

BENCHMARKS DE EFICIÊNCIA NO PROCESSAMENTO DE PETRÓLEO COM PRODUTOS QUÍMICOS

Almiro Soares Barreto

UFF – Universidade Federal Fluminense
ab90807@gmail.com

João Carlos Correa Soares de Mello

UFF – Universidade Federal Fluminense
jcsmello@produção.uff.br

Resumo

Este artigo tem como objetivo identificar as unidades com maior eficiência produtiva na utilização de produtos químicos para a separação óleo, água e gás numa planta de processamento primário de petróleo. Foi avaliada a eficiência de trinta unidades estacionárias de produção operadas por uma concessionária de petróleo na Bacia de Campos, no ano de 2009. A eficiência foi medida com a metodologia de Análise de Envoltória de Dados (*DEA – Data Envelopment Analysis*) através de seu modelo de retornos constantes de escala (*DEA-CCR*), com o auxílio do software denominado SIAD. Os resultados analisados permitiram identificar as unidades de produção que foram referenciais de eficiência na utilização de desemulsificantes para o tratamento de petróleo bruto.

Palavras-chave: Eficiência. Petróleo. *DEA*.

Abstract

This study aims to identify the best manufacturing plants by the criterion of efficiency in the use of chemicals to separate oil, water and gas in a primary processing plant oil. Thus, we evaluated the efficiency of thirty stationary production units operated by a concessionaire of oil in the Campos Basin, in 2009. The efficiency was measured with the methodology of Data Envelopment Analysis (DEA) through its classical model DEA-CCR, with the help of software called SIAD. The results were identified by analysis units which are references for use efficiency desemulsificantes for the treatment of crude oil.

Keywords: *Efficiency. Oil. DEA.*

1. INTRODUÇÃO

O petróleo é um mineral de origem fóssil composto de hidrocarbonetos complexos, podendo ser encontrado na forma sólida, líquida ou gasosa, a depender de sua composição, pressão e temperatura.

Ele fica alojado nos poros de rochas chamadas “rochas-reservatórios”, formadas no fundo de antigos oceanos. Por isso o petróleo é, geralmente, encontrado em bacias sedimentares. Em decorrência da migração do petróleo nessas rochas-reservatórios, que contem água, até encontrarem uma rocha selante, vão se formando os tres fluidos principais - óleo, gás e água - presentes nos campos de produção. O gás pode estar dissolvido no óleo, ou se apresentar como uma camada independente entre o óleo e a rocha selante (THOMAS, 2001).

A produção de um poço de petróleo é consubstanciada na elevação dos fluídos até a superfície e na sua separação. O óleo e o gás são os fluídos buscados nesta atividade. A obtenção desses fluídos se dá através das atividades de Exploração e Produção (E&P).

Dentre as atividades de Produção, destaca-se o tratamento inicial do petróleo, com produtos químicos, para a separação dos fluídos e no seu enquadramento em parâmetros físico-químicos de qualidade exigidos pela cadeia produtiva e pelos órgãos ambientais.

O presente artigo se concentrou nessa fase inicial deste tratamento denominada Processamento Primário de Petróleo (PPP), buscando avaliar a eficiência desses processos industriais sob o ponto de vista do consumo de produtos químicos desemulsificantes, ao tempo em que busca as unidades produtivas referenciais de eficiência neste processamento.

Para isso, foi avaliada a eficiência das unidades estacionárias de produção (UEPs), agrupadas em doze conjuntos de produção, operadas por uma concessionária de petróleo na Bacia de Campos, no ano de 2009.

A eficiência do processo foi medida com a metodologia de Análise de Envoltória de Dados (DEA – Data Envelopment Analysis) através de seu modelo clássico *DEA-CCR*, com o auxílio do software denominado SIAD (ANGULO MEZA *ET AL.*, 2005).

Os resultados analisados permitiram identificar as unidades de produção que foram referenciais de eficiência na utilização de desemulsificantes em 2009.

O artigo encontra-se organizado em cinco itens complementados pelas referências bibliográficas. Este item inicial introduz o problema de pesquisa e os objetivos do estudo.

