

Diagrama de Fontes de Carbono – Uma nova ferramenta para o planejamento energético

F.S.FRANCISCO, G.L.FERNANDES, E.M.QUEIROZ e F.L.P.PESSOA

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Departamento de Engenharia Química
E-mail para contato: flaviosfrancisco@eq.ufjf.br

RESUMO – As atividades humanas em todo o mundo tem gerado uma drástica mudança climática. A redução das emissões de CO₂, pelas atividades humanas, seria a medida mais importante para reduzir este efeito negativo no clima. Recentemente, muitos países ao redor do mundo se comprometeram a reduzir suas emissões de CO₂ ao longo do tempo. Neste contexto, o mundo está lutando para equilibrar o crescimento da demanda de energia e preservação do meio ambiente para um futuro sustentável, principalmente em função dos impactos ambientais, sociais e econômicos adversos do aquecimento global que estão associados com as emissões de gases de efeito estufa. Neste sentido diversas metodologias tem sido desenvolvidas para auxiliar tanto na redução de CO₂ como para o planejamento energético. Uma delas é o Diagrama de Fontes de Carbono (DFC), que é utilizado para localizar as metas de emissão, de fontes de zero ou baixo teor de emissão de carbono para o planejamento energético. Neste trabalho foi avaliado a utilização do DFC em problemas de planejamento energético segregado, que diz respeito à alocação das fontes energéticas em diferentes setores de uma dada região. Os resultados obtidos para o consumo de fonte de zero carbono para planejamento segregado dos setores de transporte e industrial foi 29,3 % menor do que obtidos por outros métodos descritos na literatura.

1. INTRODUÇÃO (FONTE 14)

Estamos vivendo em um mundo onde a preocupação mundial com o meio ambiente cresce a cada dia. Os governos vem enfrentando questões relacionadas aos desafios de mudanças ambientais e sociais, incluindo a segurança energética, escassez de água, escassez de alimentos, escassez de matérias primas e mudanças climáticas. Tais preocupações se devem principalmente pelo rápido crescimento da população mundial; estimativas nos dizem que atualmente há mais de sete bilhões de pessoas e estamos caminhando para termos quase 10 bilhões de pessoas em 2050 (Bureau, 2014). O aumento da população, seguido do desenvolvimento dos países e o aumento dos padrões de consumo, gera consigo o aumento da produção industrial, que é um dos maiores causadores de impacto no ecossistema.

Com o crescimento do setor industrial há um aumento substancial na demanda total de energia em geral e eletricidade, em particular. Como se sabe, a principal fonte para geração de eletricidade é o uso de combustíveis fósseis intensivos em carbono (carvão, petróleo e gás natural), que são os principais contribuintes da emissão do dióxido de carbono (CO₂).

Preocupações crescentes sobre a mudança climática na indústria e nos órgãos governamentais, juntamente com normas mais rígidas de proteção ambiental para o desenvolvimento sustentável têm motivado pesquisas na busca de um planejamento energético ideal para reduzir as emissões dos gases de efeito estufa em níveis regionais e nacionais. O planejamento envolve cumprimento de limites da carga de emissão de carbono ou da pegada de carbono e, cumprindo simultaneamente as demandas de energia de diferentes setores econômicos ou geográficos, levando em consideração todas as restrições associadas.

Neste sentido, diversas pesquisas tem sido desenvolvidas no gerenciamento das emissões de CO₂ para o cumprimento de metas ambientais, satisfazendo simultaneamente as restrições econômicas. A maioria dessas pesquisas desenvolveram metodologias baseadas na Análise Pinch (Linhoff e Flower, 1978), na qual foi proposta uma metodologia para a redução de emissões de carbono e de planejamento energético.

