



PLANO ESTRATÉGICO DA PRODUÇÃO DE BIODIESEL UTILIZANDO MAMONA ATRAVÉS DE MODELO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA-MISTA

STRATEGIC PLANNING OF BIODIESEL PRODUCTION FROM CASTOR SEEDS USING MIXED INTEGER LINEAR PROGRAMMING

Pedro Senna^a; Fabrício Oliveira^b; Silvio Hamacher^b; Guilherme Romeiro^c

^a Centro Federal de Educação Tecnológica (CEFET/RJ) – Rio de Janeiro, RJ, Brasil – Departamento de Engenharia de Produção

^b Pontifícia Universidade Católica (PUC) – Rio de Janeiro, RJ, Brasil – Departamento de Engenharia Industrial

^c Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobras) – Rio de Janeiro, RJ, Brasil – Petrobras Biocombustível (Pbio)

Resumo

Neste trabalho, é apresentado o planejamento estratégico da cadeia de suprimentos de biodiesel produzido a partir da mamona. Esta cadeia possui a particularidade de ser baseada em agricultura familiar, o que dificulta o envio de cargas para as usinas de esmagamento e compromete a eficiência logística da cadeia. Uma alternativa para minimizar o custo logístico total da operação consiste na instalação de entrepostos que concentrem a produção dos agricultores antes do envio ao esmagamento, de forma a aumentar a taxa de ocupação dos caminhões e, dessa forma, reduzir custos. No entanto, a definição da localização ótima de tais entrepostos envolve um problema combinatório complexo. Dessa forma, é proposto um modelo matemático de programação linear inteira-mista (PLIM) que visa apoiar o processo de desenho da rede logística com o foco em minimizar seus custos de instalação e operação. Como principal resultado do trabalho, destaca-se a rede logística otimizada, indicando os fluxos e entrepostos a serem instalados. Além disso, é mostrado impacto da quebra de safra no projeto da cadeia de suprimentos, que pode representar um grande impacto no número de entrepostos que deverão compor a cadeia.

Palavras-chave: Programação linear inteira-mista, Biodiesel, Mamona, Logística.

Abstract

This paper presents the strategic planning of a biodiesel supply chain, in which the oil is produced from castor seeds. The seed production is based on small family farms, what imposes difficulties on the seed transportation and often compromises the logistic efficiency of the supply chain. A possible solution to minimize these costs is to install warehouses that are capable of concentrating the seed production in order to increase occupancy rates and thus, reduce costs. However, the definition of the optimal location of such warehouses involves a complex combinatorial problem. In this sense, we propose a mixed-integer linear programming (MILP) model that aims to support the decision making process concerning the location of such warehouses. As a main result of this work, we highlight the optimized logistics network, its flows and installed warehouses. Moreover, we consider some additional scenarios to assess the impact of lower crop levels in the supply chain design and the number of warehouses.

Key-words: Mixed-integer linear programming, Biodiesel, Castor seeds, Logistics.

1. INTRODUÇÃO

O biodiesel pode substituir total ou parcialmente o óleo diesel de petróleo em motores automotivos. Sua utilização possibilita a economia de divisas com a importação de petróleo e óleo diesel, além de gerar empregos em áreas geográficas menos atraentes para outras atividades

econômicas e, assim, promover inclusão social (Ferreira *et al.* Borenstein, 2007).

O mercado de biodiesel tem crescido de forma significativa nos últimos anos, na medida em que este combustível vem se tornando uma importante alternativa ao petróleo. Lançado em 2004, o Programa Nacional de Uso e Produção de Biodiesel (PNPB) visa a promover o desenvolvimento regional em áreas carentes por meio da inclusão de agricultores familiares na cadeia produtiva (PNPB, 2013).



Neste programa, destaca-se a produção de biodiesel a partir da mamona fornecida por pequenos produtores agrícolas da região nordeste. Todavia, estes agricultores se encontram dispersos em uma região extensa, com acesso por uma rede rodoviária precária, o que gera um importante problema de otimização logística dentro desta cadeia de suprimentos. Assim, uma das principais questões é a localização ótima de entrepostos de forma a centralizar as entregas destes pequenos agricultores para as usinas de esmagamento da mamona.

O objetivo geral do trabalho é propor um modelo de otimização para apoiar o planejamento estratégico da cadeia produtiva de biodiesel produzido através da mamona. Mais especificamente, o presente trabalho visa a localizar entrepostos e alocar fluxos de forma a minimizar o custo total da rede logística.

Para atingir tais objetivos, foi construído um modelo PLIM, aplicado em um caso real e que serviu de base para a tomada de decisões estratégicas no que diz respeito ao projeto desta rede logística.

Na Seção 2, é feita a revisão da literatura acerca do tema; na Seção 3, é descrito o problema solucionado; na Seção 4, é

apresentado o modelo matemático; a Seção 5 apresenta um estudo de caso real; e a Seção 6 apresenta as conclusões.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Segundo Leão (2009), a disseminação do biodiesel como substituto do diesel fóssil é um fenômeno global, no entanto, com diferentes motivações. Ainda segundo o autor, nos Estados Unidos a principal motivação é o estabelecimento de uma matriz energética menos dependente do Petróleo, enquanto na Europa a principal motivação é garantir um crescimento econômico ambientalmente sustentável. No Brasil, o governo está focado nos benefícios sociais que a produção do biodiesel a partir da agricultura familiar pode trazer em termos de geração de emprego e melhor distribuição de renda no campo.

