

DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO DE ROTAS DE ESCOAMENTO DO ETANOL DA REGIÃO CENTRO-OESTE DO BRASIL PARA EXPORTAÇÃO

Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n3p408-419/2016>

FÁBIO C. BOVOLENTA¹, MARCO A. M. BIAGGIONI²

RESUMO: O grande desafio para o agronegócio nos próximos anos é a infraestrutura logística, uma vez que existem muitas dificuldades em escoar a produção. Para o escoamento do etanol, o País possui uma logística que abrange multimodais de transporte, terminais e vias que visam a fortalecer o corredor exportador. Assim, o presente trabalho analisou o fluxo energético, considerando rotas atualmente projetadas, em construção ou operantes, para o escoamento de etanol da região Centro-Oeste do Brasil (Aparecida do Taboado-MS) até o porto de São Sebastião (SP). Foram concebidas quatro rotas para a análise, contemplando a multimodalidade ou a unimodalidade, envolvendo os modais rodoviário, ferroviário, hidroviário e dutoviário. Foram utilizados fatores energéticos, diretos e indiretos, envolvidos nas operações, para contabilizar os *inputs* e *outputs* do sistema: óleo diesel, energia indireta de máquinas e equipamentos, energia de mão de obra, energia elétrica, além da depreciação energética e da manutenção das vias. Os resultados obtidos indicaram o modal dutoviário como o que menos despendeu energia e o modal rodoviário o de maior demanda energética. Os modais hidroviário e ferroviário também se apresentaram energeticamente viáveis, em comparação ao modal rodoviário.

PALAVRAS-CHAVE: logística de transporte, biocombustível, dutovia, consumo energético.

ENERGY DEMANDS IN ETHANOL LOGISTICS FROM MIDWEST BRAZIL TO EXPORT

ABSTRACT: In the coming years, one of the greatest challenges for agribusiness will be to improve the logistical infrastructure, once major difficulties are currently faced in production transport. In the case of ethanol, Brazil has a logistics covering multimodal transport, terminals and routes that strengthen the export corridor. Thus, this paper analyzed the energy demands in ethanol outflow transport considering routes currently designed, under construction or in operation, in order to flow ethanol outputs from Midwest Brazil (Aparecida do Taboado-MS) to the port of São Sebastião (SP). Four routes were analyzed considering uni- or multimodal transport systems, which involved road, railway, waterway, and pipeline. Direct and indirect energy factors within transport operations were used to account the system inputs and outputs, which were diesel, indirect energy from machinery and equipment, labor energy, electricity, besides energy depreciation and maintenance of roads. The results highlighted the pipeline as being the modal of less energy expenditure and the road of most consumption. The waterway and railway modes also had a feasible energetic performance whether compared to the road transport.

KEY WORDS: transport logistics, biofuel, pipeline, energy demand.

INTRODUÇÃO

A região Centro-Oeste do Brasil destaca-se no cenário nacional quanto à produção das principais commodities agrícolas, entre as quais se destacam o açúcar, o álcool, o milho, a soja, o óleo e o farelo de soja e o trigo. Importante via de escoamento da região, o corredor Centro-Oeste

¹ Tecnólogo Naval, Prof. Doutor, Departamento de Navegação, Faculdade de Tecnologia de Jahu-SP, fabiovoventa@hotmail.com

² Eng. Agrônomo, Prof. Doutor, Departamento de Engenharia Rural, FCA-UNESP/Botucatu-SP, (14) 3880-7520, biaggioni@fca.unesp.br

Recebido pelo Conselho Editorial em: 07/04/2014

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 28/03/2016

envolve traçados de infraestrutura de transporte rodoviário, ferroviário, hidroviário e marítimo, sendo que as rodovias ainda constituem o meio de transporte predominante (BRANCO et al., 2010).

Segundo JASPER et al. (2010), o balanço energético visa a estabelecer os fluxos de energia, identificando sua demanda total e eficiência, refletida pelo ganho líquido de energia e pela relação saída/entrada, além da quantidade necessária para produzir ou processar um quilograma de determinado produto. Nesse processo, quantificam-se todos os insumos utilizados e produzidos que são transformados em unidades de energia. A determinação da eficiência energética é importante instrumento no monitoramento da sustentabilidade de uma cadeia produtiva ante o uso de fontes de energia não renováveis.

Estendendo esta importante ferramenta de análise para a questão da infraestrutura de escoamento da safra brasileira, BIAGGIONI & BOVOLENTA (2010), com o intuito de compreender melhor o consumo de energia utilizado pelos diversos sistemas de transporte, analisaram o fluxo energético no escoamento de soja da região Centro-Oeste do Brasil até o porto de Santos – SP. Os resultados obtidos indicaram um gasto energético específico maior para o modal rodoviário ($0,50 \text{ MJ km}^{-1} \text{ t}^{-1}$), seguido pelo modal ferroviário ($0,42 \text{ MJ km}^{-1} \text{ t}^{-1}$) e, em terceiro, o modal hidroviário ($0,22 \text{ MJ km}^{-1} \text{ t}^{-1}$).