Estas metodologias cumprem o princípio da análise pinch de atingir as metas de emissões de CO₂ associadas aos sistemas de energia e utilidades. O primeiro trabalho utilizando este conceito foi apresentado por Dhole e Linhoff (1992), onde a abordagem Total do Site foi utilizada para otimizar o sistema de utilidade e determinar as emissões associadas ao CO₂ no site. No entanto, esta abordagem era restrita à otimização dentro de instalações industriais, e não para os setores de energia regionais ou nacionais. Alguns anos mais tarde, Tan e Foo (2007) utilizaram a análise Pinch como uma ferramenta para planejamento preliminar do planejamento da emissão de carbono no setor elétrico. De posse de dados sobre uma variedade de recursos energéticos fósseis associados com diferentes tecnologias e intensidades de carbono, a sua abordagem determinou quantas fontes de energia de "zero carbono" são necessárias para atender às demandas específicas de um dado país ou região, através de um método gráfico denominado curva composta de planejamento energético (*energy planning composite curves*) plotando uma curva da demanda de energia vs limites de emissão de CO₂ equivalente. Crilly e Zhelev (2007) propuseram estender o uso de curvas compostas de planejamento energético para lidar com a natureza dinâmica da oferta e demanda de energia; enquanto que o método também foi estendido para a análise com restrição da pegada de bioenergia em conjunto com limites de área de terra para o cultivo de culturas energéticas (Foo et al., 2009).

Shenoy (2010) desenvolveu uma abordagem de dois estágios para lidar com rede de alocação de energia para redução da emissão de carbono. O primeiro estágio é composto pela etapa de obtenção das metas utilizando a técnica de algoritmo da tabela composta (composite table algorithm – CTA) e o segundo estágio, síntese da rede, é realizada com o algoritmo do vizinho mais próximo (nearest neighbors algorithm – NNA). Francisco et al.(2014) apresentou o procedimento algorítmico-heurístico denominado Diagrama de Fontes de Carbono (DFC) para planejamento energético com restrições. Este se trata de um método robusto com uma única etapa para obtenção das metas e síntese de rede.

Em geral, é desejável para maximizar o uso de fontes neutras ou de baixo teor de carbono para substituir os combustíveis fósseis convencionais com alto teor de carbono. No entanto, essas tecnologias são caras (como acontece com as energias renováveis) ou controversas (como no caso da energia nuclear) do que os combustíveis fósseis convencionais. Além disso, no curto prazo, muitas

vezes é necessário gerir a transição para o aumento da utilização de energia de baixo carbono para minimizar as interrupções no fornecimento de energia ou o preço (Lee et al., 2009).

Portanto, em muitos cenários de planejamento há algum interesse em identificar o mínimo quantidade de fontes de energia de zero ou de baixo carbono necessárias para cumprir os limites nacionais ou regionais de emissão de CO₂, que é um dos objetivos deste trabalho em ratificar a eficiência do procedimento DFC, além de estendê-lo para lidar com casos envolvendo planejamento energético segregado.

2. METODOLOGIA

Esta seção descreve a metodologia do Diagrama de Fontes de Carbono (DFC) aplicado ao setor de planejamento energético segregado. Essa metodologia tem como características: 1) identificar a quantidade mínima de recursos de energia com emissão zero necessário para satisfazer as necessidades energéticas específicas e os limites de emissões de diferentes setores ou regiões, e; 2) identificar o esquema de alocação de energia para atender os limites de emissão especificados usando a quantidade mínima de recursos de energia com zero emissão.

Este método é uma adaptação do método conhecido como Diagrama de Fontes de Água (DFA) (Gomes et al., 2007), cujo tem por objetivo determinar a vazão mínima de água primária no gerenciamento de redes de água. O DFC é um método que foi desenvolvido para definir a meta mínima da fonte limpa e, simultaneamente, proporcionar uma rede de emissão de carbono (chamado neste trabalho como cenário). Este método possuiu seis passos e algumas premissas que serão discutidas a seguir (Francisco et al., 2014):

Passo 1) Levantamento dos dados – obter todos os fatores de emissão para a(s) fonte(s) e a(s) demanda(s), bem como, todas as demanda(s) e disponibilidade(s) energética(s)

Passo 2) Este passo é similar ao passo do DFA que utiliza a definição de concentração de intervalo. No DFC, ao invés de concentrações, os fatores de emissão são arranjados em ordem crescente para criação dos intervalos. Se houver mais de um intervalo de concentração com o mesmo valor, somente um será representado no intervalo.