No segundo item encontra-se o referencial teórico acerca da Análise de Envoltória de Dados (*Data Envelopment Analysis – DEA*), que foi utilizada para alcançar os objetivos do estudo. Neste tópico estão os conceitos de *DEA*; o modelo clássico *DEA-CCR*; a abordagem da Fronteira Invertida para aumentar a discriminação do resultado de eficiência, finalizando com alguns problemas encontrados na modelagem *DEA*.

No item tres é descrita a metodologia da pesquisa justificando a modelagem do processo com a descrição do processo industrial de separação de óleo, água e gás, bem como os procedimentos de coleta e tratamento dos dados, concluindo com a escolha do modelo *DEA* adequado.

No quarto item se analisam os resultados de eficiência e os *benchmarks* sugeridos pela metodologia. Finalizando, o item cinco traz as conclusões e recomendações do artigo.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. ANÁLISE DE ENVOLTÓRIA DE DADOS

A Análise de Envoltória de Dados é uma ferramenta de programação matemática multivariáveis para solução de modelos quantitativos dentro da Pesquisa Operacional (MORABITO E PUREZA, 2010).

Esta metodologia foi criada inicialmente para determinar a eficiência de atividades sem fins lucrativos participantes de programas públicos de educação (CHARNES ET AL, 1978). Assim, unidades produtivas podem ter suas eficiências medidas e comparadas entre si, através

desta ferramenta, não se referenciando apenas em aspectos financeiros desta atividade.

Unidades produtivas semelhantes podem ter resultados de produtividades distintos entre si, quando utilizam os mesmos tipos de recursos para obter os mesmos tipos de produtos. Estas diferenças são decorrentes das decisões tomadas por seus gestores no emprego de todos os recursos. Essas unidades produtivas são denominadas Unidades Tomadoras de Decisão (*Decision Making Units – DMU*).

A comparação entre as diversas produtividades se aproxima do conceito de eficiência das unidades produtivas, ou seja, o que faz determinada unidade produzir mais que outra, utilizando a mesma quantidade de recursos, ou consumir menos que outra para obter a mesma quantidade de produtos (SOARES DE MELLO *ET AL.*, 2005).

O conceito de eficiência vem dessa relativização entre o que é (produzido, ou consumido), com relação ao que poderia ter sido (produzido, ou consumido, respectivamente). A eficiência, portanto, é uma medida relativa que está intimamente ligada à comparação de uma unidade produtiva com outra, ou consigo mesma, a partir dos dados observados (ANGULO MEZA, 1998).

DEA é uma metodologia que permite avaliar a eficiência de processos com múltiplos recursos e múltiplos produtos.

2.2. MODELOS CLÁSSICOS EM *DEA*

Os modelos conhecidos como clássicos em *DEA* são aqueles propostos inicialmente por Charnes, Cooper e Rhodes – o modelo *CCR* (CHARNES *ET AL.*, 1978), que considera retornos constantes de escala (*Constant Returns to Scale - CRS*); e posteriormente, o modelo complementar desenvolvido por Banker, Charnes e Cooper – o modelo *BCC* (BANKER *ET AL.*, 1984), que considera retornos variáveis de escala (*Variable Returns to Scale - VRS*). Ambos podem ser orientados a *inputs* ou a *outputs*, conforme a eficiência seja buscada pela redução de insumos, ou, pela maximização de produtos, respectivamente. Neste artigo foi demonstrado apenas o modelo *CCR* orientado a *input*.

2.2.1. Modelo *CCR* orientado a *input*

Retomando-se o conceito de produtividade como sendo a razão entre a produção (*output*) e o recurso (*input*), e fazendo-se uma ampliação do conceito para mais de um processo (*DMU*) com múltiplos produtos e recursos, obtém-se:

Um conjunto de n *DMUs*, com cada *DMU* j ($j=1, \dots, n$) usando “ m ” *inputs* x_{ij} ($i = 1, \dots, m$) e produzindo “ s ” *outputs* y_{rj} ($r = 1, \dots, s$). Se para cada *output* y_r e para cada *input* x_i forem associados pesos ou multiplicadores de ponderação u_r e v_i , respectivamente, resultará na expressão (1). Quando se conhecem os multiplicadores u_r e v_i obtém-se o valor da eficiência da *DMU* j (*Effj*) (FARRELL, 1957).

