

MODELO CADEIA ENERGÉTICA DA CANA

**modelo Leontiev adaptado para
análise de fluxos energéticos setoriais**

Jayme Buarque de Hollanda
Diretor Geral INEE
Outubro 2015

Sumário

Introdução.....	3
Modelo	3
Aplicação	7
Projeto PrEE e o modelo	8
Exemplo simplificado	9
Cadeia Energética da Cana	12
Anexos.....	16
Insumos e Produtos agregados	16
Energia Solar.....	16
Diesel	17
Veículos	17
Plantação.....	17
Colheita	17
Moenda	17
Caldeira	18
Co-gerador.....	18
USINA	18
CARRO A ETANOL	18
SECADOR do ETANOL	18
Referências.....	18
Notas	19

Introdução

O presente trabalho foi desenvolvido no âmbito do PrEE - Projeto Etanol Eficiente do INEE*. Apresenta uma metodologia para analisar fluxos energéticos em empresas e/ou grupos de empresas (“setores da economia”) de forma quantitativa. Para ilustração, é aplicado à cadeia energética da cana para analisar efeitos das alterações da estrutura da demanda de seus produtos, bem como de modificações tecnológicas.

A metodologia se baseia na Matriz de Insumo-Produto, ou Matriz de Leontiev^A usada em estudos macroeconômicos, em que a atividade econômica é dividida setores de bens e serviços inter-relacionados e considerados os fluxos econômico-financeiros entre eles. No que se segue, o conceito é aplicado a fluxos de energia^B, quantificado em unidades congêneres no lugar dos monetários.

Modelo

Inicialmente é preciso delimitar o “SETOR ENERGÉTICO” a ser estudado e identificar, dentro dele, as tecnologias que convertem, transportam, usam ou processam as diversas modalidades de energia usadas. A figura 1 esquematiza o setor composto de N tecnologias que importa até M formas de energia e exporta até K.

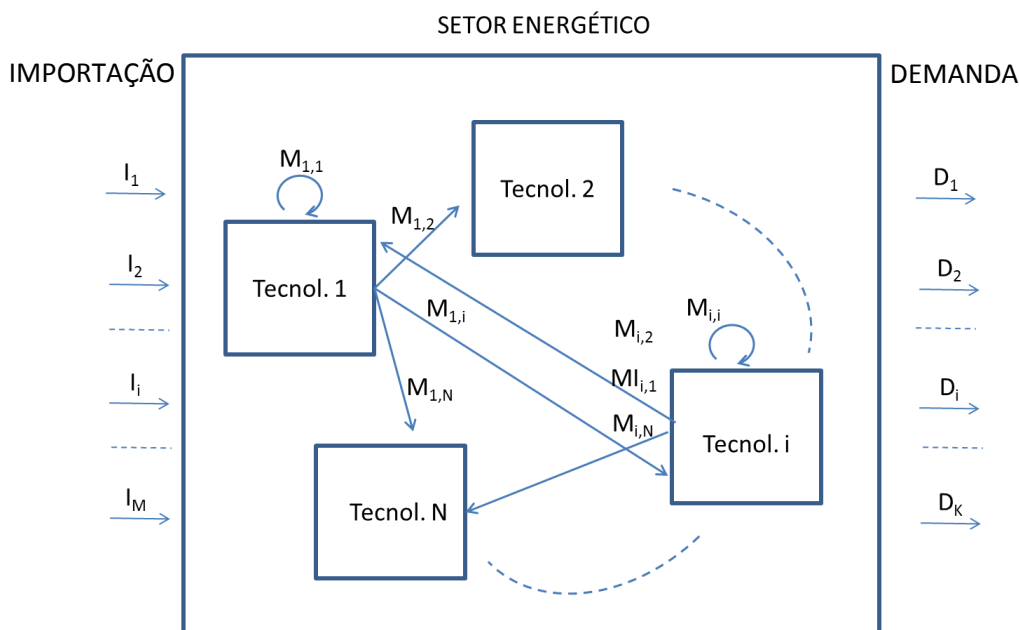


Figura 1 Setor Energético e suas tecnologias

Cabem as seguintes observações:

- O recorte que define o setor energético é arbitrário e depende da abrangência do estudo a ser realizado;
- Os insumos energéticos são denominados “IMPORTAÇÃO” e os produtos energéticos, “DEMANDA”;

* Esse texto contou com sugestões e aperfeiçoamentos de Pietro Erber, também diretor do INEE e de Alfredo da Silveira Maciel.

- Cada centro tecnológico ou de transformação (“Tecnologia”), pode enviar e/ou receber energia de qualquer um dos demais (na figura 1, para simplificar o gráfico, só estão indicadas algumas ligações entre centros tecnológicos);
- Cada tecnologia pode importar uma ou mais formas de energia dentre as M indicadas;
- Cada tecnologia exporta apenas uma modalidade de energia dentre as N possíveis^C
- Uma tecnologia pode usar, ela mesma, parte da energia que produz. Inclui as perdas inerentes a toda transformação energética (segunda lei da termodinâmica) e as que decorrem da alteração da qualidade da energia. Por exemplo, elevação ou redução da tensão em um transformador, aumento de harmônicos, etc.
- A energia usada por uma tecnologia e que não é agregada à modalidade de energia processada é também considerada uma perda da tecnologia. Por exemplo, a energia do combustível usado por um caminhão que transporta combustível.
- A soma das energias recebidas por uma tecnologia (importadas de fora do setor ou originadas nas outras tecnologias) é igual à soma das energias (1) destinadas a outras tecnologias do setor, (2) para atender a demanda final, D_i e (3) as consumidas internamente;
- Todos os fluxos energéticos são apresentados pela mesma unidade de medição de energia^D.

As informações sobre as trocas de energia entre as várias tecnologias e o atendimento à demanda são dispostas em uma tabela com a estrutura abaixo, dividida em quatro segmentos delimitados pelas linhas mais escuras.