Passo 3) Representar as demandas no diagrama por linhas (ou flechas), as quais são delimitadas pelo seu respectivo fator de emissão e o fator de emissão mais alto do conjunto de dados estudados. O respectivo consumo de energia das demandas é indicado em uma coluna no lado esquerdo do diagrama.

Passo 4) Determine a quantidade de energia transferida em cada intervalo. Sendo calculado pela Equação 1.

$$\Delta E_{transf,j,t} = D_j * (C_{kfinal,t} - C_{kinicial,t}) \quad (1)$$

Onde, $\Delta E_{\text{transf},j,t}$ é a quantidade de energia transferida pela demanda j no intervalo t ; D_j é a demanda energética; $C_{k\text{final},t}$ é o fator limite de emissão superior no intervalo t , $C_{k\text{initial},t}$ é o fator limite de emissão inferior do intervalo t ; e $j = 1 \dots N_d$, e $t = 1 \dots N_{\text{int}}$ (N_d é o número de demandas (regiões) e N_{int} é o número de intervalos de fator de emissão do DFC). Todos os $\Delta E_{\text{transf},j,t}$ são escritos no DFA entre parêntese sobre a(s) respectiva(s) linha(s).

Passo 5) Representação das fontes no diagrama. As fontes são representadas sobre seu respectivo fator de emissão.

Passo 6) Neste passo, é iniciado a síntese da rede de emissão de carbono, seguindo as regras:

Regra 1: Sempre utilize uma fonte com o maior fator de emissão de carbono, quando este mesmo está disponível. Desta forma, será gerado um cenário com menor uso de uma fonte de baixa emissão de carbono será gerado, mas ele não será “amigável ambientalmente”.

Regra 2: Se mais de uma fonte está disponível e um cenário “amigável ambientalmente” é necessário, use a fonte com fator de emissão menor.

Regra 3: Somente use fonte com baixo fator de emissão quando outras fontes com fatores de emissão maiores não estiverem disponíveis.

Regra 4: Se no último intervalo não foi atendida toda a demanda energética da demanda avaliada, utilize a fonte com maior fator de emissão para completar a demanda se for o objetivo cenário não “amigável ambientalmente”. Caso seja necessário um cenário “amigável ambientalmente” utilize a fonte mais limpa para completar a demanda necessária.

Aplicando estas regras em cada intervalo, é possível calcular o respectivo consumo de fonte de baixo carbono. Em alguns intervalos, é possível selecionar mais de uma fonte e, dependendo da fonte utilizada, diferentes redes de emissão de carbono podem ser obtidas. Note que, essa característica do DFC permite a análise simultânea de diferentes cenários e a consideração de restrições ao longo do procedimento.

Com o diagrama criado, a alocação de fontes de carbono em cada intervalo pode ser iniciado. O algoritmo de análise é feita em cada intervalo, a partir do menor até o maior fator de emissão.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

No intuito de expandir as aplicações do DFC, será utilizado um estudo de caso envolvendo planejamento segregado. Planejamento segregado se refere a divisão da demanda energética em cada região por setores específicos que necessitam de alocação das fontes de energia. O estudo de caso utilizado já foi reportado em alguns trabalhos na literatura (Lee et al., 2007; Shenoy, 2010) e consiste de um caso hipotético para ilustrar a aplicação do conceito de planejamento segregado pelo DFC. Cada uma das três regiões foi segregada em setores industriais (Ex.: transporte terrestre, aéreo e marítimo) e setores industriais (Ex.: aplicações estacionárias, incluindo geração de energia). Os dados

de três fontes de combustíveis fósseis (gás natural, petróleo e carvão) e das seis demandas são observados na Tabela 1. Além das fontes informadas na Tabela 1, há a disponibilidade de uma fonte com zero teor de carbono (biogás e energia provinda de uma hidroelétrica) e uma fonte com baixo teor de carbono (biodiesel com fator de emissão de 16,5 t CO₂/TJ).