O fato da produção de oleaginosas ser, em grande parte, baseada em agricultura familiar gera dificuldades que a pesquisa operacional em muito pode contribuir para uma solução que diminua os custos da operação.

A cadeia da Figura 1 mostra a sequência de etapas da cadeia de produção de biodiesel baseada em mamona.

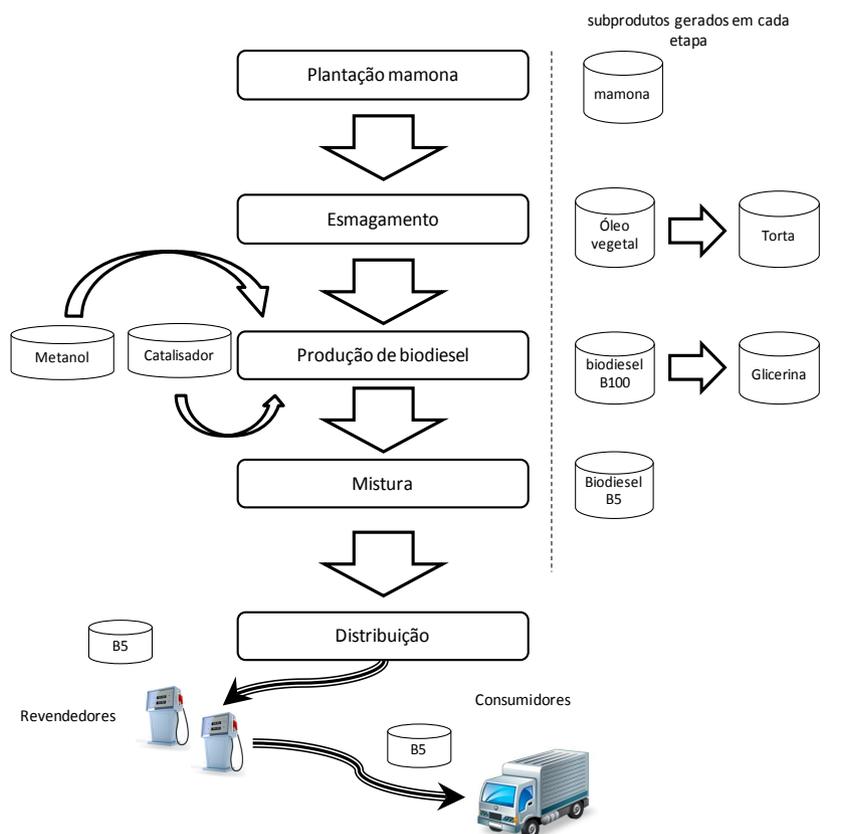


Figura 1. Cadeia do biodiesel, especificamente da mamona

Fonte: Elaborado a partir de Leiras (2005)



Para se produzir biodiesel, o óleo retirado das plantas é misturado com álcool (ou metanol) e depois estimulado por um catalisador. O catalisador é um produto usado para provocar uma reação química entre o óleo e o álcool. Depois o óleo é separado da glicerina (usada na fabricação de sabonetes) e filtrado (Biodiesel BR, 2013).

Comercialmente, o óleo de mamona possui aplicações industriais e medicinais. Da industrialização da mamona, extraem-se o óleo (seu principal produto) e o subproduto nomeado torta (Alves *et al.*, 2004).

A torta de mamona, produzida durante a extração do óleo, é um importante subproduto da cadeia produtiva da mamona. Seu uso predominante é como adubo orgânico, já que se trata de uma rica fonte de nitrogênio. (EMBRAPA, 2007).

O biodiesel B100 é o biodiesel puro sem ainda ser misturado com o diesel mineral (Biodiesel BR, 2013). A produção de glicerina no Brasil, da ordem de 30 mil toneladas por ano, é basicamente absorvida pelo mercado nacional na fabricação de cosméticos e farmacêuticos. (EMBRAPA, 2007).

Outra aplicação da glicerina na área petroquímica é como insumo na produção de acrilatos e outros derivados, gerando propeno, produto de demanda crescente no mercado brasileiro de plásticos (EMBRAPA, 2007). Além disso, a produção de intermediários para a fabricação de plásticos, como o propanodiol, pode ser realizada a partir do beneficiamento da glicerina (EMBRAPA, 2007).

A Tabela 1 mostra as diferentes gerações de tecnologia para a produção de biocombustíveis. No Brasil, a cadeia do biodiesel é classificada como de primeira geração.

Tabela 1. Maneiras de produzir biodiesel

Primeira geração	Matéria - Prima	Tecnologia	Exemplo
Primeira geração de biocombustíveis	Açúcar, amido, óleos vegetais ou gordura animal	<ul style="list-style-type: none"> . Prensagem a frio/quente, extração e transesterificação . Prensagem a frio/quente, extração e purificação . Hidrólise e fermentação 	Bioetanol, óleo vegetal, biodiesel, biogás
Segunda geração de biocombustíveis	Palha de trigo, milho, madeira, resíduos sólidos, amendoim, mamona, cana-de-açúcar	<ul style="list-style-type: none"> . Hidrólise e fermentação . Pirólise, gaseificação e metanação . Transesterificação 	Bioetanol celulósico, Biocombustíveis sintéticos, Biohidrogênio e biodiesel.
Terceira geração de biocombustíveis	Algas	<ul style="list-style-type: none"> . Pirólise, gaseificação e Reação de mudança água/gás . Transesterificação . Fermentação 	Óleo vegetal, biodiesel