INSUMOS →

		Tec. 1	-----	Tec. n	DEMANDA	TOTAL
PRODUTOS →	Tecn. 1	$M_{1,1}$	-----	$M_{1,N}$	D_1	X_1
	Tecn. 2	$M_{2,1}$	①	$M_{2,N}$	D_2	X_2
	-----				②	③
	Tecn. n	$M_{N,1}$	-----	$M_{N,N}$	D_N	X_N
IMPORTADOS →	Enrg 1	$Im_{1,1}$	-----	$Im_{1,N}$	ΣD	
		④			
	Enrg M	$Im_{1,M}$	-----	$Im_{M,N}$		
	Σ	Im_1	-----	Im_M	ΣIm	

Tabela 1 Tabela de Fluxos dos Energia

Na parte superior esquerda, ①, há uma matriz $M=\{M_{i,j}\}$ quadrada($N \times N$) cujas linhas e colunas correspondem às N tecnologias do setor, dispostas na mesma ordem. Cada

elemento indica as trocas de energia entre tecnologias, onde $M_{i,j}$ é a energia usada pela tecnologia i , fornecida pela tecnologia j .

Os elementos da matriz coluna (2), $\mathbf{D} = \{D_i\}$ registram a energia da forma produzida pela tecnologia i demandada. O somatório das demandas (ΣD) é registrado abaixo da coluna (b) tracejada.

Os elementos da matriz coluna (3), $\mathbf{X}=\{X_i\}$ correspondem ao total da produção de energia pela tecnologia i , e seus elementos são dados por:

$$X_i = \sum_{j=1}^n M_{i,j} + D_i \quad [1]$$

A matriz (4), não necessariamente quadrada, $\mathbf{Im} = \{Im_{i,j}\}$ se refere à modalidade i de energia importada para uso pela tecnologia j . A soma das energias importadas, ΣIm é indicada à direita da última linha (tracejada).

Os valores constantes das tabelas, medidos em um período determinado, representam o estágio tecnológico do setor de energia analisado.

Os dados da tabela podem ser representados matematicamente pelo sistema de equações:

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{1,1} + M_{1,2} + \dots + M_{1,N} + D_{1\dots} = X_1 \\ M_{2,1} + M_{2,2} + \dots + M_{2,N} + D_{2\dots} = X_2 \\ \dots\dots\dots \\ M_{1,n} + M_{1,n} + \dots + M_{N,N} + D_{N\dots} = X_N \end{array} \right. \quad [2]$$

Essas equações podem ser reescritas multiplicando cada um dos membros da matriz $M_{1,j}$ pela soma da linha correspondente à coluna e dividindo pelo mesmo valor:

$$\left\{ \begin{array}{l} (M_{1,1}/X_1) \cdot X_1 + (M_{1,2}/X_2) \cdot X_2 + \dots + (M_{1,N}/X_N) \cdot X_N + D_{1\dots} = X_1 \\ (M_{2,1}/X_1) \cdot X_1 + (M_{2,2}/X_2) \cdot X_2 + \dots + (M_{2,N}/X_N) \cdot X_N + D_{2\dots} = X_2 \\ \dots\dots\dots \\ (M_{1,N}/X_1) \cdot X_1 + (M_{1,N}/X_2) \cdot X_2 + \dots + (M_{N,N}/X_N) \cdot X_N + D_{N\dots} = X_N \end{array} \right.$$

Fazendo $a_{i,j} = M_{i,j}/X_j$ e mudando de lado os valores da demanda, podemos escrever:

$$\left\{ \begin{array}{l} a_{1,1} \cdot X_1 + a_{1,2} \cdot X_2 + \dots + a_{1,n} \cdot X_n = X_1 - D_1 \\ a_{2,1} \cdot X_1 + a_{2,2} \cdot X_2 + \dots + a_{2,n} \cdot X_n = X_2 - D_2 \\ \dots\dots\dots \\ a_{n,1} \cdot X_1 + a_{n,2} \cdot X_2 + \dots + a_{n,n} \cdot X_n = X_n - D_n \end{array} \right. \quad [3]$$

O valor $a_{i,j}$ representa a proporção da energia do tipo i necessária para produzir uma unidade da energia do tipo j . A nova matriz $\mathbf{A} = \{a_{i,j}\}$ é chamada de “matriz tecnológica”, pois resume a estrutura tecnológica do setor estudado. Apesar de trabalhar com várias modalidades de energia, os elementos dessa matriz são adimensionais e ela tende a se manter estável.

Usando notação matricial, o sistema acima pode ser apresentado de forma mais simples, lembrando que **I** é a matriz identidade (todos os elementos são iguais a zero, exceto os que formam a diagonal principal, que são iguais a 1) :

$$\begin{aligned}
 \mathbf{A} \cdot \mathbf{X} &= \mathbf{X} - \mathbf{D} \\
 \mathbf{D} &= \mathbf{X} - \mathbf{A} \cdot \mathbf{X} = [\mathbf{I} - \mathbf{A}] \cdot \mathbf{X} \\
 [\mathbf{I} - \mathbf{A}]^{-1} \cdot \mathbf{D} &= [\mathbf{I} - \mathbf{A}]^{-1} \cdot [\mathbf{I} - \mathbf{A}] \cdot \mathbf{X} = \mathbf{X}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Temos, portanto que:

$$\mathbf{X} = [\mathbf{I} - \mathbf{A}]^{-1} \cdot \mathbf{D}
 \tag{5}$$

A figura 1 pode ser simplificada e assumir o seguinte aspecto.

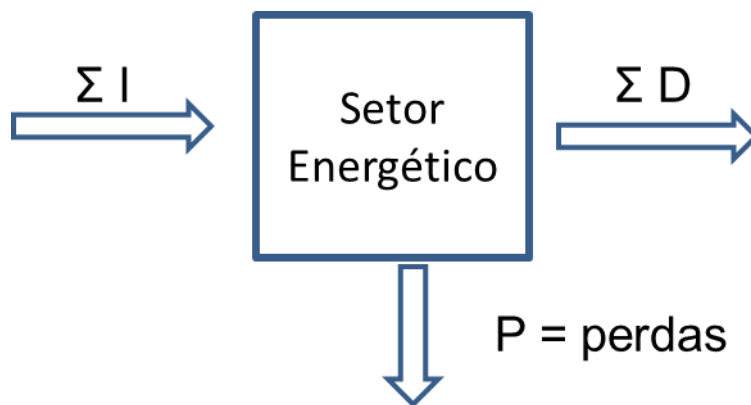


Figura 2 Modelo Simplificado do Setor de Cana

As somas das importações e das exportações do setor fornecem dois importantes parâmetros para avaliação do setor energético:

$$\text{Perdas : } P = \Sigma I - \Sigma D$$

$$\text{Eficiência: } \eta = \Sigma D / \Sigma I$$

É importante notar que as perdas podem ser avaliadas diretamente na matriz **M**, somando os elementos da diagonal principal (traço da matriz):

$$P = \text{tr}(\mathbf{M}) = M_{1,1} + M_{2,2} + \dots + M_{N,N}$$

O modelo é linear, o que significa que não há ganhos de escala; se todas as demandas aumentarem na mesma proporção, o aumento dos insumos aumenta na mesma proporção.

