



Avaliação do desempenho ambiental do processamento de óleo diesel que atende ao mercado brasileiro de combustíveis

Claudia Cristina Sanchez Moore¹, Marília I.S.F. Matsuura², Luiz Kulay¹

¹ Departamento de Engenharia Química da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, email: ccristina569@gmail.com

² Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa Meio Ambiente

Resumo. O diesel é o derivado de petróleo mais consumido no Brasil, sempre como fonte de energia. A literatura científica não registra, porém, um estudo recente sobre o desempenho ambiental do processamento do diesel comercializado no país. O presente estudo se propõe a preencher, ainda que em parte, esta lacuna ao realizar tal diagnóstico para as condições de processo praticadas no estado de São Paulo. Para tanto, aplicou-se a técnica de Avaliação de Ciclo de Vida - ACV segundo uma abordagem atribucional 'cradle-to-gate' para a produção de 1 MJ de energia na forma de diesel. O desempenho ambiental foi analisado em termos de Demanda Primária de Energia (PED), Mudanças Climáticas (CC), Acidificação Terrestre (TA), Potencial de Formação de Oxidantes Fotoquímicos (POF) e Formação de Material Particulado (PMF). As contribuições majoritárias para PED ocorrem sob a forma do consumo de recursos fósseis não renováveis na forma de petróleo e de gás natural. As emissões de CO₂ e CH₄ derivadas respectivamente de queima e vazamentos de gás natural no processamento de petróleo importado representaram 92% dos aportes para CC. Essas operações foram responsáveis também por perdas atmosféricas de NO_x, precursor de impactos para TA, POF e PMF. Os achados obtidos pelo estudo sugerem ser o tratamento prévio de petróleo importado desde a Nigéria e a produção de diesel que ocorre na Refinaria do Planalto (REPLAN) os estágios mais impactantes da referida cadeia produtiva. Essas atividades convertem-se, portanto, em pontos de implementação de ações de melhoria de desempenho ambiental do processamento em análise.

Palavras-chave. Óleo diesel; desempenho ambiental; combustíveis; energia, ACV.

Introdução

O diesel é a fonte energética de maior consumo em diversos setores de alta relevância econômica mundial, como o industrial, o elétrico e o de transportes (DRUMM et al., 2014). A situação do Brasil não é diferente; no ano de 2014, a produção de diesel de petróleo no país atingiu o limite de 49 milhões de m³. No mesmo âmbito, o setor de transporte respondeu por 77% do consumo total, enquanto os setores agropecuário, energético e industrial responderam por 12%, 3% e 2% respectivamente (EPE, 2015).

No Brasil, a representatividade do petróleo e seus derivados na matriz energética é relevante, correspondendo a 6,9% de participação também em 2014 (EPE, 2015). Em termos ambientais, seguem muito ativas as discussões sobre mudanças climáticas (CC), que remetem a concentração de gases de efeito estufa na atmosfera. De acordo com estudos desenvolvidos nesse campo, tais efeitos se associam, em grande parte, à queima de combustíveis fósseis, e dentre destes, em especial ao uso de diesel (PERES, et al, 2003; LICKS E PIRES, 2010; CAMPOS E MATTEI, 2013; DRUMM et al., 2014).

Em termos acadêmicos, as pesquisas envolvendo o diesel que ocorrem no contexto ambiental concentram-se em comparações com alternativas de origem renovável, principalmente no tocante a efeitos em termos de CC sob o enfoque 'well-to-wheel'. A literatura científica não registra, porém, um estudo recente em que se avalie o desempenho ambiental do processamento do diesel comercializado no Brasil. O presente estudo se propõe a preencher, ainda que em parte, esta lacuna ao elaborar tal diagnóstico para processos praticados no estado de São Paulo, via Avaliação de Ciclo de Vida (ACV). Muito antes de considerar aspectos de representatividade em termos de produção e uso do combustível, esta delimitação geográfica foi estabelecida em função do binômio



precisão e disponibilidade de dados a serem usados para elaboração do modelo de sistema de produto. A técnica de ACV foi aplicada segundo abordagem atribucional e com extensão 'cradle-to-gate' para a produção de 1 MJ de energia na forma de diesel. Espera-se que os resultados dessa iniciativa contribuam para a consolidação de um inventário representativo do contexto brasileiro e permitam identificar oportunidades de melhoria de melhoria no sistema em estudo.