Tabela 1 – Dados para o estudo de caso (Fonte: Shenoy, 2010)

Fontes de Energia	Fator de emissão (t CO ₂ /TJ)	Energia disponível (x 10 ⁴ TJ)	Carga de emissão limite (x10 ⁶ t CO ₂)	Demanda de Energia	Fator de emissão (tCO ₂ /TJ)	Consumo esperado (x 10 ⁴ TJ)	Carga de emissão limite (x10 ⁶ t CO ₂)
Setor de transporte							
S1 - Gás natural	55	80	44	D1 - Região 1	30	40	12
S2 - Petróleo	75	100	75	D2 - Região 2	40	72	28,8
S3 - Carvão	105	500	525	D3 - Região 3	50	72	36
Total		680	644			184	76,8
Setor industrial							
S1 - Gás natural	55	0		D3 - Região 1	30	160	48
S2 - Petróleo	75	73,273		D4 - Região 2	40	48	19,2
S3 - Carvão	105	500		D5 - Região 3	50	8	4
Total		573,273				216	71,2

De posse desses dados, será considerado o seguinte cenário: somente pode ser utilizado a fonte de baixo teor de carbono no setor de transporte e a fonte com teor zero de carbono somente pode ser utilizada no setor industrial tendo como base a compatibilidade de combustíveis específicos para determinadas aplicações.

Para atingir a meta de emissão mínima de carbono zero (ou de baixo carbono) e gerarmos uma rede de alocação de energia, devemos seguir os passos do DFC descrito anteriormente. Há duas opções para resolução desse problema: 1º) podemos iniciar a alocação de energia para alcançar as demandas do setor industrial e, de posse das fontes restantes fazer a alocação de energia para alcançarmos a demanda do setor de transporte, ou; 2º) podemos realizar a alocação inversa, ou seja, iniciamos pelo atendimento das demandas do setor de transporte e depois do setor industrial. No intuito de observarmos as diferenças desses duas possibilidades, as mesmas serão averiguadas.

Possibilidade 1 – Atendimento da demanda do setor de transporte antes do setor de industrial

Seguindo os passos descritos anteriormente, foi possível obter-se os cenários para o setor industrial e para o setor de transporte, representados pelas Figura 1 e Figura 2, respectivamente.

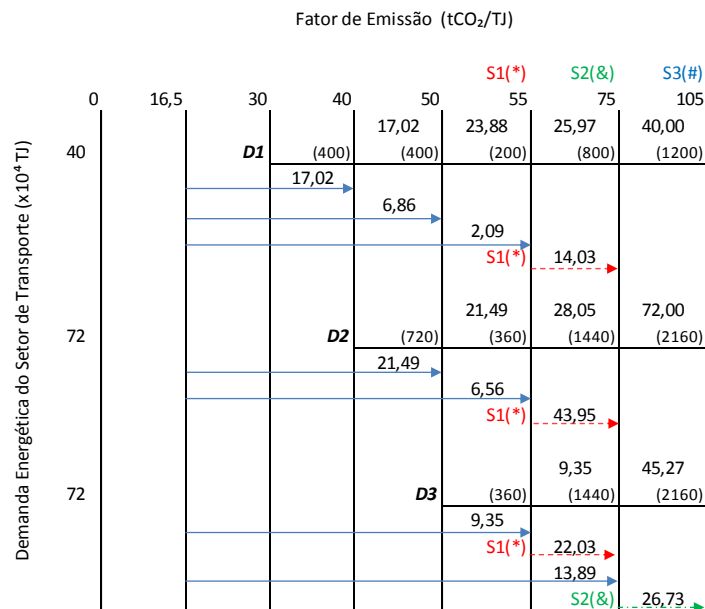


Figura 1 – DFC final para o setor de transporte para a primeira possibilidade.