Se a demanda por uma das modalidades de energia aumentar numa proporção diferente das demais, as necessidades das demais formas se alteram em proporções diferentes. Nesse caso, o aumento de produção de cada tecnologia é difícil de prever, sobretudo se no setor estudado, uma das tecnologias usa uma forma de energia produzida por outra tecnologia que é dependente da primeira (por exemplo: o vapor usado em uma refinaria depende do combustível que ela mesma produz). Para estimar os efeitos globais, que acarretam alteração da eficiência, é preciso refazer as equações para obter o valor das perdas. Supondo que a demanda seja **D'**, teremos

$$\mathbf{X}' = \mathbf{B} \cdot \mathbf{D}'$$

Refazendo os passos, é possível remontar as tabelas iniciais, com os novos valores, de M' , lembrando sempre da matriz \mathbf{A} não se altera.

Aplicação

A equação [1] reflete as estatísticas de produção no ano analisado, sendo uma indicação sobre a estrutura tecnológica do setor considerado. Para o planejador interessa mais responder dúvidas do tipo:

“Qual deve ser a produção de energia \mathbf{X}' , se a demanda final for \mathbf{D}' ? “

“Qual o efeito da melhoria de uma das tecnologias (por exemplo, aumentar a eficiência de uma caldeira)?

“Quais os resultados econômicos dessas alterações?”

A primeira pergunta é respondida pela equação [5]. Apesar de ser baseada em relações explícitas, ao alterar a demanda a ser atendida pelo sistema, os efeitos nas mudanças na oferta (ou seja, modificações da produção de cada uma das tecnologias) são não lineares e pouco intuitivas, devido às interdependências entre as diversas tecnologias.

Para analisar o segundo tipo de dúvida, sobre alteração tecnológica, vamos fazer:

$$\mathbf{B} = [\mathbf{I} - \mathbf{A}]^{-1}$$

O que nos permite reescrever a equação [5] como $\mathbf{X} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{D}$. Essa equação escrita sob a forma de um sistema de equações tem o seguinte aspecto:

$$\left\{ \begin{array}{l} b_{1,1} \cdot D_1 + b_{1,2} \cdot D_2 + \dots + b_{1,n} \cdot D_n = X_1 \\ b_{2,1} \cdot D_1 + a_{2,2} \cdot D_2 + \dots + b_{2,n} \cdot D_n = X_2 \\ \dots \\ b_{n,1} \cdot D_1 + b_{n,2} \cdot D_2 + \dots + b_{n,n} \cdot D_n = X_n \end{array} \right. \quad [6]$$

De onde podemos concluir que:

$$b_{i,j} = \frac{\partial X_i}{\partial D_j}$$

Ou seja, os coeficientes da matriz invertida correspondem à sensibilidade à alteração da produção da tecnologia X_i com relação a uma modificação da demanda da energia D_j . A partir da matriz \mathbf{B} , é possível avaliar quais as alterações tecnológicas mais desejáveis para atender o crescimento de uma demanda específica.

Quanto à terceira questão, embora o objetivo do modelo aqui descrito seja puramente energético, ele pode ser usado para uma quantificação geral econômica considerando os custos com os insumos e as receitas com a venda dos produtos energéticos exportados. Para fazer uma análise econômica mais completa, no entanto, o ideal é usar um modelo de

Leontiev (com os fluxos econômico-financeiros) que tem uma representação mais realista da distribuição de custos em situações complexas onde a contabilidade de custo (ver 9).

Projeto PrEE e o modelo

O INEE busca identificar os principais desperdícios de energia observados no Brasil, sobretudo aqueles que podem ser reduzidos ou eliminados a partir de uma melhor organização do setor analisado. Para tanto analisa as oportunidades que ocorrem nos vários setores energéticos entre as fontes primárias de energia e os usos finais.

Nesses estudos chama a atenção o grande número de oportunidades existentes nas cadeias energéticas com origem nas biomassas, notadamente da cana-de-açúcar e da madeira^E.

O presente documento apresenta uma aplicação do modelo descrito acima baseada na cadeia energética com origem na cana, a segunda principal fonte de energia primária do país. A figura 3 ilustra os principais fluxos com um diagrama de Sankey^F, em que a largura das setas é proporcional à quantidade de energia. As energias são expressas em MteP- milhões de toneladas de petróleo equivalente^G por ano, os valores indicados são de 2013 e estão detalhados mais adiante (pág. 16). Os insumos do setor são a energia do sol fixado pelo cana e o diesel usado na plantação, colheita e transporte da cana crua. A parte da energia da cana que não é aproveitada no campo é indicada pela seta cinza. Os açúcares e o bagaço são processados pela usina. Os produtos finais são o açúcar (não energético), a energia elétrica e o transporte (simbolizado por uma roda) feito com o etanol. Chama a atenção a quantidade de energia não aproveitada, representada pela lata de lixo.