Modelagem do Ciclo de Vida

Especificidades processuais associadas ao óleo diesel consumido no Brasil

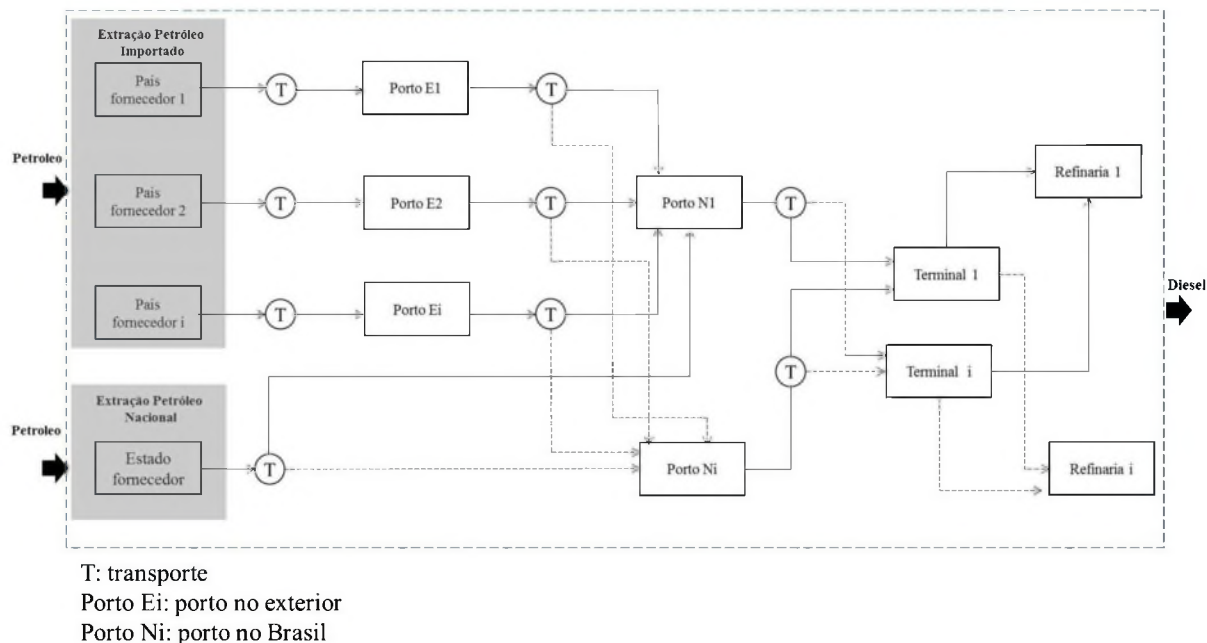
A produção de diesel compreende três estágios principais: (i) extração e processamento primário de petróleo; (ii) transporte; e (iii) refino (LIMA et al., 2012). Os processos de extração se dividem em *onshore* e *offshore*. Além disso, a forma como estes são conduzidos depende de o petróleo proceder de poços associados (em que este se encontra no ambiente juntamente com gás natural) ou não associados. A extração *onshore*, que se dá em terra, ocorre a partir da retirada de petróleo e gás, encontrados em rochas reservatório a partir de perfurações. Já nos processamentos *offshore* há perfuração do leito marinho. Nesse caso, o recurso natural segue para uma plataforma instalada acima da superfície do oceano (DEVOLD, 2013). O petróleo extraído desde poços associados é separado do gás natural (e também de água, quando obtido via *offshore*) antes de seguir para o refino (RISCHMULLER, 2005).

No Brasil prevalecem extrações extrai petróleo *offshore* (cerca de 91%), e dentre destas, o estado do Rio de Janeiro detém a maior contribuição individual, com cerca de 82% daquele volume de produção (ANP, 2012, 2013, 2014). Entre os anos 2011-2013 o Brasil produziu pouco menos de 2.5 Bilhões de barris de petróleo, dos quais cerca de 1% foi gerado no estado de São Paulo. No mesmo período o país adquiriu ainda, via importação, mais 383 milhões de barris junto a dezenove países, sendo a região Sul do continente africano e o Oriente Médio as principais zonas provedoras desse ativo. Nesses casos predominam extrações *onshore* (EPE, 2012, 2013, 2014).