Segundo MILANEZ et al. (2010), seguindo o crescimento de consumo de etanol, a primeira onda de investimentos em logística foi dedicada ao sistema rodoviário. A aquisição de novos equipamentos rodoviários para o aumento da capacidade de transporte tem sido recorrente para as empresas prestadoras de serviços de transporte de combustíveis. Para que as exportações cheguem aos portos, o transporte rodoviário permanece como única alternativa para a grande maioria das usinas, em função de características de rotas curtas, de altos custos dos transbordos intermodais e de deficiências na infraestrutura das demais modalidades no acesso aos portos.

Restringindo-se ao transporte da cana, do açúcar e do álcool, o corredor da hidrovía Tietê-Paraná é o único que contempla, atualmente, a logística dessas cargas. De acordo com GABRIEL FILHO et al. (2009), dentre as vantagens do escoamento hidroviário, é possível destacar a elevada capacidade de transporte, o frete mais barato, cerca de duas vezes menor que o da ferrovia e cinco vezes mais baixo que a rodovia, e o fato de possibilitar o uso da multimodalidade. Do ponto de vista ambiental, é o que possui menor emissão de poluentes, em torno de vinte vezes inferior ao rodoviário e quatro vezes menor que o ferroviário, podendo ser considerado matriz de transporte econômico-ambiental.

A expansão tardia do transporte ferroviário de etanol foi inibida pelas curtas distâncias entre as usinas e o mercado consumidor, principalmente no interior paulista. O crescimento recente das escalas de transporte contribuiu para aumentar a competitividade dessa alternativa. Segundo JUNQUEIRA (2011), são oito os centros coletores de etanol, interligados à malha ferroviária. Através da malha ferroviária, podem atingir os portos de Paranaguá, Santos e São Sebastião. O terminal ferroviário de Paulínia, interligado à malha dutoviária, pode receber álcool diretamente das usinas (por rodovia) ou dos centros coletores (por ferrovia). Pode até ser capaz de enviar o álcool ao porto do Rio de Janeiro, através do sistema dutoviário da Transpetro.

Em 2010, a Petrobras obteve a licença ambiental para iniciar a construção de um alcoolduto que ligará regiões produtoras de Minas Gerais e São Paulo ao porto de Santos e São Sebastião. Para MILANEZ et al. (2010), novos ganhos de competitividade podem ser obtidos com o início da operação dos “alcooldutos”. Entretanto, para esses investimentos se viabilizarem, os volumes movimentados de etanol deverão atingir níveis muito superiores aos atuais. Ainda segundo MILANEZ et al. (2010), para que possa ser viabilizada a construção de uma dutovia com 500 km de distância, seriam necessários cerca de 4,5 milhões de metros cúbicos de etanol por ano.

Tendo em vista as dutovias representarem uma alternativa com grande potencial inovador quando se busca uma logística de transporte mais sustentável para os grânéis líquidos, o presente trabalho objetiva realizar uma análise energética de quatro rotas de escoamento do etanol, da região Centro-Oeste do Brasil para um porto marítimo exportador, contemplando três alternativas

unimodais (rodoviária, ferroviária e dutoviária) e uma multimodal (hidro-duto-ferroviária) de transporte.

MATERIAL E MÉTODOS

A obtenção dos dados, em sua maioria, baseou-se na coleta junto às empresas, instituições e pessoas envolvidas no transporte, considerando os diferentes modais (hidro, rodo, ferro e dutoviário), partindo de Aparecida do Taboado (MS) com destino até São Sebastião (SP), passando por Anhembi (SP) e/ou Paulínia (SP). Foram coletadas informações sobre logística, multimodalidade de transporte e coeficientes energéticos.

Iniciou-se pela roteirização multimodal, isto é, foram selecionados os principais caminhos para se atingir o destino desejado, combinando-os com os modais propostos neste estudo. Nem todas as quatro rotas estabelecidas estão em operação, pois alguns trechos podem estar em construção ou em fase de projeto, conforme apresentado na Figura 1.

Realizou-se, na sequência, o estudo da mão de obra para a movimentação do etanol e a delimitação dos materiais e equipamentos envolvidos, finalizando com a conversão dos fatores físicos em energéticos.