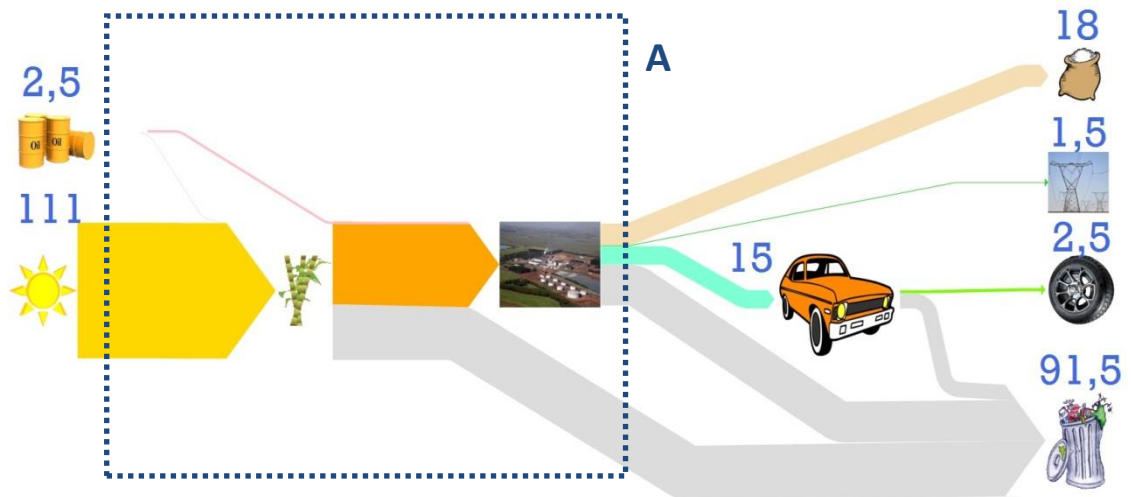


Figura 3 Fluxos de Energia - Cadeia da Cana / Brasil 2013/14

As análises econômicas e ações políticas do setor de cana, por razões históricas tendem considerar as análises considerando o recorte **A**, em que o setor de cana trata apenas do etanol e exclui qualquer consideração sobre como é usado. Trata-se de uma visão “miope” do mercado [LEVITT,60].

É muito importante tratar o etanol com a visão do consumidor, que precisa decidir entre se abastecer com o etanol ou com gasolina. Os carros “flex” generalizaram o falso conceito da inferioridade do etanol com relação à gasolina. Na verdade são motores a gasolina que

permitem (aceitam) o uso de etanol, embora o utilizem com eficiência muito inferior à potencial. Isto levou a um conformismo nas análises e aceitação de uma concorrência anormal da gasolina como sendo natural.

O setor de cana também acha natural sua elevada dependência do diesel (na plantação, colheita e transporte da cana crua), embora produza um combustível líquido de elevada qualidade. Hoje consome 6% do diesel usado no Brasil. Importante também considerar que quando as oscilações do preço internacional do petróleo barateiam a gasolina e reduzem a demanda de etanol, o setor de cana pressiona para aumentar o percentual de etanol adicionado à gasolina, reduzindo a eficiência dos veículos projetados para usar gasolina.

Portanto, será mais adequado modificar o recorte para **B**, com uma visão mais abrangente (fig. 4) que inclui nas análises do setor a preocupação com o uso adequado do etanol seja no que se refere aos carros leves, seja substituindo o diesel por etanol. É uma forma bem mais abrangente de analisar a economia setorial e de buscar influenciar as políticas do etanol.

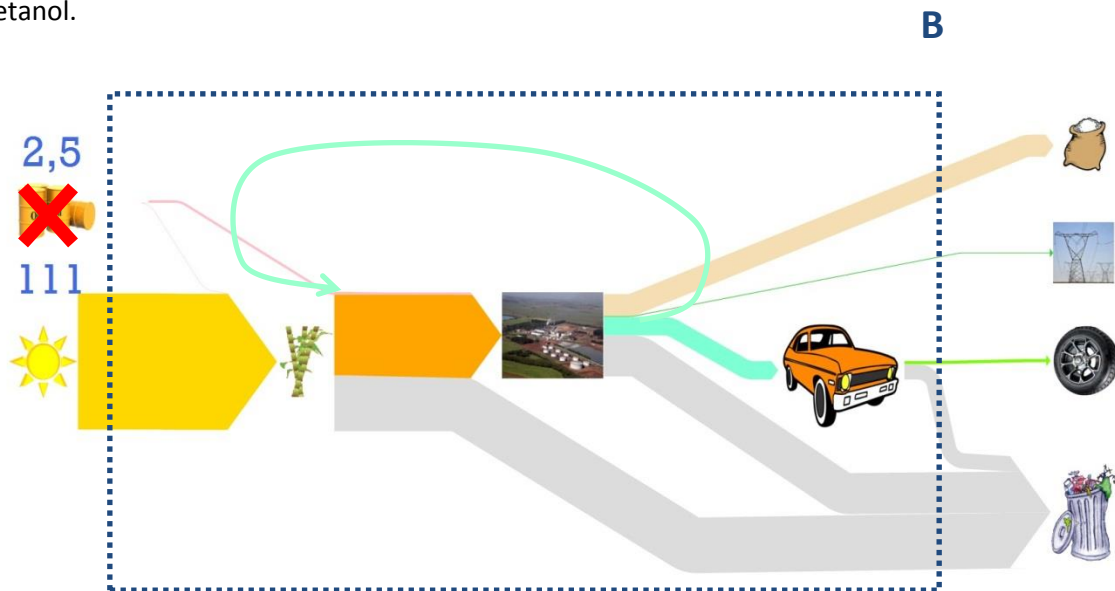


Figura 4 Fluxos de Energia - Cadeia da Cana / Brasil

Exemplo simplificado

Vamos supor um setor de cana simplificado que produz etanol e energia elétrica a partir de dois insumos energéticos: sol e óleo diesel. Nesse setor simplificado há quatro tecnologias: LAVOURA, MOENDA, USINA e CO-GERADOR (fig.5.a). As modalidades de energia trocadas entre as tecnologias estão registradas nas setas que indicam os fluxos. Os valores servem aqui apenas para ilustrar a metodologia. Em branco, junto a cada tecnologia são indicados os consumos internos relativos a cada forma de energia. Observar que o balanço energético de cada tecnologia é equilibrado.

Verificamos que, nessas circunstâncias, as perdas energéticas do setor totalizam 85 unidades o que corresponde a uma eficiência de 29,2% ($[120-35]/120$).