Fonte: Elaborado a partir de EAI (2013)

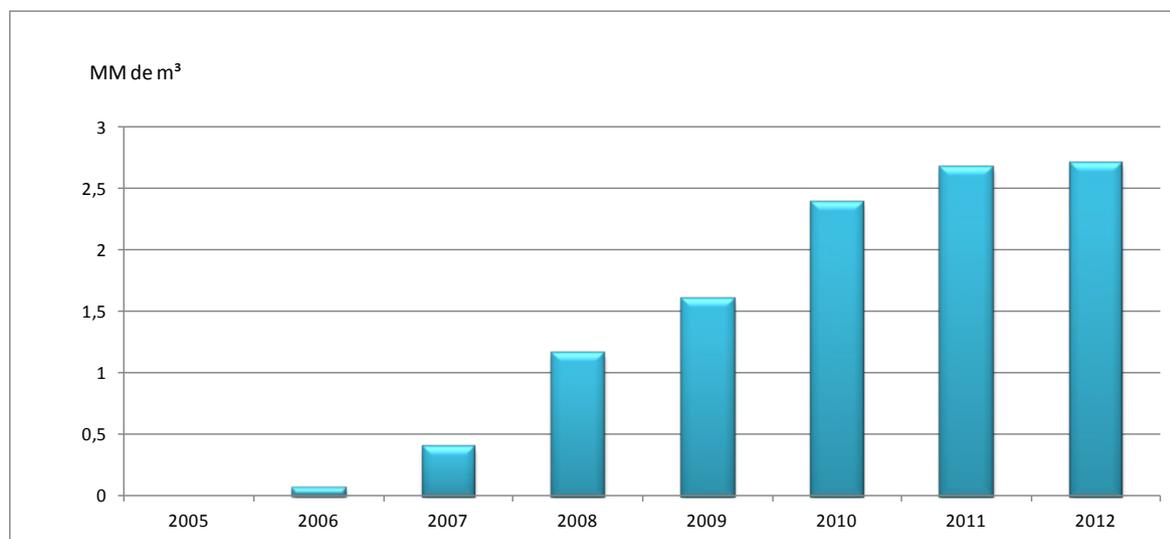


Figura 2. Produção de biodiesel em m³

Fonte: Elaborado a partir de ANP (2013)



Segundo a Agência Nacional de Petróleo (ANP, 2013), a produção de biodiesel no país em 2012 foi de 2.717.483 m³. Na Figura 2, é possível visualizar a produção brasileira nos últimos anos.

Especificamente a partir de 2005, a produção começou a crescer a taxas maiores, muito em função da lei 11.097 de 13 de janeiro de 2005 (Senado Brasileiro, 2013), que fixa em 5%, em volume, o percentual mínimo obrigatório de adição de biodiesel ao óleo diesel comercializado ao consumidor final em qualquer parte do território nacional.

O governo federal lançou o selo combustível social (selo verde) visando ao desenvolvimento da agricultura familiar. Este selo é um conjunto de medidas específicas para estimular a inclusão social na agricultura, estimulando as empresas produtoras de biodiesel a apresentarem projetos que busquem incluir a agricultura familiar em suas cadeias produtivas ou garantam a compra de matéria-prima oriunda deste tipo de agricultura. Em contrapartida, a empresa pode usufruir de uma série de vantagens, entre elas, estar apta a participar de leilões de compra de biodiesel para o mercado interno brasileiro, bem como acesso de melhores condições de financiamento junto ao BNDES (Biodiesel BR, 2013).

Atualmente, o parque industrial do Brasil está voltado basicamente para extração de óleo de soja e reflete o desenvolvimento desta cadeia produtiva, sendo a realidade bastante diferente para outras oleaginosas. No entanto, no que diz respeito à agricultura familiar para a produção de biodiesel no Brasil, o suprimento de matérias-primas vêm se estabelecendo com duas oleaginosas: mamona e girassol (Leão, 2009).

No Brasil, a estratégia traçada consiste em estabelecer a participação de pequenos produtores rurais como pilares do projeto de produção do biodiesel. De um modo geral, a agricultura familiar se caracteriza principalmente pela dispersão territorial, pequena propriedade e pela reduzida escala de produção (Leão, 2009). Segundo dados do DIEESE (2008), a cadeia produtiva agrícola familiar é responsável por 19% do PIB agrícola total do país.

Além do consenso de que o principal entrave para a consolidação da cadeia produtiva de biodiesel no semiárido seja o baixo volume de produção, ainda não foram equacionadas questões relativas à logística de transporte de matérias-primas e biodiesel, bem como as relacionadas à localização de unidades de armazenamento e produção (Azvaradel, 2008). Em muitos casos, é necessário que o produtor da oleaginosa percorra grandes distâncias para recolher pequenos volumes por modal rodoviário e que as estradas estão em péssimas condições, aumentando sensivelmente o custo do produto (Azvaradel, 2008). Além disso, a capacidade de armazenagem instalada e suas condições também constituem uma fragilidade da cadeia produtiva de mamona, particularmente de regiões de pouca

tradição produtiva como o semiárido nordestino (Vieira, 2006).

Segundo Leão *et al.* (2011), apesar da importância do tema do projeto de cadeia de biocombustíveis, poucos são os autores que se debruçam efetivamente sobre o tema, geralmente tratando-o como um problema de localização capacitada.