Para todas as rotas e modais estudados, adotou-se um “fator de equivalência de carga” (F_{eq}), deixando cada modalidade de transporte em condições semelhantes de carga transportada. Assim, nas rotas R1 e R2, por transportarem os mesmos volumes de carga em seus respectivos trechos, os fatores foram mantidos em 1,0. Na rota R3, devido às diferenças entre os volumes transportados nos dois trechos (Figura 1), foi necessário aplicar uma correção na carga movimentada na segunda etapa da viagem, a qual transportou o volume 2,48 vezes menor que na etapa inicial. Na última rota R4, tendo em vista os menores volumes transportados pelos comboios hidroviário e ferroviário, em relação ao volume transportado pelo duto, fatores de equivalência foram empregados no primeiro e no último trecho (Figura 1).

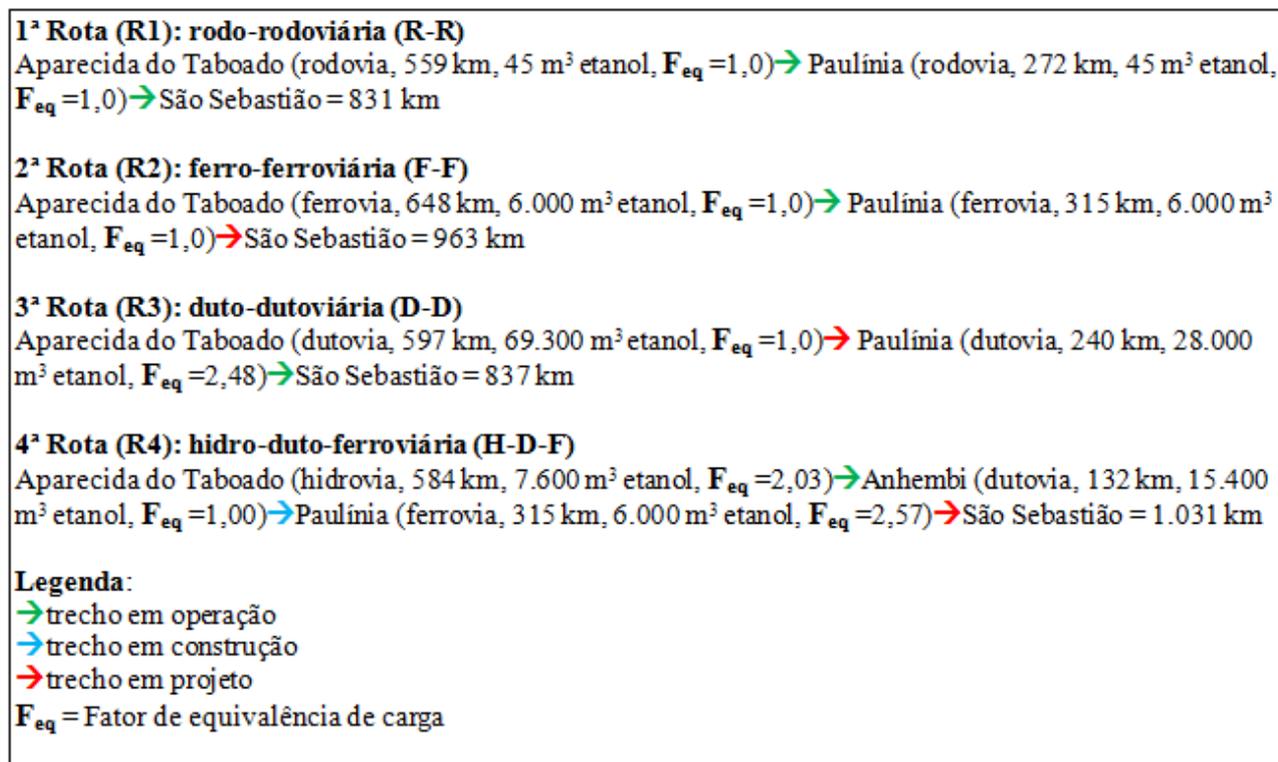


FIGURA 1. Fluxograma do escoamento multimodal do etanol, de Aparecida do Taboado (MS) até o porto de São Sebastião (SP) por quatro rotas. **Flowchart of a multimodal ethanol transport from Aparecida do Taboado (MS) to the port of São Sebastião (SP) through four routes.**

Ao analisar o transporte para exportação de etanol, adotou-se como ponto de origem, para as quatro rotas multimodais (Figuras 1 e 2), o município de Aparecida do Taboado (MS). A escolha deste foi para possibilitar a análise de multimodalidade em um local que será uma grande base coletora de etanol da região Centro-Oeste do País com capacidade de armazenagem de 20 mil m³ de etanol e capacidade de fluxo anual de 2,4 milhões de m³ de etanol. Como ponto intermediário de transbordo, adotou-se o município de Paulínia (SP), para todas as rotas, por ser uma das principais bases distribuidoras de etanol do Estado de São Paulo com capacidade de armazenagem de 224 mil m³ de etanol e capacidade de fluxo anual de 8,9 milhões de m³ de etanol. Para uma das rotas estabelecidas, o município de Anhembi (SP) também ficou como ponto intermediário que terá uma capacidade de armazenagem de 160 mil m³ de etanol e capacidade de fluxo anual de 9,3 milhões de m³ de biocombustíveis (etanol e biodiesel). Como ponto de destino para a exportação do etanol, adotou-se o município de São Sebastião (SP), litoral norte paulista, por ter um porto marítimo já estruturado para a logística de etanol. A capacidade de armazenagem do porto de São Sebastião é de 260 mil m³ de etanol e capacidade de fluxo anual de 12,9 milhões de m³ de etanol.