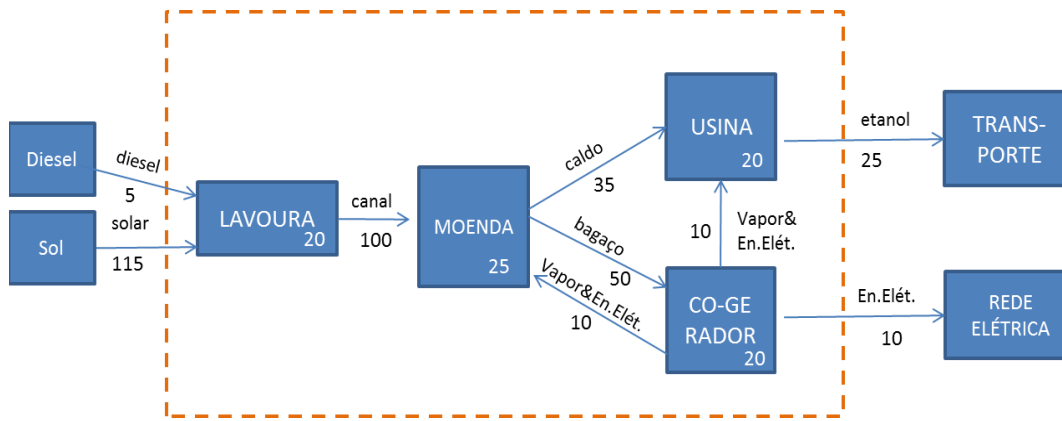


figura 5.a

Lavoura	20	100	0	0	0	120
Moenda	0	25	35	50	0	110
Usina	0	0	20	0	25	45
Co-Gerador	0	10	10	20	10	50
Sol	115				35	
Diesel	5					
	120				Perda =	85
					$\eta =$	0,291667

figura 5.b

A				[I - A]			
0,167	0,909	0,000	0,000	0,833	-0,909	0,000	0,000
0,000	0,227	0,778	1,000	0,000	0,773	-0,778	-1,000
0,000	0,000	0,444	0,000	0,000	0,000	0,556	0,000
0,000	0,091	0,222	0,400	0,000	-0,091	-0,222	0,600
0,958							
0,042							
1,000							

figura 5.c

$$B = [I - A]^{-1}$$

Lavoura	1,200	1,756	3,629	2,927
Moenda	0,000	1,610	3,327	2,683
Usina	0,000	0,000	1,800	0,000
Co-Gerador	0,000	0,244	1,171	2,073

figura 5.d

	Lavoura	Moenda	Usina	CoGeradr	D'	X' = B.D'	% (X'/X)
Lavoura	23,0	115,1	0,0	0,0	0	138,1	15,1%
Moenda	0,0	28,8	42,0	55,9	0	126,6	15,1%
Usina	0,0	0,0	24,0	0,0	30	54,0	20,0%
Co-Gerador	0,0	11,5	12,0	22,3	10	55,9	11,7%
	132,4				40		15%
	5,8				Perda =	98,146	15%
	138,1				$\eta =$	0,290	15%

figura 5.e

Figura 5 Modelo Simplificado do Setor de Cana

Seguindo os passos indicados na apresentação do modelo, os dados são transcritos para uma tabela (fig.5.b), onde as diversas matrizes que compõem o modelo são ressaltadas pelas cores.

A primeira operação (fig.5.c à esquerda) consiste em dividir os valores das colunas da matriz de trocas entre tecnologias pela soma dos elementos da linha correspondente, obtendo-se a matriz **A**. A coluna das energias importadas também é dividida pela soma da linha para uso mais adiante. A partir dessa matriz é possível produzir a matriz **I-A** (fig. 5.c à direita)

A matriz seguinte, **B** (fig. 5.d) resulta da inversão da matriz **I-A** e representa a sensibilidade da produção de cada tecnologia ao aumento da demanda.

A figura seguinte (fig. 5.e) apresenta os efeitos do aumento da demanda de um dos produtos, mantida a mesma estrutura de produção. No exemplo, a demanda por etanol aumenta de 25 para 30 unidades (mais 20%) e a de energia elétrica continua a mesma. A matriz recompõe o setor considerando a nova demanda (ou seja explicita os fluxos energéticos com o aumento da demanda analisado) o que permite calcular as alterações nas perdas e da eficiência média do setor para atender a nova demanda. A nova demanda **D'** leva a uma nova configuração de produção **X'**.

Vale a pena notar que, apesar do modelo ser linear, com uma estrutura muito simples, os efeitos do aumento de produção apresentam percentuais diferentes e para as diversas tecnologias. Isto se deve aos “feed-back” internos ao setor, onde, por exemplo, para produzir mais energia elétrica é necessário destinar uma parcela maior de energia elétrica gerada para as moendas. A coluna à direita apresenta os aumentos de cada um dos setores e o aumento de insumos (importações).

Outro tipo de análise pode ser relacionada a estudos sobre os efeitos de uma alteração tecnológica. Tendo em vista que um dos objetivos do PrEE visa analisar a substituição do diesel pelo etanol na plantação, colheita e transporte da cana, a fig. 6 apresenta uma situação em que as 5 unidades de energia de diesel sejam substituídas por etanol produzido internamente ao setor .

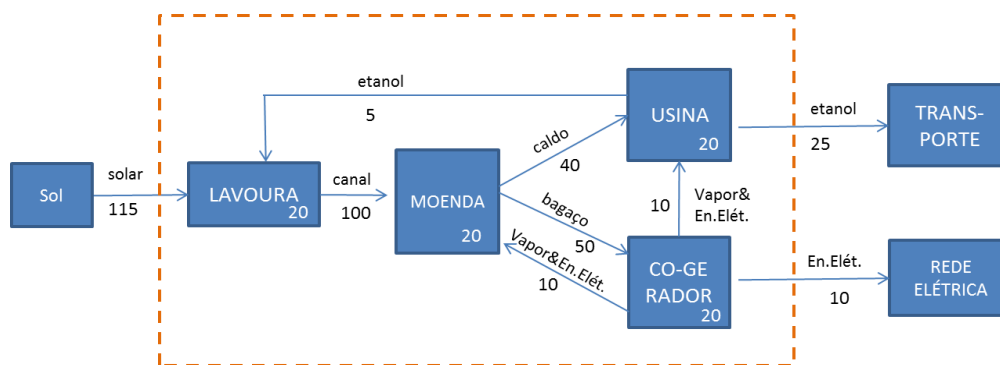


Figura 6.a

	Lavoura	Moenda	Usina	CoGerad	Demanda	Total
Lavoura	20	100	0	0	0	120
Moenda	0	25	35	50	0	110
Usina	5	0	20	0	20	45
Co-Geradr	0	10	10	20	10	50
Sol	115				30	
Diesel	0				Perda =	85
	115				$\eta =$	0,26087

Figura 6.b

A

0,167	0,833	0,000	0,000
0,000	0,208	0,318	1,111
0,042	0,000	0,182	0,000
0,000	0,083	0,091	0,444
0,958			
0,000			
0,958			

Figura 6.c

B = [I - A]⁻¹

Lavoura	1,251	1,668	1,019	3,336	D'	0
Moenda	0,051	1,668	1,019	3,336		0
Usina	0,064	0,085	1,274	0,170		25
Co-Geradr	0,018	0,264	0,361	2,328		10

6.d

Figura 6 Modelo Simplificado do Setor de Cana

Cadeia Energética da Cana

Há poucos estudos detalhados sobre o setor de cana, sendo os mais recentes relativamente antigos [SEABRA, 2008] e relativo a cerca de 100 usinas de um total cerca de 400 usinas em 2013 de variados portes, estágios tecnológicos e localizações^H. As informações agregadas sobre o total dos insumos e dos produtos do setor de cana, no entanto, são estimadas anualmente, o que permite ter uma dimensão global do setor de cana de um ponto de vista global.