Sotoft *et al.* (2010) utilizam simulação de processos para avaliar a viabilidade econômica da produção de biodiesel a partir de dois processos químicos distintos. Haas *et al.* (2006) também utilizam simulação para estimativa de custos em uma planta de produção.

Praça *et al.* (2005) elaboraram um modelo de programação linear para estudo preliminar da localização de esmagadoras no estado do Ceará, indicando a relevância das análises para a sustentabilidade da produção de biodiesel com base na agricultura familiar utilizando o Problema de Localização Capacitado (PLC) que Praça (2003) já havia utilizado para localizar centros de distribuição secundária de gás natural.

Oliveira *et al.* (2010) resolveram o problema utilizando a abordagem de otimização robusta em uma cadeia considerando zonas produtoras, usinas esmagadoras e usinas de biodiesel. Entre as várias decisões tomadas neste problema, incluem-se a localização das plantas esmagadoras e a capacidade dessas plantas. Leduc *et al.* (2009) e Pinedo *et al.* (2011) usam programação linear inteira mista (PLIM) para determinar o número ótimo e a localização de plantas de biodiesel.

3. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O modelo matemático desenvolvido para dar suporte ao processo de tomada de decisão é baseado em programação matemática linear inteira-mista (PLIM). O problema considerado pode ser classificado como um problema de localização e alocação de fluxos.

Grafos orientados são utilizados para representar o problema considerado, em que os nós representam os municípios e os arcos representam os fluxos de material entre os municípios. Cada nó do grafo representa uma usina de esmagamento de mamona, um município produtor ou um candidato à localização de um entreposto. Bases fixas são entrepostos maiores e com menos flexibilidade de mudança de lugar, o que se traduz em um maior custo, enquanto pontos de compra são entrepostos de menor porte e, portanto, menor custo. Cabe ressaltar que cada nó pode assumir um ou mais papéis destes mencionados. Cada arco pode representar fluxo de material do tipo primário, ou seja, fluxos originados de pontos de produção e/ou de localidades que não possuam entrepostos instalados, ou fluxos secundários, que representam fluxos originados de municípios que possuam um entreposto.



Tal modelo possui como objetivo minimizar os custos de transporte, de carregamento da mamona, de instalação dos entrepostos e de esmagamento da mamona. A composição destes custos forma a função objetivo do problema.

São objetos de decisão do modelo a localização e o tipo de entreposto a ser instalado, montantes de fluxos entre os municípios produtores e os entrepostos e os montantes de fluxos entre os entrepostos instalados e as usinas de esmagamento.

Para obter a solução ótima, o modelo considera algumas restrições, tais como: o número máximo de entrepostos a serem instalados de cada tipo; toda a produção deve ser escoada para as usinas de esmagamento; deve ser respeitado o balanço material de cada nó (ou seja, o total de cada tipo de mamona que chega a uma determinada localidade deve ser igual ao total que deixa a mesma localidade); deve ser respeitada a estrutura da rede preexistente ou predefinida (ou seja, entrepostos porventura já instalados ou que já tenham sido previamente decididos); os entrepostos instalados não podem movimentar menos que um limite mínimo preestabelecido segundo seu tipo; em cada município só poderá ser instalado um único tipo de entreposto.

4. MODELO MATEMÁTICO

Nesta seção, é feita a descrição do modelo matemático. Inicialmente, são apresentados os conjuntos e parâmetros do modelo. Em seguida, são descritas as variáveis, a função objetivo e as restrições do modelo.

4.1 Conjuntos

A Tabela 2 lista os conjuntos utilizados ao longo do modelo

Tabela 2. Conjuntos

Conjuntos	Índices
Faixas de distâncias	f
Municípios produtores	i
Municípios onde se localizam entrepostos	j
Tipos de Entreposto	k
Municípios onde se localizam usinas de esmagamento	l
Produtos	p
Tipos de transporte	r
Subconjuntos	Índices
Usinas	$u \subseteq$ Municípios

Fonte: Os próprios autores (2013).

As faixas de distâncias são utilizadas pelo fato da função de custo de transporte ser não linear. Assim sendo, foram estabelecidas faixas de distâncias de acordo com as quilometragens percorridas e atribuídos custos a cada uma destas faixas. Os nós são representados pelos índices i, j, l . O índice k representa se o entreposto é um ponto de compra ou uma base fixa. O índice representado por p indica os dois produtos, mamona com casca e mamona sem casca. Os tipos de transporte (primário e secundário) são representados pelo índice r .

4.2 Parâmetros

A Tabela 3 mostra os parâmetros utilizados pelo modelo.

Tabela 3. Parâmetros

CustoEsmagamento(i, p)	Custo por esmagar cada tonelada de mamona em cada local
CapacidadeMaximaEntreposto(i, k)	Capacidade máxima de um entreposto.
CapacidadeMinimaEntreposto(i, k)	Capacidade mínima de um entreposto.
CustoCarregamento(r, i)	Custo de carregar e descarregar o caminhão.
CustoInstalacao(i, k)	Custo de instalar um entreposto.
Distancia(i, j)	Distância entre duas localidades.
LimiteEntrepostos(k)	Quantidade máxima de entrepostos que podem ser instalados na rede.
LimiteFaixa(r, f)	Define as faixa de distância para os custos de transporte.
Producao(i, p)	Produção de cada município.
CustoTransporte(r, f, p)	Custo de transporte por tonelada km.
InstalacoesPredefinidas(i, k)	Instalações abertas por objetivos estratégicos da empresa.