O modal usado para o transporte do petróleo desde as plataformas até as refinarias depende, entre outros fatores, do distanciamento entre ambas as unidades, sobretudo no que se refere ao deslocamento oceânico. Muito embora sejam mais frequentes os oleodutos, tal deslocamento pode ser viabilizado ainda com auxílio de navios tanque.

O estágio de refino que inclui operações de dessalinização, destilação e hidrotratamento. A dessalinização, também conhecida como dessalgadura, consiste da remoção do sal contido na mistura. Nesse sistema, um campo elétrico é aplicado sobre o recipiente de dessalinização, fazendo com que a água salobra seja segregada da fase oleosa. A dessalinização é prática recorrente, mas não exclusiva, do tratamento de petróleo obtido por via *offshore* (RISCHMULLER, 2005).

Figura 33. Sistema de produto para a produção de Diesel



A destilação atmosférica compreende a primeira das etapas de separação das diferentes frações que compõem o petróleo. O processo se apoia principalmente nas diferenças entre propriedades físico-químicas desses extratos. As colunas de destilação são operadas em regime contínuo, podendo gerar um ou mais fluxos laterais – contendo querosene, gás óleo leve e pesado, etc. –, além daqueles que emanam do topo, e do fundo daquele equipamento. Destas, a fração de gás óleo pesado é alimentada à unidade de hidrodessulfurização, onde se mistura a um gás rico em hidrogênio, para produzir diesel (RISCHMULLER, 2005). As transformações descritas anteriormente foram organizadas de maneira lógica e interconectada, na forma do diagrama que aparece descrito a seguir na Figura 1.

Bases conceituais, requisitos técnicos e premissas

Este estudo foi realizado em consonância com os termos estabelecidos pela norma NBR ISO 14044 (ABNT, 2009). No que se refere ao Objetivo, a presente iniciativa se propôs a verificar os efeitos do processamento de diesel comercializado no Brasil. O estudo se destina a dar suporte a estudos – sobretudo de fundo ambiental – de processos nos quais o diesel seja parte integrante. Esta característica define também o perfil do público-alvo que, seria composto por praticantes de ACV, stakeholders envolvidos no segmento de petróleo e derivados, ou profissionais que de uma forma ou de outra se relacionem com as problemáticas tratadas pela iniciativa. Quanto à Definição de Escopo, foram estabelecidos os requisitos técnicos indicados a seguir:

- Função: estabeleceu-se por função a ser cumprida pelo sistema de produto em estudo ‘produzir energia na forma de óleo diesel’;
- Unidade Funcional (UF) e Fluxo de referência (FR): dado que a aplicação da técnica de ACV não considera aspectos relacionados ao uso e disposição final do produto, os valores de UF e FR passam, em termos práticos, a se sobrepor. Nesse contexto definiu-se para efeito da presente iniciativa que o FR compreenderia ‘produzir 1 MJ de energia na forma de diesel’;
- Definição de fronteiras: o sistema de produto compreende os processos elementares associados à produção de diesel, assim como esses aparecem representados na Figura 1.