Foi realizada uma aplicação do modelo, com base em informações disponíveis sobre as tecnologias e na necessidade de consistência imposta pela lei da conservação de energia. Adotou-se uma abordagem “top-down” e algum esforço de “educated guess” (mais detalhes no Anexo, pág.16). Obteve-se os principais fluxos e transformações relativos ao período 2013/14, apresentados de forma esquemática na fig.7. Cabem algumas observações:

- Como o objetivo do modelo é analisar formas para melhorar a eficiência na cadeia, a forma da energia é nominada segundo o produto que a contém e o estágio de processamento. Assim, a diferença entre “cana” e “cana picada” se impõe, pois a “cana picada” é produzida no campo pelas máquinas colheitadeiras que, por sua vez, usam diesel.
- A inclusão do carro na cadeia energética da cana se explica pelo objetivo mais imediato de usar o modelo na análise dos efeitos do aumento da sua eficiência naquela cadeia (pág. 8).
- Os fluxos de energia são expressos em MteP (Milhões de Toneladas Equivalentes de Petróleo).
- Os dados dos insumos e usos finais são baseados nos valores observados no Brasil em 2013 com alguns ajustes comentados no anexo.
- Os fluxos internos ao setor foram estimados, para efeito de apresentação do modelo considerando valores aproximados de eficiências das tecnologias e balizados pelo princípio da conservação de energia. As hipóteses adotadas são explicadas no anexo (pág.16).
- Cerca de um terço da energia solar é fixado quimicamente no caldo da cana (açúcares) e o restante em um complexo de hidrocarbonetos sólidos (celulose, hemi-celulose, lignina) que constituem o bagaço, as folhas e palhas. O caldo pode ser transformado em alimento (açúcar) ou em etanol. A biomassa sólida é usada como combustível para produzir o vapor utilizado sob a forma de vapor e a energia elétrica (em parte usada internamente e o restante vendida para a rede elétrica).
- Os valores indicados para cada tecnologia dentro da respectiva caixa se referem às perdas de energia que, necessariamente, ocorrem nos processos e/ou a energia usada pelo processo e que não é transmitida para as etapas seguintes (por exemplo: a energia do diesel usado na colheita não se incorpora à energia da cana).
- Nas caixas em que há transformação de um tipo de energia em outro é indicada a eficiência média do processo usando a letra grega “ η ”. Seu valor se situa entre 0 e 1.
- A linha pontilhada que interliga a USINA e o Veículo Pesado se refere à possibilidade de substituir o diesel por etanol. Embora tecnicamente possível, não existe hoje a disponibilidade de equipamentos, o que e deverá ser um dos objetivos do PrEE.