Fonte: Os próprios autores (2013).



4.3 Variáveis

A Tabela 4 mostra as variáveis utilizadas no modelo

Tabela 4. Variáveis

Variável	Descrição	Domínio
Fluxo(r,i,j,p)	A quantidade de produtos transportada entre cidades.	\mathcal{R}^+
Instalacao(i,k)	Se o entreposto é ou não instalado.	(0,1)

Fonte: Os próprios autores (2013).

4.4 Função Objetivo

A função objetivo consiste no somatório dos custos que se deseja minimizar. Neste caso em especial, é composta por quatro parcelas relativas aos custos de carregar os caminhões, ao custo de esmagamento de cada tonelada nas usinas, ao custo de instalar um entreposto e ao custo de transporte.

A equação (1) representa a função objetivo composta pelos custos de carregamento (2), esmagamento (3), instalação (4) e transporte (5).

Função Objetivo:

$$\text{Min } Z = \text{ParcelaCarregamento} + \text{ParcelaEsmagamento} + \text{ParcelaInstalacao} + \text{ParcelaTransporte} \quad (1)$$

ParcelaCarregamento =

$$\sum_r \sum_p \sum_i \sum_j \text{Fluxo}(\text{"primario"}, i, j, p) * \text{CustoCarregamento}(r, i) + \sum_r \sum_p \sum_i \sum_j \text{Fluxo}(\text{"secundario"}, i, j, p) * \text{CustoCarregamento}(r, i) \quad (2)$$

ParcelaEsmagamento =

$$\sum_p \sum_j \sum_i \sum_r \text{CustoEsmagamento}(j, p) * \text{Fluxo}(r, i, j, p) \quad (3)$$

ParcelaInstalacao =

$$\sum_i \sum_k \text{Instalacao}(i, k) * \text{CustoInstalacao}(i, k) \quad (4)$$

ParcelaTransporte =

$$\sum_f \sum_r \sum_i \sum_j \sum_p \text{Fluxo}(r, j, i, p) * \text{CustoTransporte}(r, f, p) * \text{Distancia}(i, j) \quad (5)$$

4.5 Restrições

Nesta seção, é apresentado o equacionamento das restrições. A equação (6) obriga que apenas um entreposto pode ser instalado em um determinado município. A equação (7) mostra a restrição de balanço. O fluxo que chega num nó j somado com a produção de j deve ser igual ao fluxo de saída deste nó. A equação (8) mostra a capacidade mínima necessária para justificar a instalação de um entreposto. A equação (9) mostra o balanço da produção que é enviada por fluxo primário. A equação (10) limita o número máximo de entrepostos. A equação (11) fixa as instalações previamente definidas pela empresa.

$$\sum_k \text{Instalacao}(i, k) \leq 1 \quad \forall i \in \text{Municipios} \quad (6)$$

$$\sum_i \sum_r \text{Fluxo}(r, i, j, p) + \text{producao}(j, p) = \sum_i \sum_r \text{Fluxo}(r, j, i, p) \quad \forall j \in \text{Municipios} \text{ e } \forall p \in \text{Produtos} \quad (7)$$

$$\sum_p \sum_j \text{Fluxo}(\text{"secundario"}, i, j, p) \geq \sum_k \text{CapacidadeMinimaEntreposto}(i, k) * \text{Instalacao}(i, k) \quad \forall i \in \text{Municipios} \quad (8)$$

$$\sum_{i \in \text{usinas}} \text{producao}(i, p) = \sum_i \sum_r \sum_u \text{Fluxo}(r, i, u, p) \quad \forall p \in \text{Produtos} \quad (9)$$

$$\sum_i \text{Instalacao}(i, k) \leq \text{LimiteEntrepostos}(k) \quad \forall k \in \text{TiposEntreposto} \quad (10)$$

$$\text{Instalacao}(i, k) \geq \text{InstalacoesPredefinidas}(i, k) \quad \forall i \in \text{Municipios} \text{ e } \forall k \in \text{TiposEntreposto} \quad (11)$$

5. ESTUDOS DE CASO

Nesta seção, são descritos os dados utilizados no modelo e os resultados da otimização. O modelo foi desenvolvido em AIMMS, que consiste de uma plataforma para desenvolvimento de modelos matemáticos utilizando linguagem própria. Além disso, foi criado um banco de dados em Microsoft Access, o qual é responsável pelo armazenamento dos parâmetros do modelo matemático, bem como dos resultados obtidos após a otimização.

Cabe ressaltar que o posicionamento geográfico (coordenadas) de cada nó (municípios) reflete as coordenadas reais. As distâncias utilizadas também são distâncias reais entre municípios considerando a utilização de rodovias.

A Tabela 5 descreve a quantidade de elementos utilizados.

Tabela 5. Total de elementos considerados

Elementos	Total considerado
Municípios	145
Usinas	2
Candidatos a Ponto de Compra	26
Candidatos a Bases Fixas	9

Fonte: Os próprios autores (2013).

Baseando-se nestes dados de entrada, 145 municípios e 35 candidatos a entrepostos (somando pontos de compra e bases fixas), há um total de 5075 arcos possíveis de fluxo primário. De fluxo secundário, tem-se um total de 70 arcos.

Cabe lembrar que o fluxo primário é o fluxo entre os pequenos produtores e os entrepostos, enquanto o fluxo secundário é aquele entre tais entrepostos e as usinas de esmagamento. Objetivando manter o sigilo da empresa, são apresentadas apenas proporções e a relação entre custos representados pela constante k.