$$Eff_j = \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}} \quad (1)$$

O modelo pressupõe que cada *DMU* j determinará os pesos (v_i ou u_r) para cada variável (x_i ou y_r), procurando favorecer a sua própria eficiência (*Max Effj*). Entretanto o modelo impõe uma restrição: esses pesos escolhidos pela *DMU* j ao serem aplicados às outras k *DMUs* não pode resultar em valores maiores que 1 para *Effj* (2).

$$Max Eff_j = \left(\frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}} \right) \quad (2)$$

Sujeito a

$$\left(\frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rk}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ik}} \right) \leq 1, \quad \forall k$$

$$v_i, u_r \geq 0, \quad \forall i, r$$

Assim, cada *DMU* pode ter um conjunto de pesos diferente. Através destes pesos

obtem-se um índice de eficiência relativo, isto é, baseado na comparação da utilização de recursos, e da produção das outras unidades do artigo.

Este modelo, que é de programação fracionária, pode ser modificado para um modelo de programação linear, ao se igualar o denominador à unidade, e se impor algumas restrições como demonstrado em (3). Neste modelo, as variáveis de decisão são os pesos v_i e u_r (SOARES DE MELLO *ET AL.*, 2005)

$$\text{Max } \text{Eff}_j = \sum_{r=1}^s u_r y_{rj} \quad (3)$$

Sujeito a

$$\sum_{i=1}^m v_i x_{ij} = 1$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rk} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ik} \leq 0, \quad \forall k (k=1, \dots, n)$$

$$v_i, u_r \geq 0, \quad \forall i, r$$

Neste modelo, uma *DMU* pode assumir mais de um conjunto de pesos (multiplicadores) para os vértices da fronteira. Ele é chamado de Modelo dos Multiplicadores com orientação a *inputs*, pois a eficiência é obtida com a redução dos recursos. Este foi o modelo usado neste artigo.

2.3. FRONTEIRA INVERTIDA

Os modelos clássicos de *DEA* são benevolentes na avaliação das *DMUs* e provoca um grande número de unidades 100% eficientes, reduzindo a discriminação entre elas.

Cada *DMU*, ao escolher seus pesos de modo que sua eficiência seja a melhor possível em relação às demais, pode colocar um grande número de *DMUs* na fronteira da eficiência. Essa benevolência do modelo *DEA* na avaliação das *DMUs* provoca um grande número de unidades 100% eficientes, reduzindo a discriminação entre elas (PEREIRA *ET AL.*, 2012).

Dentre os vários métodos para melhorar a discriminação em *DEA*, a Fronteira Invertida, introduzida por Yamada *et al.* (1994) e utilizada por Entani *et al.* (2002) e Lins *et al.* (2005), é baseada na inversão de *inputs* e *outputs* produzindo uma fronteira de ineficiência, ou melhor, uma visão oposta da fronteira clássica (LETA *ET AL.*, 2005).

A fronteira invertida, cujo objetivo é aumentar a discriminação, foi utilizada por Pimenta *et al.* (2004), Angulo Meza *et al.* (2005), Soares de Mello *et al.* (2008), e para tal é construído um índice de eficiência composta (*Effc*). Ele é definido como sendo a média aritmética entre a eficiência em relação à fronteira *DEA* convencional e o complemento da eficiência em relação à fronteira invertida (4).

$$\text{Eff}_c = \frac{[\text{Eff}_p + (1 - \text{Eff}_i)]}{2}, \quad \text{onde:} \quad (4)$$

Effc – Eficiência composta

Effp – Eficiência padrão

Effi – Eficiência invertida

2.4. FATORES CRÍTICOS NA MODELAGEM *DEA*

DEA é sensível ao número de *inputs* e *outputs* utilizados na modelagem do problema, bem como à quantidade de *DMUs*. Ao aumentar o tamanho da amostra existe uma tendência de se reduzir a média das pontuações de eficiência da amostra, porque um maior número de *DMUs* permite encontrar um maior número de *DMUs* na fronteira da eficiência. Por outro lado, quando o número de *DMUs* é pequeno em relação à soma do número de *inputs* e *outputs*, a média de eficiência da amostra tende a aumentar. Nunamaker (1985) recomenda que o número de *DMUs* observadas da amostra seja pelo menos três vezes maior que a soma dos *inputs* e dos *outputs*. Essa limitação foi contornada com a composição de doze *DMUs* para tres variáveis utilizadas.