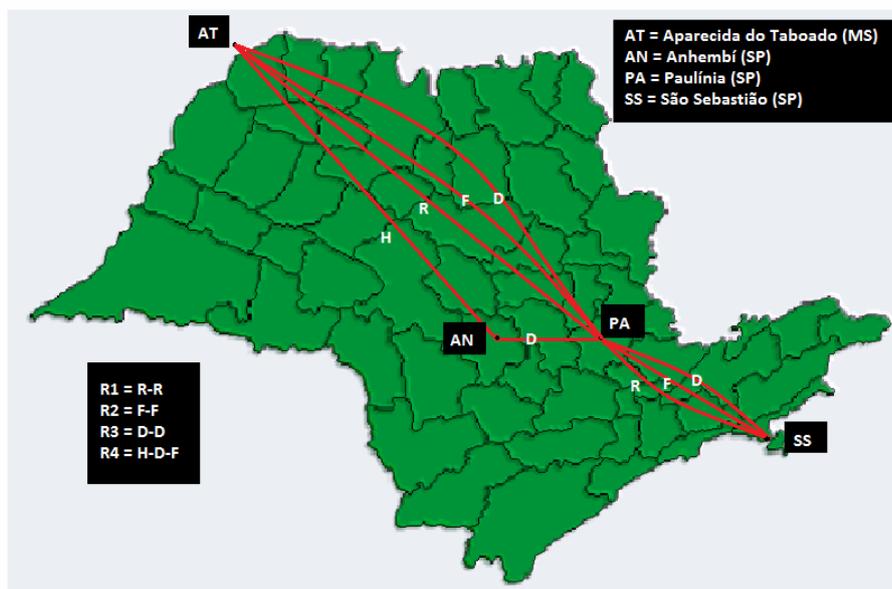


FIGURA 2. Mapa ilustrativo do escoamento multimodal do etanol, de Aparecida do Taboado (MS) até o porto de São Sebastião (SP), por quatro rotas. **Illustrative map of a multimodal ethanol transport from Aparecida do Taboado (MS) to the port of São Sebastião (SP) through four routes.**

Mão de obra envolvida na movimentação do etanol

A Tabela 1 resume a mão de obra envolvida na movimentação do etanol, para todos os modais de transporte, tanto para o carregamento como para o descarregamento, nos trechos intermediários, na origem e no destino.

TABELA 1. Mão de obra envolvida na movimentação do etanol de Aparecida do Taboado (MS) à São Sebastião (SP). **Labor involved in ethanol transport from Aparecida do Taboado (MS) to the port of São Sebastião (SP).**

Forma de movimentação	Mão de obra (nº de operários)
Carregamento em Aparecida do Taboado (MS):	
Para comboio fluvial	6
Para bitrem tanque	2
Para comboio ferroviário	2
Para alcooduto	2
Transporte de Aparecida do Taboado (MS):	
Por hidrovia	9
Por rodovia	1
Por ferrovia	2
Por dutovia	2
Transposição:	
Das eclusas	10
Do canal de Pereira Barreto	2
Descarregamento em Anhembi (SP):	
Do comboio fluvial	6
Transporte de Anhembi (SP):	
Por dutovia	2
Descarregamento em Paulínia (SP):	
Do bitrem tanque	2
Do comboio ferroviário	2
Do alcooduto	2
Carregamento em Paulínia (SP):	
Para bitrem tanque	2
Para comboio ferroviário	2
Para alcooduto	2
Transporte de Paulínia (SP):	
Por rodovia	1
Por ferrovia	2
Por dutovia	2
Descarregamento em São Sebastião (SP):	
Do bitrem tanque	2
Do comboio ferroviário	2
Do alcooduto	2
Administração da logística de transportes:	
Por operadores logísticos	2

Materiais e equipamentos envolvidos na movimentação do etanol

As principais características dos materiais e equipamentos envolvidos na movimentação do etanol, segundo os diferentes modais utilizados, são apresentadas nas Tabelas 2 a 5.

