disponível em <https://www.biodieselbr.com/noticias/materia-prima/jatropa/pinhao-manso-insucesso-erro-estrategia-100913.htm>. Acesso em: 04/06/2017.
- CDIESELBR.** The Brazilian Biojetfuel Platform. Disponível em: <http://cdieselbr.com.br/Documents/2013.09.11%20Plataforma%20Brasileira%20Bioquerosene-Ubrabio.pdf>. Acesso em: 14/02/2017.
- CGGE.** Biocombustíveis aeronáuticos: Progressos e desafios - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Brasília, n. 8, 2010. Disponível em: https://www.cgee.org.br/documents/10182/734063/biocombustiveis_aeronauticos_24012011_9559.pdf. Acesso em: 22/04/2016.
- Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.** Portal Capes de Periódicos. Disponível em: <http://www.periodicos.capes.gov.br/>. Acesso em Acesso em: 03/03/2017.

COSTA, H. G; MANSUR, A. F. U.; FREITAS, A. L. P.; DE CARVALHO, R.A. ELECTRE TRI aplicado a avaliação da satisfação de consumidores. Produção, v. 17, n. 2, p. 230-245, 2007. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/prod/v17n2/a02v17n2>. Acesso em: 01/06/2017.

GOMES, E. G.; MELLO, J. C. C. B. S.; MANGABEIRA, J. A. C. Índice multicritério de bem estar social rural em um município da Região Amazônica. Pesquisa Operacional, v. 28, n. 1, p. 141-160, 2008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0101-74382008000100008>. Acesso em: 28/05/2017.

IATA – International Air Transport Association. IATA Sustainable Aviation Fuel Roadmap, 1. ed, 2015. Disponível em <http://www.iata.org>. Acesso em: 02/04/2017.

IEEFA – Institut for Energy Economics and Financial Analysis. Year Review 2016 - Disponível em <http://ieefa.org/ieefa-year-review-2016/>. Acesso em: 02/04/2017.

LIKERT, Rensis. A Technique for the Measurement of Attitudes. **Archives of Psychology**, **140**: pp. 1-55. 1932

REN21 – Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. Renewables 2016: Global Status Report. 2016 ed. Disponível em: <http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR_2016_Full_Report_REN21.pdf>. Acesso em 02/03 2017.

TOLEDO, M. Indicadores e metas SMART: saiba tudo sobre o método – Novembro, 2016 – Disponível em: <http://www.administradores.com.br/artigos/negocios/indicadores-e-metas-smart-saiba-tudo-sobre-o-metodo/100113/> - Acesso em: 14/04/2017.

YAO, G.; STAPLE, M. D.; MALINA, R.; TYNER, W. E. Stochastic techno-economic analysis of alcohol-to-jet fuel production. Biomed Central. Londres, Inglaterra: 2017. pp .1-13.