Modelos *DEA* são extremamente benevolentes com as *DMUs* avaliadas. Estas podem ser eficientes ao considerar apenas algumas das variáveis, aquelas que lhes são mais favoráveis. Essa característica de benevolência dos modelos *DEA* faz com que ocorram empates para as unidades 100% eficientes, o que provoca uma baixa discriminação entre as *DMUs*. Essa limitação foi tratada com a abordagem da Fronteira Invertida através do software SIAD, criando uma eficiência-composta entre a eficiência padrão e a eficiência invertida.

3. METODOLOGIA

3.1. MODELAGEM

Uma das vantagens da modelagem *DEA* é que a fronteira eficiente é uma envoltória da eficiência das *DMUs* observadas, não sendo necessário assumir hipóteses sobre a função produção, ou seja, conhecer as relações analíticas de transformação dos *inputs* em *outputs* [a função $F(x)$]. Dessa forma, foi suficiente um conhecimento apenas operacional desses processos para então se escolher o modelo clássico *DEA* adequado, definir suas entradas e saídas, bem como a composição das *DMUs*.

O modelo idealizado inicialmente possuía seis *inputs* e tres *outputs* para avaliar a eficiência de trinta e uma UEPs. Esse modelo foi modificado para representar as correntes de produção em que estão compostas essas UEPs. Também, para atender a proporção *DMUs*, *inputs* e *outputs* sugerida por Nunamaker (1985). Assim, um modelo com dois *inputs* e um *output* foi proposto para a análise de treze *DMUs*.

3.1.1. Processamento Primário de Petróleo (PPP)

O processo industrial de produção de petróleo se desenvolve nas Unidades Estacionárias de Produção (UEPs). No caso dos campos de produção cujos poços estão no mar, são unidades marítimas conhecidas como plataformas.

Uma planta de Processamento Primário de Petróleo (PPP), típica de unidades marítimas, basicamente se divide em separadores de produção, tratadores de óleo, tratadores e compressores de gás e tratamento de água.

Um dos principais equipamentos da planta de PPP é o separador de produção. Os vasos separadores podem ser bifásicos ou trifásicos, horizontais ou verticais, em série ou paralelo.

A Figura 01 mostra um separador trifásico onde o fluido, ao entrar, bate no anteparo, causando uma mudança brusca de direção e velocidade, permitindo que o gás se desprenda da fase líquida. A seção coletora do vaso permite que o óleo e a emulsão formem uma camada, enquanto que a água livre se deposite no fundo do vaso. O segundo anteparo mantém o nível de óleo por transbordamento. Um indicador de nível envia um sinal à válvula de controle do nível de água, extraindo a quantidade necessária para manter a interface óleo/água na altura projetada. O nível do óleo também é controlado por uma válvula controladora, que o direciona para a corrente de óleo. O gás flui horizontalmente e passa por um extrator de névoa, sendo extraído por uma válvula que mantém a pressão do vaso constante (SILVA, 2004).

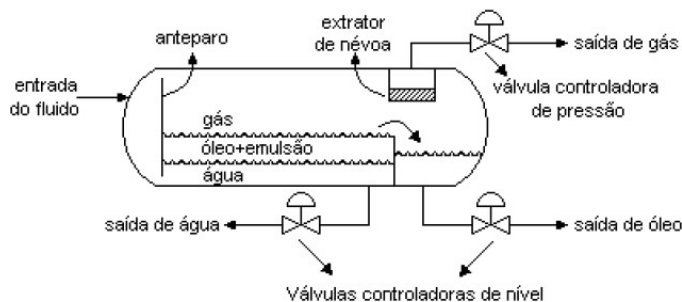


Figura 01 - Representação esquemática de um separador trifásico (SILVA 2004, pp.22)

É importante destacar a emulsão e o papel dos produtos químicos nesta fase do

processo. A emulsão é um sistema disperso, formado por dois líquidos imiscíveis, um agente emulsificante e agitação suficiente para transformar o sistema numa fase contínua. Quando o óleo é a fase dispersa, a emulsão é chamada de “Emulsão Óleo em Água” (O/A), e, quando o meio disperso é a água, a emulsão é chamada de “Emulsão de Água em Óleo” (A/O). (SALAGER, 1956).