TABELA 2. Características dos materiais e equipamentos envolvidos na movimentação do etanol por rodovia. **Characteristics of equipment and materials used in road ethanol transport.**

Materiais e equipamentos	Dados
Características do cavalo mecânico do Bitrem:	
Massa	9,97 t
Vida útil	10 anos
Potência instalada do motor	628,6 cv
Consumo médio de óleo diesel	1,9 km L ⁻¹
Características dos semirreboques tanques:	
Massa	10,5 t
Vida útil em anos de uso	10 anos

TABELA 3. Características dos materiais e equipamentos envolvidos na movimentação do etanol por ferrovia. **Characteristics of equipment and materials used in railway ethanol transport.**

Materiais e equipamentos	Dados
Características da locomotiva do comboio ferroviário:	
Massa	62 t
Vida útil em anos de uso	30 anos
Potência instalada do motor	887,1 cv
Consumo médio de óleo Diesel do comboio fluvial carregado	246 L h ⁻¹
Características dos tanques do comboio ferroviário:	
Massa	25,75 t
Vida útil em anos de uso	30 anos

TABELA 4. Características dos materiais e equipamentos envolvidos na movimentação do etanol por dutovia.

Table 4. Characteristics of equipment and materials used in pipeline ethanol transport.

Materiais e equipamentos	Dados
Características do alcooduto:	
Comprimento de cada tubo	18 m
Diâmetro nominal	24 pol
Massa	8 t
Vida útil em anos de uso	40 anos
Potência das bombas	15,2 cv

TABELA 5. Características dos materiais e equipamentos envolvidos na movimentação do etanol por hidrovia. **Characteristics of equipment and materials used in waterway ethanol transport.**

Materiais e equipamentos	Dados
Características do empurrador do comboio fluvial:	
Comprimento	18,5 m
Boca	9 m
Calado	2,4 m
Massa	140 t
Vida útil em anos de uso	50 anos
Potência instalada dos motores principais	1216,6 cv
Potência instalada dos motores auxiliares	121,7 cv
Consumo médio de óleo Diesel do comboio fluvial carregado	246 L h ⁻¹
Características das chatas do comboio fluvial:	
Comprimento	60 m
Boca	11 m
Calado	3 m
Massa	330 t
Vida útil em anos de uso	50 anos
Características das eclusas da hidrovia do Tietê:	
Potência instalada do portão hidráulico tipo esporão	15,2 cv
Potência instalada do portão hidráulico tipo vagão	76 cv
Tempo de operação dos portões hidráulicos das eclusas	3 min
Massa dos portões hidráulicos das eclusas	115 t
Vida útil em anos de uso dos portões hidráulicos das eclusas	50 anos
Características do sistema de carga e descarga de etanol das chatas:	
Massa das 4 redes de carga e descarga	1 t
Vida útil em anos de uso das 4 redes de carga e descarga	50 anos
Massa das 4 bombas de carga e descarga	1 t
Vida útil das 4 bombas de carga e descarga	50 anos
Vazão operacional das bombas	150 m ³ h ⁻¹
Massa das 4 droplines do sistema de carga e descarga	1 t
Vida útil das 4 droplines do sistema de carga e descarga	50 anos
Potência instalada do motor Diesel que move as bombas	557,6 cv
Consumo médio de óleo Diesel do motor que move as bombas	100 L h ⁻¹
Características dos sistemas de óleo combustível e óleo lubrificante:	
Capacidade total de óleo Diesel no tanque	80 m ³
Autonomia do óleo Diesel no tanque	14 dias

Conversão dos fatores físicos em energéticos

a) Energia do tipo direta de fonte industrial sob a forma elétrica

Os conteúdos energéticos oriundos dos equipamentos elétricos utilizados no sistema foram obtidos de acordo com a metodologia empregada por NASCIMENTO & BIAGGIONI (2010). A conversão foi feita através da [eq. (1)]:

$$EDIE = 0,736.3,6 P T F_{eq} Ne \quad (1)$$

em que,

EDIE - energia do tipo direta de fonte industrial sob a forma elétrica, MJ;

P - potência, cv;

T - tempo de utilização, h;

F_{eq} - fator de equivalência de carga;

Ne - número de equipamentos.

b) Energia do tipo direta de fonte fóssil sob a forma de combustíveis e lubrificantes

Para a obtenção dos conteúdos energéticos de combustíveis e lubrificantes, foi utilizado o fator de 1,14 sobre seus poderes caloríficos, que corresponde a 14% do gasto energético utilizado para a produção do óleo diesel, óleo lubrificante e graxa, conforme descrito em BOVOLENTA et al. (2012). A conversão foi feita através da [eq. (2)]:

$$EDF = 1,14 CE CT F_{eq} \quad (2)$$

em que,

EDF - energia do tipo direta de fonte fóssil, MJ;

CE - coeficiente energético, MJ L⁻¹;

CT - consumo total, L;

F_{eq} - fator de equivalência de carga.