Tabela 6. Custos de carregamento

Tipo de fluxo	Custo de carregamento (κR\$/ton)
Primário	2
Secundário	1

Fonte: Os próprios autores (2013)

A Tabela 7 mostra a tabela de custo de transporte por quilometragem organizada por faixas de quilometragem. Aqui também os dados reais serão preservados, o que é mostrado é uma proporção tomando como base o custo utilizando a constante σ .

Tabela 7. Custos de transporte

Tipo de transporte	Faixa de custo	Custo de transporte (σ R\$)
Primário	Única (custo por quilômetro)	1
Secundário	1 (0-100km)	13,6
Secundário	2 (100-200km)	21,7
Secundário	3 (200-300km)	29,9
Secundário	4 (300-500km)	35,9
Secundário	5 (500-1000km)	77,2
Secundário	6 (1000-1500km)	127,7

Fonte: Os próprios autores (2013)

O Custo do transporte primário é calculado por ton.km de acordo com a constante especificada na Tabela 7. Os demais custos referentes ao transporte secundário são calculados por tonelada em cada faixa específica presente na mesma tabela.

A Tabela 8 mostra os valores absolutos da quantidade produzida por cada estado e o total produzido.

Tabela 8. Produção por estado

Estado	Produção (ton.)
BA	1.871,74
CE	5.589,47
MG	1.364,13
PB	281,02
PE	1.991,77
PI	214,77
RN	279,31
Total	11.592,23

Fonte: Os próprios autores (2013).

São mostrados os fluxos primários (pequenos produtores municipais até entrepostos) representados por setas azuis e secundários (entrepostos até usinas de esmagamento) representados pelas setas vermelhas. Apesar de o mapa mostrar os fluxos retilíneos, ressalta-se que foram utilizadas distâncias reais de rodovias e as setas são apenas para simbolizar os arcos. Os pontos em laranja representam as duas usinas de esmagamento consideradas. Os pontos verdes escuro representam os pontos de compra e os pontos azuis representam as bases fixas. Os pontos em verde claro representam os agricultores familiares.

4.6 Resultados

O modelo matemático gerado possui um total de 50.099 restrições e 51.349 variáveis, das quais 35 são do tipo binário (inteira). O tempo de solução é inferior a 1 segundo com um computador Dell Vostro 3460 com 8Gb de memória RAM e processador Intel i7 2.1GHz. O solver utilizado foi o CPLEX 12.4.

No caso base (PL1), pressupõe-se uma safra de 11.592,23 toneladas. Neste caso, o modelo decidiu por instalar 5 bases fixas (sendo 3 já preestabelecidas) e 15 pontos de compra. A Figura 3 mostra o resumo gráfico da otimização. Neste mapa, em que o otimizador posiciona os nós e arcos de acordo com os dados inseridos, está o resultado da rede logística. Neste relatório, há informações de qual o fluxo deve ser direcionado para qual localidade.

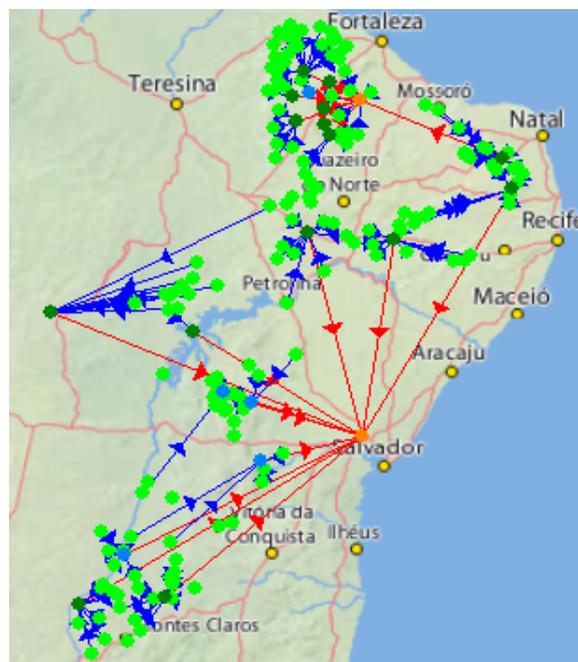


Figura 3. Rede logística após otimização

Fonte: Os próprios autores (2013)

Para este caso, o custo total da cadeia foi de R\$ 2.614.428,76. Assim, o custo unitário de cada tonelada



para a rede logística é de R\$ 292,90. Na Tabela 9, é possível visualizar os custos unitários de instalação e transporte separadamente.

Tabela 9. Custos unitários

Custo	Custo por tonelada (R\$/ton)
Instalação	86,69
Transporte	144,68

Fonte: Os próprios autores (2013)

4.7 Análise de Sensibilidade

Foi realizada uma análise de sensibilidade na produção agrícola para se considerar a possibilidade de ocorrência

de safras menores do que as estimativas recebidas pelas bases de dados. Segundo relatórios do IBGE (Junho, 2013), a estimativa de fevereiro de 2013 de 26.584 foi 67,4% menor em virtude de uma grande seca; portanto, pode-se considerar a estimativa recebida bastante otimista. Neste sentido, os experimentos alternativos consistem na redução da produção do caso-base (PL1). Assim, foram efetuadas dois estudos de caso suplementares (PL2 e PL3); no PL2, os dados de produção são divididos pela metade e, no experimento PL3, são divididos por 4.