- d. Tipo e Qualidade dos dados: no que se refere ao tipo, definiu-se que o modelo de sistema de produto relativo a produção de óleo diesel seria constituído apenas por dados secundários, coletados junto a fontes oficiais e referenciáveis. Quanto à qualidade, esses parâmetros atenderem aos seguintes requisitos: a cobertura temporal compreendeu o período de 2011-2013. A cobertura geográfica restringiu-se ao estado de São Paulo em virtude das razões de ordem técnica já enunciadas neste documento. Dentro ainda desse âmbito, foram consideradas as quatro refinarias de Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobras), maior produtora nacional de diesel, existentes na região – Refinaria de Capuava (RECAP), Refinaria Henrique Lage (REVAP), Refinaria Presidente Bernardes – Cubatão (RPBC), e Refinaria de Paulínia (REPLAN) - para efeito de modelagem das atividades de refino. No que se refere à extração de óleo cru o sistema de produto levou em conta ainda, processos realizados no exterior. Foram considerados nesse âmbito processamentos que se desenvolvem na Nigéria, Arábia Saudita, e Argélia, que juntos acumularam cerca de 93% da importação de petróleo entre 2011 e 2013. Finalmente, a cobertura tecnológica do estudo levou em conta as condicionantes processuais descritas anteriormente na seção de ‘Especificidades processuais associadas ao óleo diesel consumido no Brasil’.
- e. Procedimentos para tratamento de situações de multifuncionalidades: identificou-se apenas uma situação na qual de um processo elementar emanasse mais de um produto. Esta se deu no refino do petróleo e para tanto, decidiu-se fazer uso de alocação, usando critério energético. Como resultado desse procedimento coube ao óleo diesel o correspondente a 22% da carga ambiental gerada a montante desse estágio do sistema de produto.
- f. Categorias de impacto e método de Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida (AICV): a AICV foi conduzida em dois níveis. No primeiro deles tratou-se de determinar os impactos ambientais associados ao consumo de recursos naturais para produção de 1 MJ de energia na forma de diesel. Essa quantificação ocorreu a partir da aplicação do método *Cumulative Energy Demand – CED* para as categorias Non-renewable, fossil (NRF), Non-renewable, nuclear (NRN), Non-renewable, biomass (NRB), Renewable, biomass (RB), Renewable, wind (RW), Renewable, water (RWA). O segundo nível de avaliação se ateve a magnificar os efeitos adversos derivados de emissões que procedessem do mesmo processamento antrópico. Para este caso, fez-se uso do método *ReCiPe Midpoint (H)* – versão 1.11 para Mudanças Climáticas (CC), Acidificação Terrestre (TA), Potencial de Formação de Oxidantes Fotoquímicos (POF) e Formação de Material Particulado (PMF). Destaque-se, por fim, que todas as categorias de impacto selecionadas para efeito de AICV demonstram ter aderência com as expectativas a que este estudo se destinou.

Além daquelas condicionantes foram também estabelecidas premissas específicas para efeito de modelagem do sistema de produto. Aquelas consideradas fundamentais para efeito dessa aplicação aparecem listas a seguir:

- Estabeleceu-se como origem do petróleo nacional que entra no sistema de produto a plataforma flutuante *FPSO FPSO Cidade de Itajaí*, localizados respectivamente no Campo Baúna (Transpetro, 2016).
- Quanto ao petróleo extraído no exterior, admitiu-se que o traslado desde o campo extração até as unidades de refinarias paulistas seria composto por: (i) transporte terrestre via oleoduto desde o campo de petróleo, até os terminais marítimos, estando ambos localizados no país de origem; (ii) transporte transoceânico até o porto de destino no Brasil, que para a cobertura geográfica que foi estabelecida, consiste do porto de São Sebastião; e (iii) deslocamento deste, até os terminais de Cubatão e Guararema, que alimentam as unidades de refino, mais uma vez por oleoduto.
- Para efeito de distribuição de petróleo pelas refinarias considerou-se que o Terminal de Cubatão alimenta RECAP e RPBC, ao passo que REVAP e REPLAN sejam supridas via Terminal de Guararema (Transpetro, 2016).
- A lógica de transporte descritas para o petróleo importado, é semelhante àquela empregada para o óleo cru de origem nacional no que se refere ao trecho (iii);

Resultados e Discussão

A Tabela 1 apresenta os resultados em termos de *Primary Energy Demand* – PED para a produção de 1 MJ de energia na forma de óleo diesel.

Tabela 22. Resultados para PED para a produção de 1,0 MJ de energia na forma de diesel

Categoria de impacto	Unidades	Total
NRF	MJ	1,21
NRN	MJ	1,22E-03
NRB	MJ	1,15E-08
RB	MJ	1,28E-03
RW	MJ	1,55E-04
RWA	MJ	9,66E-03
Total	MJ	1,21

Assim como já se poderia esperar de antemão, as contribuições mais expressivas ocorrem na forma de depleção de NRF (99%). Os resultados para esta categoria estão associados ao consumo de petróleo em si (1,15 MJ/FR) e, mais de longe, de gás natural (55 kJ/FR). As contribuições para as demais categorias remetem ao consumo de recursos dispensados para produção de eletricidade e se justificam em função da composição da matriz elétrica nacional, que para a cobertura temporal adotada no estudo se constitui em 70,6% de hidroeletricidade, 18,3% de termoeletricidade, 2,4% de energia de origem nuclear e 7,6% de energia derivada da queima de biomassa, ou mais especificamente, bagaço de cana-de-açúcar. Os demais 1,1% procedem de fontes alternativas: eólica e solar (EPE, 2014).