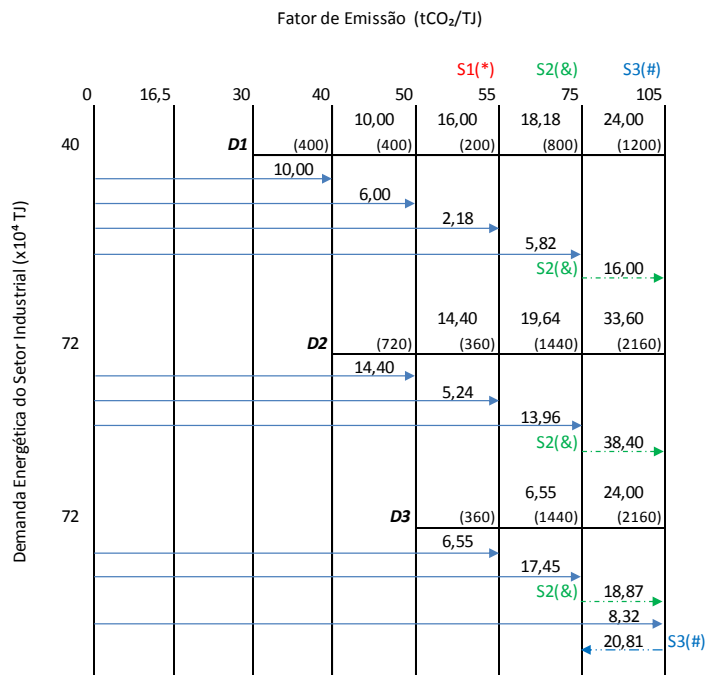


Figura 2 – DFC final para o setor industrial para a primeira possibilidade.

Baseado nos DFC obtidos na Figura 1 e na Figura 2, houve um consumo de biodiesel de 772 635 TJ com o pinch de fator de emissão de 75 t CO₂/TJ para o setor de transporte e para o setor industrial, com um consumo da fonte de zero carbono de 899 228 TJ e com um pinch de fator de emissão de 105

t CO₂/TJ. Após a obtenção dos cenários ainda houve um excedente de 4 791 929 TJ da fonte S3. Todos os valores limites de emissão foram atendidos para os respectivos setores de cada região. O valor obtido para o consumo de biodiesel foi um pouco melhor do que os obtidos por Lee et al. (2009) e Shenoy (2010) que foi de 772 650 TJ. Lee et al. (2009) utilizou um método gráfico para determinar a meta de consumo de biodiesel, enquanto que Shenoy (2010) utilizou uma metodologia de dois estágios, uma para obtenção da meta e outro para a obtenção da rede. Já para o resultado da fonte de zero carbono consumida e do excesso de energia reportado pelo DFC foi superior aos reportados por Lee et al. (2009) e Shenoy (2010), 1 272 576 TJ e 4 845 226 TJ. Em relação as metodologias utilizadas, o DFC, tanto a etapa de determinação das metas quanto na de obtenção da rede são obtidas simultaneamente. O valor da meta é obtido simplesmente pela soma dos valores utilizado de biodiesel e a rede é simplesmente obtida pela leitura do DFC.

As redes para o setor de transporte e para o setor industrial podem ser observadas na Figura 3.

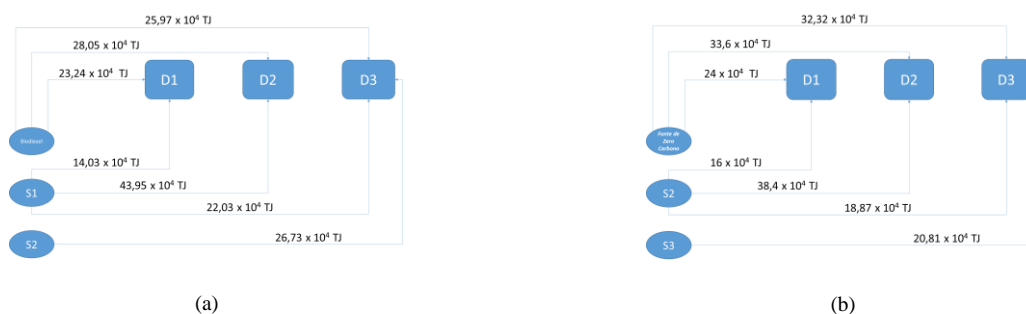


Figura 3 – Rede de emissão de carbono obtida pelo DFC para os setores de transporte (a) e industrial (b)

Além das redes demonstradas na Figura 3, é possível obter-se mais quatro possíveis cenários para o setor de transporte, variando a alocação das fontes na demanda.