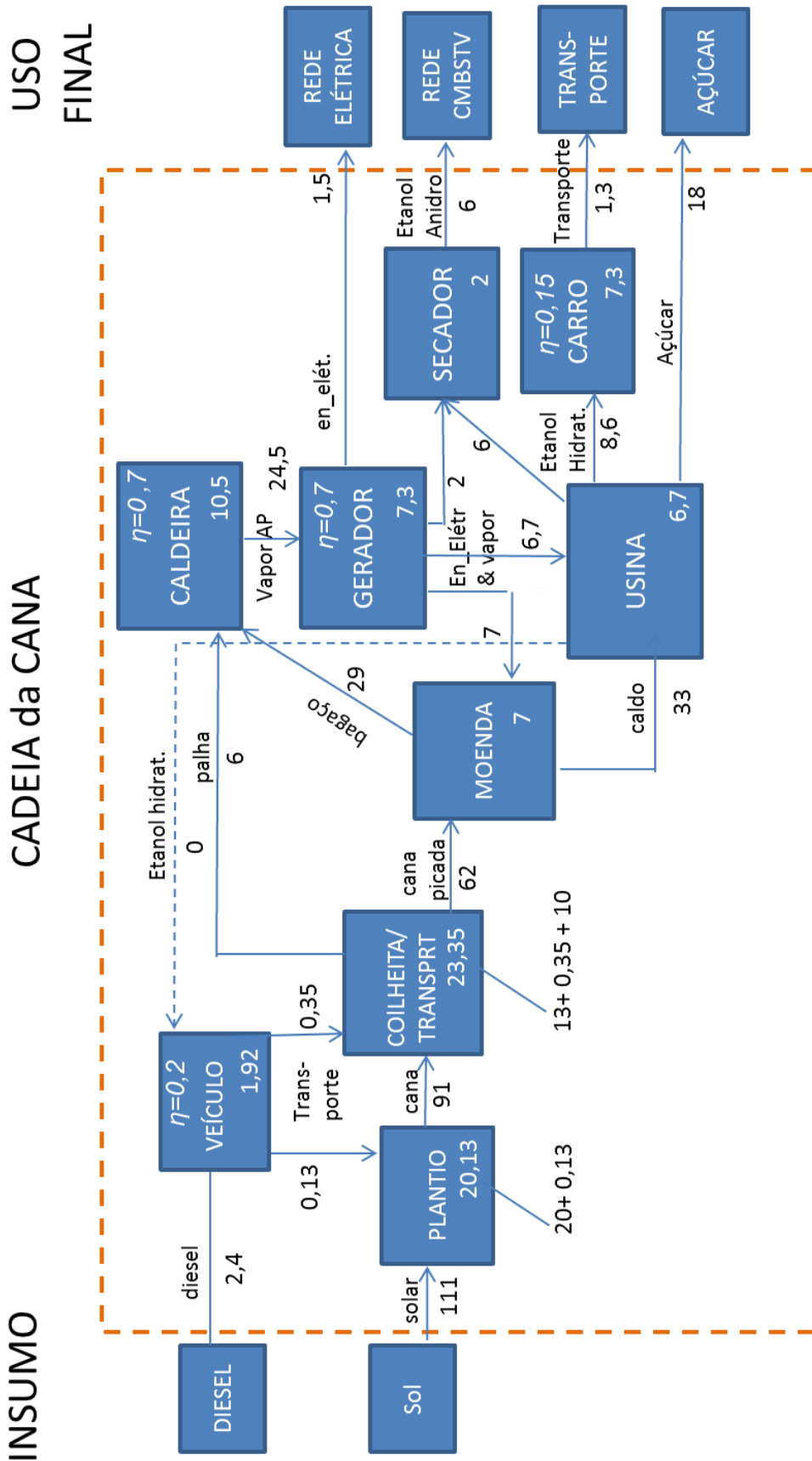


Fig. 7 Modelo Simplificado da Cadeia Energética da Cana/ Brasil 2013

M

	Veic.Pes.	Plantaç.	Colheita	Moenda	Caldeira	Gerador	Usina	Carro	Secador	Demanda	Total
Veic.Pes.	0,15	0,35	1						0		1,5
Plantaç.		27,35	63						0		90,35
Colheita			15	44	5				0		64
Moenda				4	17		26		0		47
Caldeira					4,4	17,6			0		22
Gerador				3		5,6	5		1	3	17,6
Usina							5	8	6	12	31
Carro								7		1	8
Secador									1	6	7
Sol		90								22	
Diesel	1,5										
Total	1,5	90	0	0	0	0	0	0	0		

91,5

Perda : 69,5
 $\eta = 24,0\%$

B

	Veic.Pes.	Plantaç.	Colheita	Moenda	Caldeira	Gerador	Usina	Carro	Secador
Veic.Pes.	1,111	-0,006	-0,015	0,014	-0,009	0,014	-0,017	0,134	0,014
Plantaç.	0,000	1,434	-1,844	1,766	-1,182	1,733	-2,099	16,793	1,810
Colheita	0,000	0,000	1,306	-1,251	0,837	-1,228	1,487	-11,896	-1,282
Moenda	0,000	0,000	0,000	0,995	-0,961	1,409	-1,266	10,126	1,031
Caldeira	0,000	0,000	0,000	0,116	1,138	-1,668	0,204	-1,636	0,074
Gerador	0,000	0,000	0,000	-0,093	0,090	1,335	-0,164	1,308	-0,059
Usina	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,192	-9,538	-1,192
Carro	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	8,000	0,000
Secador	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,167

Figura 7

Anexos

Insumos e Produtos agregados

A produção de cana na safra em 2013/14 foi de 653 milhões de toneladas de cana [UNICA]. A tabela A.1 apresenta o equivalente energético dos principais insumos energéticos da cana no campo que totalizam 111 MteP (sem diesel, ver adiante).

Forma de energia	MteP	Obs.
Caldo Total	33	Estimado considerando 35,3% da energia da cana [ISAIAS]
Caldo p/ Etanol	15	Igual ao conteúdo energético do etanol produzido [BEN; MinAgr]
Caldo p/ Açúcar	18	Estimado por diferença do total
Bagaço	29	Estimado considerando 34,8% da energia da cana [ISAIAS] Dado BEN
Palha Total	25	Estimado considerando 29,8% da energia da cana [ISAIAS] Dado BEN
Palha usada na indústria	6	Com base nos dados do BEN
Total	111	

Tabela A.1 Insumos

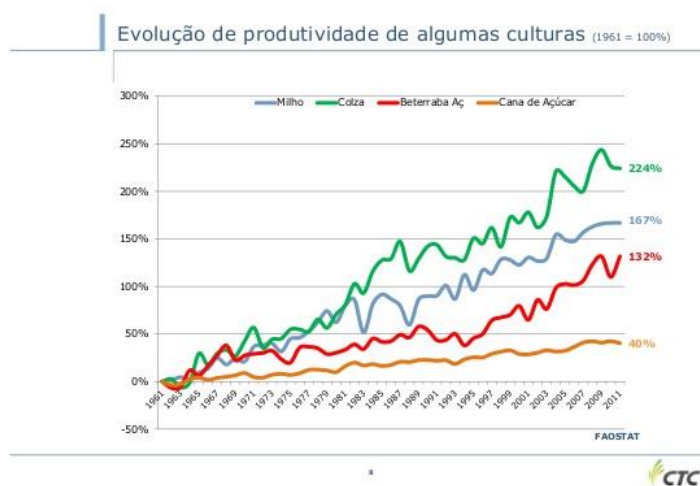
A tabela A2 resume os principais produtos energéticos do setor de cana brasileiro.

Forma de energia	MteP	Obs.
Etanol	15	Equivalente à produção anual que foi de 28 Mm ³
Anidro	7	Dado BEN
Hidratado	8	Dado BEN
Açúcar (conteúdo energético)	18	Ver acima
En Elétrica	1,5	16 TWh [BRAGA]

Tabela A.2 Produtos

Energia Solar

A evolução da produtividade cana de açúcar no Brasil foi muito inferior a de outras culturas de biomassa energética conforme [BURNQUIST], como o milho, a beterraba¹ e a colza. Isto reflete, em grande parte, a falta de consistência nas políticas do etanol pois contrasta, por exemplo, com a melhora da produtividade da soja no país.



Não obstante, apesar das dificuldades recentes do setor de cana, diversas iniciativas indicam a possibilidade de obter aumentos expressivos de produtividade a partir do aperfeiçoamento genético, técnicas de plantio, de irrigação, colheita e outros:

- Um plantador estima em 20% a redução das perdas que está obtendo usando “drones” para identificar falhas na plantação que ficam invisíveis, a não ser do alto, quando a cana cresce;
- Um desenvolvedor de cama [Bressani, 2015] indica que a sua “cana energética” produziu, em 2015, 180 ton/Ha de massa verde e atingirá 250 ton/Ha até 2020 em região onde a produtividade alcança hoje 92 ton/Ha.
- Outros aperfeiçoamentos – plantação e colheita com precisão, além de irrigação podem acarretar mais ganhos e aumentar mais ainda a produtividade.