c) Energia do tipo direta de fonte biológica sob a forma de mão de obra

A conversão do dispêndio energético devido à mão de obra envolvida nos quatro sistemas de transporte seguiu AINSWORTH et al. (1993), adaptada conforme BOVOLENTA (2013). A conversão foi feita através da [eq. (3)]:

$$EDFB = 0,00418 MET M T F_{eq} NP ND \quad (3)$$

em que,

EDFB - energia do tipo direta de fonte biológica, MJ;

MET - taxa metabólica no repouso, MJ kg⁻¹h⁻¹;

M - massa corporal, kg;

T - tempo, h;

F_{eq} - fator de equivalência de carga;

NP - número de pessoas;

ND - número de dias.

d) Energia do tipo indireta de fonte industrial sob a forma de depreciação de máquinas e equipamentos

A metodologia adotada para os cálculos da depreciação energética relativa às máquinas e equipamentos seguiu JASPER et al. (2010). A energia indireta embutida foi determinada pela multiplicação da massa das máquinas e equipamentos pelos seus respectivos coeficientes energéticos, sendo adotado o valor de 62,79 MJ kg⁻¹ para os sistemas compostos por aço, e de 85,81 MJ kg⁻¹ para aqueles constituídos por borracha.

e) Energia do tipo indireta de fonte industrial sob a forma de manutenção de rodovias, hidrovias, ferrovias e dutovias

A metodologia adotada para o cálculo da energia despendida na manutenção das vias foi a depreciação monetária, considerando o valor residual igual a zero, com adaptações, conforme descrito em BOVOLENTA (2013). A conversão foi feita através das eqs. (4) e (5):

$$EIIM = IE F_{eq} \{[(CIT D)PM VU^{-1}]Vh^{-1}\} \quad (4)$$

$$IE = ECB PIB^{-1} \quad (5)$$

em que,

EIIM - energia indireta industrial de manutenção, MJ;

IE - intensidade Energética, MJ R\$⁻¹;

F_{eq} - fator de equivalência de carga;

ECB - energia consumida no Brasil em 2004, MJ;

PIB - produto interno bruto do Brasil em 2004, R\$;

CIT - custo de implantação do trecho, R\$ km⁻¹;

D - distância do trecho, km;

PM - percentual de manutenção, %;

VU - vida útil, h;

Vh - veículos por hora.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise comparativa das demandas energéticas

A análise individual de cada rota permite uma avaliação mais criteriosa do uso de cada fonte, possibilitando determinar a rubrica energética mais dispendiosa e, conseqüentemente, aquela que compensaria envidar maiores esforços no sentido de otimizar sua eficiência no processo. Assim, analisando-se os dados da Tabela 6, que apresenta as demandas de energia por fonte e por rota, verifica-se que, em três das quatro rotas estudadas, a energia fóssil constituiu-se na fonte com maior participação, seguida pela energia industrial consumida pelas máquinas e equipamentos. A rota 3 (duto-dutoviária), por não utilizar diesel para a movimentação da carga, apresentou um comportamento diferente das demais, apontando para as fontes industriais, seja para a fabricação de máquinas/equipamentos, seja para a manutenção da via (dutos), como as mais importantes.

Ainda pela Tabela 6, analisando-se individualmente cada rubrica energética apresentada, verifica-se que a energia oriunda da mão de obra foi mais demandada pela rota rodoviária, tendo em vista o elevado número de unidades envolvidas (caminhões bitrens) na movimentação do etanol. Nesta mesma rota, pelos mesmos motivos, também se verificou a maior demanda pela energia fóssil.

TABELA 6. Análise comparativa entre entradas de energia para as rotas estudadas.
Comparative analysis of the energy inputs for the studied routes.

Rota	Fonte	(MJ)
1.	Mão de obra	197.389,06
	Elétrica	0,00
	Fóssil	41.737.397,53
	Industrial (bitrem)	493.937,53
	Industrial (rodovia)	108.046,13
2.	Mão de obra	1.973,08
	Elétrica	0,00
	Fóssil	18.433.888,80
	Industrial (comboio ferroviário)	402.412,92
	Industrial (ferrovia)	6.587.344,70
3.	Mão de obra	1.356,58
	Elétrica	7.973,59
	Fóssil	0,00
	Industrial (alcooduto)	7.765.391,24
	Industrial (dutovia)	166.302,00
4.	Mão de obra	14.924,12
	Elétrica	8.041,37
	Fóssil	17.552.381,18
	Industrial (comboio hidro + alcooduto + bitrem)	2.131.040,88
	Industrial (hidrovia + dutovia + rodovia)	2.340.742,50

A fonte elétrica, presente apenas nas rotas dutoviária e multimodal (H-D-F), foi mais utilizada pela última, tendo em vista a maior presença desta fonte nas operações de motores elétricos utilizados nos modais hidroviário e dutoviário (bombas hidráulicas).