O óleo proveniente de todos os poços é misturado no *manifold* de produção e encaminhado para o processamento primário. Antes de ser enviado aos separadores trifásicos, o petróleo recebe a injeção de desemulsificante. Normalmente, ele é aquecido em trocadores de calor para facilitar a separação água/óleo. Este equipamento separa o gás e a maior parte da água produzida e do óleo formando tres correntes de produção. O desemulsificante age reduzindo a película interfacial e facilitando a coalescência das gotas de óleo, sendo um dos principais produtos químicos usados no processo industrial.

O modelo do processo industrial de utilização de produtos químicos para processamento de petróleo nas UEPs é mostrado na Figura 2. Ela representa a planta de produção de petróleo sob o enfoque da utilização do desemulsificante para auxiliar a separação óleo/água presente no petróleo bruto. Outros produtos químicos, aplicados na planta de processamento, não foram considerados porque são auxiliares de outras funções na planta, que não é a separação inicial de óleo, água e gás.

Na Figura 2 estão mostradas as variáveis de entrada (*inputs*) e de saída (*outputs*) do modelo do processo industrial de utilização de produtos químicos das UEPs, ou seja, (e_0) e (e_1), como *inputs* na planta de processamento de petróleo bruto, cujo *output* é (s_1).

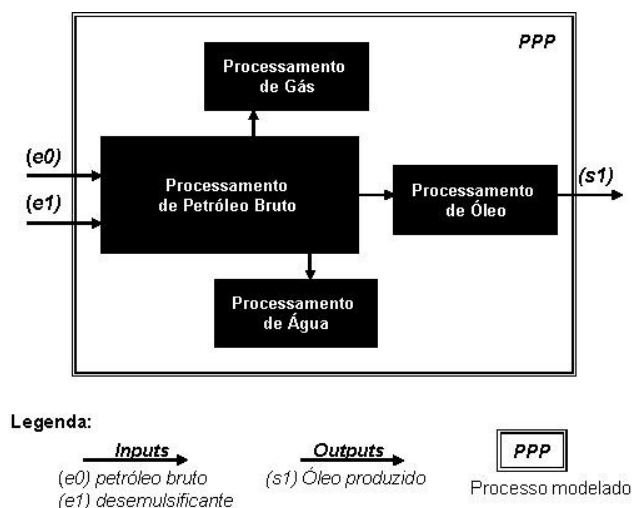


Figura 2 - Modelo do processo industrial.

3.2. COLETA E TRATAMENTO DOS DADOS

Os dados foram coletados em relatórios de acompanhamento de custo da produção da Empresa de Petróleo. Esses relatórios são emitidos mensalmente na forma de planilha eletrônica e contém os dados necessários ao acompanhamento do desempenho dos produtos químicos no tratamento dos fluídos do petróleo (óleo, gás e água). A Engenharia de Produção dessa empresa obtém as informações para esse acompanhamento através de sistema de informações onde os operadores das UEPs registram todos os parâmetros da produção.

Como esses relatórios são emitidos para cada UEP, obteve-se 31 tabelas para cada um dos 12 meses do ano de 2009, o que totalizou 372 tabelas de onde foram extraídos os valores das variáveis do modelo.

Objetivando manter a integridade dos dados e ao mesmo tempo proteger o sigilo da informação, a identificação das correntes de produção e das respectivas UEPs foram renomeadas. Também, as unidades de medidas foram omitidas, o que não prejudica os cálculos, pois *DEA* é

invariante com relação à escala (LINS e ANGULO MEZA, 2000).

Analisando os dados coletados verificou-se que a *DMU j* estava com valor nulo na variável de saída (óleo produzido). A explicação para o fato é que esta UEP é um *FSO (Floating Storage e Offloading)* apenas processando o óleo produzido por outras UEPs de sua corrente de produção. Consequentemente, também não consome diversos produtos químicos, sendo essas variáveis de entrada também nulas. Como a metodologia *DEA* foi usada para avaliação da eficiência das *DMUs* na utilização de produtos químicos para produção de petróleo, a *DMU j* foi excluída da modelagem.

A Tabela 1 mostra o resultado da preparação feita nos dados coletados cujos valores foram usados pelo *software SIAD* para avaliação da eficiência das *DMUs*.