Na Tabela 10, pode-se observar a quantidade e a localização dos entrepostos a serem instalados. Como já previamente dito, são 9 municípios candidatos a case fixa e 26 candidatos a ponto de compra.

Tabela 10. Quantidade de Entrepostos selecionados para os experimentos

	PL1	PL2	PL3
Base fixa	5	3	3
Ponto de compra	15	9	6

Fonte: Os próprios autores (2013)

Tabela 11. Resumo dos principais indicadores

	PL1	PL2	PL3
Função Objetivo (R\$)	2.614.428,76	1.639.045,41	1.051.431,54
Produção (ton)	11.592,23	5.796,12	2.898,06
Custo unitário (R\$/ton)	225,53	282,78	362,81
Custo unitário de transporte (R\$/ton)	125,50	160,59	180,11
Custo unitário de instalação (R\$/ton)	75,22	89,90	149,03

Fonte: Os próprios autores (2013)

Para o PL2 e PL3, temos os resultados mostrados na Tabela 11. Pode-se observar que a redução na produção da safra influi significativamente na construção de entrepostos.

4.8 Estudos realizados sem localizações preestabelecidas

Nesta seção, são apresentados estudos em que não há nenhuma premissa com relação à localização prévia dos

entrepostos. Tal localização preestabelecida de entrepostos nos casos anteriores foi motivada por critérios da empresa em questão. Dessa forma, este estudo visa a demonstrar a existência de oportunidades de economia, caso seja possível repensar as decisões de escolha de entrepostos utilizando o modelo proposto. A Tabela 12 mostra os resultados dos três experimentos, sem que haja a localização preestabelecida de algumas bases fixas.

Tabela 12. Comparativo entre experimentos

	PL1	PL2	PL3
Base fixa	4	1	1
Ponto de compra	15	10	8

Fonte: Os próprios autores (2013)

A Figura 4 mostra a diferença no custo total comparando os cenários com e sem as localizações preestabelecidas. Neste caso, sem a necessidade de utilizar as três bases fixas (entrepostos previamente estabelecidos); nos cenários

de menor produção, há a liberdade para colocação de um número menor de bases fixas, o que contribui para uma maior economia. Inclusive, pode-se observar que os pontos de compra constituem no principal instrumento para lidar



com a incerteza na produtividade agrícola, tendo em vista que são estruturas mais baratas, flexíveis e sofrem alteração sensível em seu total de estruturas entre os experimentos. Cabe ressaltar que estas economias podem ser interpretadas como o custo que é pago por impor ao sistema a rede previamente estabelecida.

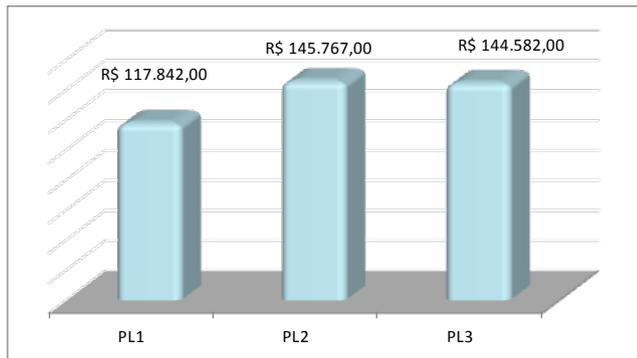


Figura 4. Comparativo da economia obtida em cada uma das safras

Fonte: Os próprios autores (2013)

6. CONCLUSÕES

Neste estudo, foi construído um modelo de programação linear inteira mista (PLIM) com objetivo de otimizar a rede logística de biodiesel produzido através da mamona. Foram considerados dados reais no modelo de otimização possibilitando a aplicação do modelo em um caso prático. Além do caso base (PL1), foram gerados mais dois casos cenários (PL2 e PL3) que compuseram a análise de sensibilidade. Tais cenários revelaram uma grande diferença na quantidade de entrepostos colocados em cada um dos casos.

A principal importância acadêmica deste estudo é mostrar uma aplicação real da PLIM em um projeto do desenho estratégico da cadeia de suprimentos do biodiesel produzido a partir do esmagamento da mamona.

Para a empresa em questão, a principal contribuição é o fornecimento de informações estruturadas que possam embasar uma tomada de decisão criteriosa. A partir de um modelo matemático com estudos estruturados e uma boa perspectiva dos valores de custos, torna-se mais fácil organizar a rede logística e o plano pode ser aceito com maior facilidade por toda a empresa e por possíveis terceirizados a serem contratados para executar a operação logística.

Neste trabalho, apesar dos modelos serem essencialmente determinísticos, há a preocupação em tratar de alguma forma a incerteza nos dados de produtividade agrícola. Para lidar com tal incerteza, foram gerados três cenários. Tais cenários foram gerados a partir da discussão com especialistas e com a observação da série histórica.

O tratamento da incerteza é a principal conexão para futuros estudos. Neste trabalho, a incerteza foi tratada por meio de três cenários otimizados separadamente. Como próxima etapa no estudo deste problema, vislumbra-se a criação de um modelo PLIM estocástico, em que a incerteza e os cenários que a representam sejam incorporados diretamente no modelo.

7. REFERÊNCIAS

Alves, M. O., Sobrinho, J. N., Carvalho, J. M. M. (2004) Possibilidades da mamona como fonte de matéria-prima para a produção de biodiesel no nordeste brasileiro. Documentos do ETENE, Banco do Nordeste do Brasil, Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/52372/1/LV-Possibilidades-da-mamona.pdf> (Acesso em 15 de Julho de 2013).