Outra forma de verificar a efetividade energética do sistema em análise consiste de avaliar seu valor de *Energy Return on Investment (EROI)*, ou seja, a quantidade de energia a ser consumida para produzir certa quantidade de energia (Murphy e Hall, 2010). Em termos algébrico, o EROI de um produto ou ativo energético pode ser estimado por meio da Equação (Eq. 01)

$$\text{EROI} = \text{Energy}_{\text{out}} / \text{Energy}_{\text{in}} \quad (\text{Eq. 01})$$

Onde:

$\text{Energy}_{\text{out}}$: energia líquida associada à fonte energética;

$\text{Energy}_{\text{in}}$: energia consumida para o processamento dessa mesma fonte

Tendo em vista os resultados descritos na Tabela 1, o processamento de óleo diesel praticado no Brasil projeta um valor de $\text{EROI}_{\text{BR}} = 0,83$. A fim de verificar a expressividade desse resultado, procederam-se estimativas do mesmo índice para situações metodologicamente homólogas, nas quais se produz diesel na Europa Ocidental – que exclui os países componentes da Comunidade dos Estados Independentes (CEI) –, e nos Estados Unidos (Fredriksson et al. 2000). Como resultados dessas iniciativas foram obtidos, respectivamente, $\text{EROI}_{\text{EO}} = 0,81$ e $\text{EROI}_{\text{US}} = 0,77$.

A proximidade entre $EROI_{BR}$ e $EROI_{EO}$ pode ser imputada a dois fatores: (i) semelhanças tecnológicas entre os arranjos processuais usados em cada caso para produção do combustível; e, (ii) procedência do petróleo, que nas duas é majoritariamente de origem offshore (Scottish Enterprise, 2007; USEIA, 2014). O $EROI_{US}$ é cerca de 9,2% menor do que o $EROI_{BR}$. Tal diferença se justifica em virtude de a extração onshore de petróleo, predominante nos Estados Unidos, predispor elevado consumo energético para ser realizada (USEIA, 2014). Registre-se por fim que em todos os casos analisados o retorno energético associado à produção de óleo diesel é desfavorável – dado que, $0 < EROI < 1,0$.

Em termos de Perfil Ambiental, a Tabela 2 apresenta os resultados para cada uma das categorias definidas para efeitos do estudo.

Tabela 23. Perfil Ambiental para a produção de 1MJ de energia

Categoria de impacto	Unidades	Total
CC	Kg CO ₂ eq	4,97E-03
TA	Kg SO ₂ eq	7,43E-05
POF	Kg NMVOC	1,42E-04
PMF	Kg PM10 eq	1,76E-05

Impactos relativos a CC estão associados a emissões de dióxido de carbono e metano, ambos de origem fóssil para o ar (CO_{2,fóssil} e CH_{4,fóssil}) que juntos representaram 92% do total de aportes para a categoria. Essas perdas decorrem principalmente da queima de gás natural (1,34 g/FR) na produção de óleo cru na Nigéria. Para TA os principais precursores são emissões de óxidos de enxofre e nitrogênio (SO_x e NO_x) cujas participações perfazem 76 e 16% do acumulado para aquele efeito. Quanto às emissões de SO, estas são resultado das operações de refino feitas na REPLAN (25,9 mg/FR). Por outro lado, emissões na forma de NO_x resultaram da queima de gás natural na produção de óleo cru na Nigéria (6,64 mg/FR).

Em termos de POF, os principais impactos ocorrem na forma de compostos orgânicos voláteis de cadeia longo (NMVOC), NO_x e dióxido de carbono de origem fóssil (CO_{fóssil}) que juntos montam 95% dos impactos para o caso presente. A produção de diesel na REPLAN foi responsável por perdas de NMVOC e CO_{fóssil}, emitindo respectivamente 224 mg/FR e 147 mg/FR.