Tabela 1 - Dados da modelagem.

| Corrente | DMU | Inputs | | Outputs |
|----------|------------------------------|------------|-----------|-----------|
| | UEP | e0 | e1 | s1 |
| a | 1, 2 | 9.611.011 | 264.170 | 4.847.990 |
| b | 3 | 280.252 | 37.439 | 189.421 |
| c | 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 | 32.422.205 | 536.078 | 5.159.255 |
| d | 13, 14, 15, 16, 17 | 13.531.969 | 440.674 | 6.128.766 |
| e | 18, 19 | 6.929.496 | 499.037 | 1.394.654 |
| f | 20 | 3.356.945 | 125.006 | 995.947 |
| g | 21 | 3.590.572 | 189.913 | 2.454.389 |
| h | 22 | 4.964.869 | 374.860 | 2.992.039 |
| i | 23, 26, 25, 26 | 11.411.275 | 432.570 | 5.382.207 |
| k | 28, 29 | 6.482.589 | 769.767 | 2.981.620 |
| l | 30 | 7.373.802 | 277.540 | 3.610.014 |
| m | 31 | 9.385.997 | 1.112.084 | 4.148.424 |

Fonte: Empresa de Petróleo

3.3. ESCOLHA DO MODELO *DEA*

Uma análise do processo e das variáveis do modelo aponta para o modelo *DEA-CCR*, orientado a *inputs*, considerando-se as seguintes características:

- O óleo produzido (s1) guarda certa proporcionalidade com os insumos petróleo bruto (e0) e desemulsificante (e1), reforçando o conceito do modelo *CCR* (retornos constante de escala);
- Os insumos podem ser otimizados em função do volume produzido. Ou seja, na injeção de desemulsificantes (e1) procura-se a menor dosagem possível para separar o óleo (s1) da água na produção bruta de petróleo (e0). Isso reforça a opção por orientação a *inputs* (um problema de programação linear buscando mínimo da função objetivo);

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Os dados das variáveis de entrada e saída, *inputs* e *outputs* das *DMUs* da modelagem, foram aplicados no modelo *DEA-CCR*, escolhendo-se a orientação a *input*. O *SIAD* processou os dados das *DMUs* fornecendo informações de eficiência, pesos das variáveis, radiais, folgas, alvos e *benchmarks* de eficiência. Neste artigo apenas os resultados de eficiência e *benchmarks* foram analisados.

4.1. RESULTADOS DE *BENCHMARK*

Os resultados de *benchmarks* são soluções apontadas pelo modelo matemático para o processo modelado, indicando quais *DMUs* foram referenciais na Eficiência Padrão calculadas pelo *SIAD*. O uso da Fronteira Invertida serve apenas para uma melhor discriminação dos resultados permitindo desempatar *DMUs* com 100% na Eficiência Padrão.

Os dados das variáveis de entrada e saída, *inputs* e *outputs* das *DMUs* da modelagem, foram aplicados no modelo *DEA-CCR* escolhendo-se a orientação a *inputs*.

No Quadro 1 têm-se as eficiências Padrão, Invertida, Composta e Composta Normalizada calculadas pelo *SIAD*. A eficiência calculada pelo algoritmo Simplex é a Eficiência

Padrão naquele quadro.

Quadro 1 - Resultados de eficiência (SIAD)

| Resultados utilizando o modelo CCR, orientação input | | | | |
|--|----------|-----------|----------|-----------|
| Eficiências | | | | |
| DMU | Padrão | Invertida | Composta | Composta* |
| a | 1 | 0,331955 | 0,834023 | 0,965966 |
| b | 0,98878 | 1 | 0,49439 | 0,572603 |
| c | 1 | 1 | 0,5 | 0,579101 |
| d | 0,838357 | 0,378225 | 0,730066 | 0,845563 |
| e | 0,294432 | 1 | 0,147216 | 0,170506 |
| f | 0,517605 | 0,589353 | 0,464126 | 0,537551 |
| g | 1 | 0,273185 | 0,863408 | 1 |
| h | 0,881616 | 0,363936 | 0,75884 | 0,87889 |
| i | 0,816153 | 0,371794 | 0,72218 | 0,83643 |
| k | 0,672859 | 0,969714 | 0,351573 | 0,407192 |
| l | 0,849941 | 0,357771 | 0,746085 | 0,864116 |
| m | 0,646581 | 1 | 0,323291 | 0,374436 |

*Eficiência normalizada

Pelo resultado de Eficiência Padrão, o algoritmo Simplex, que possui baixa discriminação, aponta tres *DMUs* como eficientes (a, c e g). Essa característica da benevolência de *DEA* com as *DMUs* que possuem os menores *inputs*, ou os maiores *outputs*, foi abordada no referencial teórico com a implementação da Fronteira Invertida para identificar as *DMUs* menos eficientes e então calcular uma Eficiência Composta entre a Eficiência Padrão e a Eficiência Invertida.