Para efeito do trabalho, arbitramos “perdas” de 20 MteP (ou seja, é uma energia que estaria sendo aproveitada) e que a energia solar incidente seja de 110 MteP, um número certamente muito subestimado.

Diesel

Estudo realizado de 2007 [MACEDO], estima que o consumo de diesel na agricultura era de 270 L/ha. Adotou-se este valor, pois embora tenha havido melhora na eficiência dos motores, aumentou também o consumo de diesel com a mecanização da colheita. Considerando uma área plantada [UNICA] de $9,8 \times 10^6$ Ha, o consumo total estimado de 2,7 bilhões de litros/ano, que equivale a 2,4 MteP.

O valor pode parecer pequeno vis-à-vis a quantidade de energia fixada pela cana. Na verdade equivale a mais do que todo o diesel usado para transporte urbano no Brasil. Em termos energéticos, equivale a mais do que 10% do etanol produzido no Brasil!

Veículos

Eficiência arbitrada em 20%¹. Da energia líquida produzida (0,5 MteP) supõe-se que cerca de um terço (0,15 MteP) seja usada na plantação e o restante (0,35 MteP), na colheita e transporte da cana até as usinas (mais especificamente, as moendas).

Plantação

Além da energia que não é aproveitada pela produtividade menor, as perdas incorporam a energia usada na plantação (vinda do veículo).

Colheita

Na colheita há as perdas resultam: 1) das tecnologias automatizadas de colheita e que ainda têm potenciais de aproveitamento; 2) da energia fornecida pela tecnologia do veículos e; 3) da palha que precisa ser deixada no campo para fazer uma cobertura vegetal do terreno e ser incorporada ao solo

Moenda

As moendas podem utilizar diretamente o vapor em turbinas ou serem acionadas eletricamente (forma mais eficiente).

Caldeira

As eficiências das caldeiras (que transformam o calor da combustão em vapor de alta pressão) variam em função da dimensão e da tecnologia, mas são relativamente elevadas. No modelo arbitramos trabalhar com uma eficiência de 70%.

Co-gerador

Essa unidade, a partir do vapor de alta pressão, produz a energia elétrica e o vapor de baixa pressão usado no processo. Arbitrada eficiência de 70%. A energia elétrica exportada em 2013 foi de 16 TWh (1,5 tep). O vapor e energia elétrica distribuídos para a moenda, usina e secador foram atribuídas de forma arbitrária por falta de informação.

USINA

As perdas nas usinas correspondem à energia elétrica e o vapor utilizados no processamento.

CARRO A ETANOL

Considerada a eficiência média dos carros de passageiros de pequeno porte com motor Otto, com eficiência da ordem de 15%

SECADOR do ETANOL

As perdas correspondem às formas de energia importadas do próprio setor (energia elétrica e vapor).

Referências

[TANAKA, 2011] Tanaka, Fujio John; 2011; Application of Leontief's Input Output Analysis in Our Economy in http://reposit.sun.ac.jp/dspace/bitstream/10561/874/1/v45n1p29_tanaka.pdf

[SEABRA, 2008] Seabra, Joaquim; 2008; Avaliação Técnico-Econômica de Ações para aproveitamento integral da biomassa da cana no Brasil; Tese de Doutorado UNICAMP

[BEN, 2014] Balanço Energético; 2014; Empresa de Planejamento Energético

[BRAGA, 2015] Palestra no Ethanol Summit 2015

[BRESSANI, 2015] José Bressani; 2015; CANA-ENERGIA: Melhoramento genético da cana-de-açúcar com foco na biomassa; Ethanol Summit 2015 in <http://ethanolsummit.com.br/wp-content/uploads/2015/07/3-Jos%C3%A9-Bressiani.pdf>

[LEVITT, 60], Theodore; Marketing Myopia; Harvard Business Review July- August 1960

[MACEDO, 2007] Macedo, Isaias et alli; 2007; Green house gases emissions in the production an use of ethanol sugarcane in Brazil; ELSEVIER; in www.sicencedirect.com

[Wikipedia] "Photosynthetic efficiency" in https://en.wikipedia.org/wiki/Photosynthetic_efficiency

[UNICA] <http://www.unica.com.br/mapa-da-producao/>

[GIGANTES] “The representation of technology in input-output systems”

[Burnquist, 2014] William; (CTC) “Desenvolvimento para o Setor Canavieiro” Simpósio GECA-

[ESALQ 2014] <http://pt.slideshare.net/gecaesalq/desenvolvimento-para-o-setor-canavieiro-william-burnquist-ctc-simposio-gecaesalq>

Notas

^A Leontiev ganhou o Prêmio Nobel de Economia 1973 graças ao modelo Insumo-Produto (que também leva seu nome). Para um resumo didático sobre o modelo e aplicação há diversas referências. Um resumo bem interessante de [TANAKA, 2011], pode ser obtido na Internet.

^B Essa abordagem foi usada no projeto Matriz Energética Brasileira desenvolvido no final dos anos 60.

^C Essa restrição foi feita para simplificar o modelo, mas pode ser relaxada. A unidade de cogeração, por exemplo, poderia exportar vapor e energia elétrica mas, para tanto, o vetor coluna **D** de demanda deveria ser transformado em uma matriz.

^D A unidade energética usada poderia ser a usual para a forma de energia tratada (eletricidade em kWh, por exemplo). Para facilitar a visualização e facilitar a análise do balanço energético isto não é feito no corrente texto.

^E A madeira (ou “lenha” na denominação do BEN) tem excelentes oportunidades para aumentar a eficiência energética e competir com as fontes fósseis no Brasil.

^F Mais sobre os gráficos Sankey, ver, por exemplo, https://en.wikipedia.org/wiki/Sankey_diagram

^G MTEP – milhões de toneladas equivalentes de petróleo, medida adotada pela Conferência Mundial de Energia nas estatísticas internacionais e adotada na MEB.

^H Estes números modificaram ao longo de 2015 com a crise que atingiu fortemente o setor de cana, em parte uma consequência da competitividade do etanol artificialmente reduzida.

^I Dados até 2011 citados por Burnquist. Nos quatro últimos anos a diferença se acentuou)

^J Esse valor arbitrário, representa a eficiência “tanque-roda”