Para PMF, foram identificados como principais precursores do impacto emissões de SO_x e NO_x que representaram 91% do total de impacto para a categoria. O processamento que ocorre na REPLAN voltou a anotar contribuições expressivas, agora em termos de SO (25,9 mg/FR), enquanto a queima de gás natural na extração de óleo cru na Nigéria remetem aos efeitos derivados do NO_x.

Conclusões

Os resultados da avaliação do óleo diesel comercializado no Brasil mostraram que, em termos de *Primary Energy Demand – PED*, a principal demanda ocorre na forma de recursos fósseis não-renováveis (NRF), categoria na qual os consumos de petróleo e gás natural foram os principais contribuintes. Por outro lado, os achados obtidos pelo estudo em termos do Perfil Ambiental associado a emissões sugerem ser o tratamento prévio de petróleo importado desde a Nigéria e a produção de diesel que ocorre na REPLAN os estágios mais impactantes da referida cadeia produtiva. Essas atividades convertem-se, portanto, em focos de implementação de ações de melhoria de desempenho ambiental do processamento em análise.



Referências Bibliográficas

ABNT. NBR ISO 14044:2009: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações: ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas: 46 p. 2009.

ANP – Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - 2012. Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – Rio de Janeiro: ANP. ISSN 1983-5884.

_____. ANP. Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - 2013. Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – Rio de Janeiro: ANP. ISSN 1983-5884

_____. ANP. Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - 2014. Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – Rio de Janeiro: ANP. ISSN 1983-5884

CAMPOS, A. L., MATTEI, L. (2013) A (In) sustentabilidade da matriz energética brasileira. Revista Brasileira de Energia. V. 19, N. 2, pp. 9-36.

DRUMM, F. C. et al. (2014) Poluição atmosférica proveniente da queima de combustíveis derivados do petróleo em veículos automotores. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental – REGET. V. 18, N. 1, pp. 66-78.

DEVOLD, H. (2013) Production Oil and gas production handbook: An introduction to oil and gas production, transport, refining and petrochemical industry. ABB. p. 5-8.

Empresa de Pesquisa Energética – EPE. Balanço Energético Nacional 2012 (Ano Base 2011) Relatório Final. Disponível em: <http://ben.epe.gov.br/>. Acesso: 09.02.2015.

_____. EPE. Balanço Energético Nacional 2013 (Ano Base 2012) Relatório Final. Disponível em: <http://ben.epe.gov.br/>. Acesso: 09.02.2016.

_____. EPE. Balanço Energético Nacional 2014 (Ano Base 2013) Relatório Final. Disponível em: <http://ben.epe.gov.br/>. Acesso: 09.02.2016.

_____. EPE. Balanço Energético Nacional 2015 (Ano Base 2014) Relatório Final. Disponível em: <http://ben.epe.gov.br/>. Acesso: 27.01.2016.

LIMA, E. M. et al. (2012) Transporte e logística do petróleo. Cadernos de Graduação – Ciências Exatas e Tecnológicas. V. 1, N. 15, pp. 87-93.

LICKS, L. A., PIRES, M. (2010) Metodologia para o cálculo de emissões de carbono e da eficiência na geração de energia pela combustão do carvão fóssil no Brasil. Ver. Esc. Minas. V. 63, N. 2, pp. 331-337.

MURPHY, D. J. e HALL, C. A. S. (2010). Year in review EROI or energy return on (energy) invested. Annals of the New York Academy of Sciences 1185: 102–118.doi:10.1111/j.1749-6632.2009.05282

PERES, L. A. P. et al. Impactos das emissões atmosféricas provocadas por geradores diesel em estudos de fontes de energia no meio rural. Em: Proceedings of the 3º Encontro de Energia no Meio Rural, 2000, Campinas (SP, Brasil). [online]. 2003. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC00000002200000200007&lng=en&nrm=iso>

Petrobras Transporte S.A – Transpetro. Áreas de Negócios. Disponível em: http://www.transpetro.com.br/pt_br/areas-de-negocios/terminais-e-oleodutos.html

Scottish Enterprise (2007) Spends & Trends 2008-2017. Key Global Oil & Gas Markets Europe. Disponível em: <http://www.scottish-enterprise.com>

U.S. Energy Information Administration. Total Petroleum and Other Liquids Production, 2014.

Disponível em: https://www.eia.gov/forecasts/steo/report/global_oil.cfm