Quanto às formas industriais de demanda de energia, o elevado consumo de aço para a construção dos dutos, bem como o alto custo de depreciação energética das ferrovias fizeram com que estas rubricas fossem maximizadas nas rotas dutoviária (R3) e ferroviária (R2), respectivamente.

Análise comparativa do consumo específico de energia

O consumo específico de energia, em $\text{MJ km}^{-1} \text{ m}^{-3}$ de etanol transportado, das quatro rotas estudadas, pode ser encontrado na Tabela 7.

Analisando-se os dados, verifica-se maior participação de energia consumida na R1, rodoviária, com um consumo específico de $0,53 \text{ MJ km}^{-1} \text{ m}^{-3}$. Tal demanda é explicada, principalmente, devido ao fato de o modal rodoviário constituir-se no maior consumidor de energia fóssil, mais precisamente óleo diesel, e, ainda, por ser uma rota unimodal que transporta um volume menor de carga, em relação aos outros modais, exigindo maior número de caminhões bitrens ao longo de todo o percurso. Os resultados aqui obtidos corroboram BIAGGIONI & BOVOLenta (2010), que encontraram o consumo específico de $0,50 \text{ MJ km}^{-1} \text{ t}^{-1}$, para o modal rodoviário.

Por outro lado, a menor participação de energia consumida foi a R3, duto-dutoviária, com o consumo específico de $0,14 \text{ MJ km}^{-1} \text{ m}^{-3}$. Isto se explica, principalmente, devido ao modal dutoviário não demandar energia fóssil, mas também por ser uma rota unimodal capaz de transportar alto volume de carga ao longo do percurso total, quando comparado aos outros modais.

Ao analisar-se a R2, unimodal ferroviária, verifica-se que o valor final atingido, de $0,27 \text{ MJ km}^{-1} \text{ m}^{-3}$, situa-se numa posição intermediária de consumo energético, quando comparado com as demais rotas unimodais pesquisadas (dutoviária e rodoviária). Embora o modal ferroviário, a exemplo do modal rodoviário, também seja muito dependente da energia fóssil, por outro lado,

também apresenta, a exemplo do modal dutoviário, a capacidade de transportar elevado volume de etanol por viagem, reduzindo, assim, o impacto energético.

Analisando-se a única rota multimodal estudada (R4), verifica-se que o valor final atingido, de $0,22 \text{ MJ km}^{-1} \text{ m}^{-3}$, consolidou-a como a de segundo melhor desempenho, atrás, apenas, da rota unimodal dutoviária. Observa-se que este consumo médio obtido ($0,22 \text{ MJ km}^{-1} \text{ m}^{-3}$) ficou mais próximo do consumo específico do trecho hidroviário ($0,20 \text{ MJ km}^{-1} \text{ m}^{-3}$), devido à maior extensão percorrida (584 km) por este modal. O trecho ferroviário (315 km) percorrido, com o consumo específico de energia de $0,27 \text{ MJ km}^{-1} \text{ m}^{-3}$, e o trecho dutoviário (132 km) percorrido, com o consumo específico de apenas $0,14 \text{ MJ km}^{-1} \text{ m}^{-3}$, tiveram menor influência na determinação do consumo final de energia específica.

TABELA 7. Análise comparativa entre os consumos específicos de energia ($\text{MJ km}^{-1} \text{ m}^{-3}$) para as rotas estudadas. **Comparative analysis of the specific energy demands ($\text{MJ km}^{-1} \text{ m}^{-3}$) for the studied routes.**

Rota	Entradas de energia		
	(MJ)	(km)	($\text{MJ km}^{-1} \text{ m}^{-3}$)
1. SUBTOTAL R (1º trecho)	13.231,53	559	0,53
SUBTOTAL R (2º trecho)	6.434,14	272	0,53
TOTAL	19.665,67	831	
CONSUMO ESPECÍFICO			0,53
2. SUBTOTAL F (1º trecho)	1.055.813,28	648	0,27
SUBTOTAL F (2º trecho)	512.701,19	315	0,27
TOTAL	1.568.514,47	963	
CONSUMO ESPECÍFICO			0,27
3. SUBTOTAL D (1º trecho)	5.623.712,28	597	0,14
SUBTOTAL D (2º trecho)	2.317.311,13	240	0,14
TOTAL	7.941.023,41	837	
CONSUMO ESPECÍFICO			0,14
4. SUBTOTAL H	1.825.151,04	584	0,20
SUBTOTAL D	291.339,33	132	0,14
SUBTOTAL F	1.317.642,07	315	0,27
TOTAL	3.434.132,44	1031	
CONSUMO ESPECÍFICO			0,22

O estudo realizado neste trabalho confirma a hipótese levantada no início, em que o modal dutoviário seria classificado como o que menos dispense energia, e o modal rodoviário o que mais demanda energia. Gera, também, uma reflexão de cada modal: o modal dutoviário é, sem dúvida, o melhor meio de transporte para produtos granéis líquidos, mesmo sendo alto o valor de implantação de sua via. Em seguida, nota-se que os modais hidroviário e ferroviário são, também, energeticamente viáveis em comparação ao modal rodoviário. No modal rodoviário, encontram-se várias desvantagens energéticas, porém este tipo de transporte, quando na ausência de outros tipos de vias, é fundamental para completar a multimodalidade.