Em relação a segunda possibilidade, o setor de transporte apresentou um consumo de 1 124 529 TJ de biodiesel e um pinch de fator de emissão de 105 t CO₂/TJ. Já para o setor de transporte houve um consumo de 602 662 TJ da fonte de zero carbono e um pinch de fator de emissão de 75 t CO₂/TJ. O DFC reportou um excesso de energia final de 4 847 168 TJ para a fonte S3. Para o caso do setor industrial também é possível gerar mais três cenários além do obtido pelo DFC. Com os resultados entre as duas possibilidades, podemos afirmar que a primeira possibilidade, atendimento do setor de transporte antes do setor industrial, se mostrou a melhor opção em termos de consumo de biodiesel. Já em termos de consumo da fonte de zero carbono a segunda possibilidade se mostrou mais animadora.

4. CONCLUSÃO

O procedimento heurístico-algorítmico DFC foi aplicado para o planejamento energético segregado dos setores de transporte e industrial em três regiões distintas. As metas de consumo mínima quantidade de energia dos recursos com fontes de zero e baixo carbono para atender as

demandas de energia com os limites de emissão correspondentes de dois setores específicos em três regiões foram obtidas com o DFC. O DFC mostrou valor semelhante ao consumo energético da fonte de baixo carbono comparado com outros métodos propostos na literatura. No entanto, em relação ao consumo da fonte de zero carbono e do excedente de energia da fonte S3, o DFC se mostrou muito superior, demonstrando resultados 29,3 % menor para a fonte de zero carbono e de 1 % menor para o excedente de energia. Além dos excelentes resultados obtidos, o DFC possui a simplicidade de obter, ao mesmo tempo, obter as metas e rede de emissão de carbono, no mesmo diagrama. Em outras palavras, apenas uma abordagem é necessária.

Com essa perspectiva, o Diagrama de Fontes de Carbono, se mostra uma importante ferramenta para determinação de metas e síntese de redes em problemas de energético segregado.

5. REFERÊNCIAS

- BUREAU, U.S.C. World population. International Programs. Disponível em: https://www.census.gov/population/international/data/worldpop/table_population.php. Acessado em: 04/05/2014.
- CRILLY, D.; ZHELEV, T. Current trends in emissions targeting and planning. Chem. Eng. Trans., vol. 12; p. 91–97, 2007.
- DHOLE V.R., LINNHOFF B. Total site targets for fuel, cogeneration, emissions, and cooling, Comput. Chem Eng. Vol.17, S.101–109, 1992.
- FOO, D.C.Y.; TAN R.R.; NG D.K.S. Carbon and footprint-constrained energy sector planning using cascade analysis technique. Energy; vol. 33 (10), p.1480-1488, 2009.
- FRANCISCO, F.S., PESSOA, F.L.P., QUEIROZ, E.M. Carbon sources diagram – a tool for carbon-constrained energy sector planning. Chem.Eng.Trans., Vol.39, 2014 (*accepted – in press*).
- LEE, S.C.; NG, D.K.S.; FOO, D.C.Y.; TAN, R.R. Extended pinch targeting techniques for carbon-constrained energy sector planning. Appl. Energy, vol.86, p.60–67, 2009.
- LINNHOFF, B.; FLOWER, J.R. Synthesis of heat exchanger networks. I. Systematic generation of energy optimal networks. AIChE J. Vol. 24, p. 633–642, 1978.
- SHENOY, U.V. Targeting and design of energy allocation networks for carbon emission reduction. Chem.Eng.Sci., vol.65, p.6155-6168, 2010.
- TAN, R.R.; FOO, D.C.Y. Pinch analysis approach to carbon-constrained energy sector planning. Energy, Vol.32, p.1422–1429, 2007.