Anp, Agência Nacional de Petróleo (2013), Sítio eletrônico, disponível em: <http://www.anp.gov.br/> (Acesso em 15 de Junho de 2013).

Azvaradel, A.C. (2008) A contribuição da política estadual para viabilizar a participação da agricultura familiar no programa nacional da produção e uso do biodiesel: o caso da Bahia. Dissertação de mestrado. UFRJ. Rio de Janeiro, RJ.

Biodieselbr.com, Sítio eletrônico, disponível em: <http://www.biodieselbr.com/biodiesel/economia/selo-combustivel-social.htm> (Acesso em 15 de Julho de 2013).

Dieese, (2008), Sítio eletrônico, Estatísticas do meio rural, disponível em: <http://www.dieese.org.br/anuario/2008/estatisticasMeioRural2008.pdf> (acesso em 5/07/2013).

Eai (*Energy Alternatives India*), Sítio eletrônico, disponível em: http://www.eai.in/ref/ae/bio/tf/biomass_tf.html (Acesso em 15 de Julho de 2013).

Embrapa, (2007), Sítio Eletrônico, disponível em: <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Mamona/SistemaProducaoMamona/torta.htm> (Acesso em 15 de Julho de 2013).

Ferreira, L. & Borenstein, D. (2007) "Análise da viabilidade da produção de biodiesel a partir da soja no Brasil", artigo apresentado no XXXIX Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Fortaleza, CE, 28 a 31 de Agosto, 2007, disponível em: http://www.unicruz.edu.br/site/cursos/administracao/downloads/28-05-2008/artigo_ferreira.pdf (Acesso em 15 de Julho de 2013).

Haas, M.J., Mcaloon, A.J., Yee, W.C., Foglia, T.A. 2006, "A process model to estimate biodiesel production costs", *Bioresource technology*, vol. 97, no. 4, pp. 671-678.

IBGE (Instituto Brasileiro de Pesquisa e Estatística), Sítio eletrônico, disponível em <http://www.ibge.gov>



br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/lspa_201303comentarios.pdf (acesso em 16/07/2013)

Leão, R. R. C. C. (2009) Otimização da cadeia de biodiesel baseada na agricultura familiar. Dissertação de Mestrado. PUC-RIO. Rio de Janeiro, RJ.

Leão, R. R. C. C., Hamacher, S., Oliveira, F. (2011) "Optimization of biodiesel supply chains based on small farmers: A case study in Brazil" *Bioresource Technology*, Volume 102, no. 19, pp. 8958-8963.

Leduc, S., Natarajan, K., Dotzauer, E., McCallum, I. & Obersteiner, M. (2009), "Optimizing biodiesel production in India", *Applied Energy*, vol. 86, no. SUPPL. 1, pp. S125-S131.

Leiras, A. (2005), A Cadeia Produtiva do Biodiesel: Uma Avaliação Econômica para o caso da Bahia. Dissertação de Mestrado. PUC-RIO. Rio de Janeiro, RJ.

Oliveira, F., Leão, R., Hamacher, S (2010) "A robust approach for the biodiesel supply chain based on small farmers". Apresentado no XLII SBPO: Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. 30 de Agosto – 3 de Setembro, 2010, disponível em: http://www.sobrapo.org.br/sbpo2010/xliisbpo_pdf/72165.pdf, Bento Gonçalves, RS. (acesso em 5/07/2013).

Pinedo, K. S. & Abreu Y. V. (2011) "Determinação de pontos ótimos para localização e implantação de usinas de biodiesel no estado do Tocantins", *Revista Produção Online Revista Produção Online*. Vol.11, n. 4, pp. 1160-1181 disponível em: <http://producaoonline.org.br/rpo/article/view/828/849> (acesso em 5/07/2013).

Pnpb (Plano Nacional de Produção de Biodiesel), (2013), disponível em <http://portal.mda.gov.br/portal/saf/programas/biodiesel/2286217> (acesso em 5/07/2013).

Praça, E. R., Coutinho, E. J. R., Prata, B. A. & FREITAS, L. A. A. (2005), "Localização otimizada de plantas de produção de biodiesel de mamona no estado do Ceará: Um modelo baseado em programação linear". 3º congresso brasileiro de P&D em petróleo e gás 2 a 5 de outubro, 2005 disponível em: http://www.portalabpg.org.br/PDPetro/3/trabalhos/IBP0205_05.pdf

PRAÇA, E. R. (2003), Distribuição de gás natural no Brasil: um enfoque crítico e de minimização de custos, dissertação de mestrado Fortaleza/CE – Brasil, dissertação de Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.

SENADO BRASILEIRO, (2013), Sítio eletrônico, disponível em: <http://legis.senado.gov.br/legislacao/ListaPublicacoes.action?id=240392&tipoDocumento=LEI&tipoTexto=PUB> (Acesso em 15 de Julho de 2013).

SOTOFT, L.F., RONG, B., CHRISTENSEN, K.V. & NORDDAHL, B. (2010), "Process simulation and economical evaluation of enzymatic biodiesel production plant", *Bioresource technology*, vol. 101, no. 14, pp. 5266-5274.

VIEIRA, J. N. S. (2006), A agroenergia e os novos desafios para a política agrícola no Brasil. O futuro da indústria: Biodiesel. Brasília, DF, 2006 disponível em: http://www.desenvolvimento.gov.br/arquivos/dwnl_1201279825.pdf