Este tipo de estudo demonstra a urgente necessidade de se buscar alternativas de escoamento de produtos em conjunto, tais como a multimodalidade de transporte, que são mais sustentáveis energeticamente, ou seja, que possibilitem utilização mais racional de recursos naturais não renováveis.

CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos e nas discussões apresentadas, podem-se destacar as seguintes conclusões:

A rota dutoviária mostrou-se a mais sustentável energeticamente, não dependendo da participação de fonte fóssil, a qual se constituiu na rubrica de maior peso para as demais rotas estudadas.

Entre as rotas unimodais, a rodoviária atingiu o maior consumo específico de energia, com $0,53 \text{ MJ km}^{-1} \text{ m}^{-3}$, enquanto a dutoviária teve o menor, com $0,14 \text{ MJ km}^{-1} \text{ m}^{-3}$. A rota ferroviária apresentou desempenho intermediário, demandando $0,27 \text{ MJ km}^{-1} \text{ m}^{-3}$.

O baixo consumo energético apresentado pelo trecho hidroviário ($0,20 \text{ MJ km}^{-1} \text{ m}^{-3}$) permitiu à rota multimodal hidro-duto-ferroviária o segundo melhor desempenho entre as quatro alternativas estudadas.

Os modais hidroviário e ferroviário também apresentaram consumo específico de energia mais baixo, em comparação ao modal rodoviário, viabilizando, energeticamente, projetos logísticos para escoamento de etanol que contemplem outras alternativas multimodais.

REFERÊNCIAS

- AINSWORTH, B. E.; HASKELL, W. L.; LEON, A. S.; JACOBS JR., D. R.; MONTROYE, H. J.; SALLIS, J. F.; PAFFENBARGER JR., R. S. Compendium of Physical Activities: classification of energy costs of human physical activities. **Medicine and Science in Sports and Exercise**, Ballimore, v. 25, n. 1, p. 71-80, 1993.
- BIAGGIONI, M. A. M.; BOVOLENTA, F. C. Balanço energético comparativo para rotas de escoamento de soja. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.30, p.587 - 599, 2010. CD-ROM.
- BOVOLENTA, F. C. **Análise energética na logística de transporte multimodal para o transporte de etanol de Aparecida do Taboado (MS) para o porto de São Sebastião (SP)**. 2013. 133 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2013.
- BOVOLENTA, F. C.; BIAGGIONI, M. A. M.; SORANI, L. A.; AMOEDO, D. T.; SCARSO, P. R.; QUEIROZ, D. L. Análise energética na logística de transporte fluvial do etanol. In: CONGRESSO NACIONAL DE TRANSPORTE AQUAVIÁRIO, CONSTRUÇÃO NAVAL E OFFSHORE, 2012, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Engenharia Naval, 2012.
- BRANCO, J. E. H.; CAIXETA FILHO, J. V.; XAVIER, C. E. O.; LOPES, R. L.; GAMEIRO, A. H. Desenvolvimento de modelo matemático de otimização logística para o transporte multimodal de safras agrícolas pelo corredor centro-oeste. **Informe Gepec**, Toledo, v.14, n. 1, p.84-100, 2010.
- GABRIEL FILHO, L. R. A.; CREMASCO, C. P.; SOUZA, R. O. Análise estatística da movimentação no porto de Presidente Epitácio, SP. *Colloquium Exactarum, Presidente Prudente*, v. 1, n. 1, p. 56-63, 2009.
- JASPER, S. P.; BIAGGIONI, M. A. M.; SILVA, P. R. A.; SEKI, A. S.; BUENO, O. C. Análise energética da cultura do crambe (*Crambe abyssinica* Hochst) produzida em plantio direto. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.30, p.395 - 403, 2010. CD-ROM.
- JUNQUEIRA, A. **O transporte de etanol pela hidrovia Tietê-Paraná**. Brasília: PETROBRAS Transporte, 2011.
- MILANEZ, A. Y.; NYKO, D.; GARCIA, J. L. F.; XAVIER, C. E. O. Logística para o etanol: situação atual e desafios futuros. **BNDES Setorial**, Brasília, v.31, p.49-98, 2010.
- NASCIMENTO, M. D.; BIAGGIONI, M. A. M. Avaliação energética do uso de lenha e cavaco de madeira para a produção de energia em agroindústria seropédica. **Energia na agricultura**, Botucatu, v.25, p. 104 - 117, 2010. CD-ROM.