O SIAD calculou a Eficiência Composta mostrada no Quadro 1, que aponta a *DMU g* como a mais eficiente (maior valor de Eficiência Composta).

A partir da Eficiência Composta normalizada, podem-se classificar as *DMUs* em ordem decrescente resultando no *ranking* do Quadro 2.

A *DMU g* apesar de não ter uma produção de óleo das mais significativas (9^a. posição) tem um baixo consumo de desmulsificante (3^o. menor consumo).

Esses valores conferem à *DMU g* um resultado dos mais altos na eficiência padrão, bem como uma dos resultados mais baixos de ineficiência na fronteira invertida. Caso semelhante da *DMU a* que nesta combinação ficou logo abaixo da *DMU g*.

Caso interessante é a da *DMU c* que, por possuir uma das maiores produções de óleo (3^o. maior *output*), lhe garantiu um bom resultado na eficiência padrão. Entretanto sua ineficiência, calculada pela fronteira invertida também é das maiores, pois seu consumo de desmulsificante (3^o. maior consumo), resultou numa alta ineficiência. Portanto, a eficiência composta rebaixou a *DMU c* para as últimas colocações no *ranking* de Eficiência Composta.

Quadro 2 - Classificação por Eficiência Composta (SIAD).

| Resultados utilizando o modelo CCR, orientação input (Ordem decrescente de Eficiência Composta*) Eficiências | | | | |
|--|----------|-----------|----------|-----------|
| DMU | Padrão | Invertida | Composta | Composta* |
| g | 1 | 0,273185 | 0,863408 | 1 |
| a | 1 | 0,331955 | 0,834023 | 0,965966 |
| h | 0,881616 | 0,363936 | 0,758840 | 0,878890 |
| l | 0,849941 | 0,357771 | 0,746085 | 0,864116 |
| d | 0,838357 | 0,378225 | 0,730066 | 0,845563 |
| i | 0,816153 | 0,371794 | 0,722180 | 0,836430 |
| c | 1 | 1 | 0,5 | 0,579101 |
| b | 0,988780 | 1 | 0,494390 | 0,572603 |
| f | 0,517605 | 0,589353 | 0,464126 | 0,537551 |
| k | 0,672859 | 0,969714 | 0,351573 | 0,407192 |
| m | 0,646581 | 1 | 0,323291 | 0,374436 |
| e | 0,294432 | 1 | 0,147216 | 0,170506 |

*Eficiência normalizada

Com relação aos *Benchmarks* de eficiência, no Quadro 3 está copiada uma tabela feita pelo SIAD onde são mostradas as *DMUs* a, c, g que alcançaram a fronteira Eficiência Padrão na 1ª linha, e todas as *DMUs* na 1ª coluna formando uma matriz.

As *DMUs* a, c, e g, por estarem na fronteira da eficiência, não são referenciais entre si (resultados 0). A *DMU* a é *benchmark* para as *DMUs* d, f, i, l. A *DMU* c é *benchmark* apenas para si mesma. A *DMU* g é *benchmark* para todas as *DMUs* que não alcançaram a fronteira padrão, *DMUs* b, d, e, f, h, i, k, l, m.

Para as *DMUs* que não foram *benchmark* de eficiência, o SIAD indica para cada variável qual o alvo a ser atingido por cada variável para se tornar eficiente. Estes resultados não foram analisados nesse artigo.

Quadro 3 - Resultados de *benchmarks* (SIAD).

| Benchmarks | | | | |
|------------|------------|---|------------|--|
| DMU | a | c | g | |
| a | 1 | 0 | 0 | |
| b | 0 | 0 | 0,07717644 | |
| c | 0 | 1 | 0 | |
| d | 0,94439355 | 0 | 0,63166658 | |
| e | 0 | 0 | 0,56822859 | |
| f | 0,11139518 | 0 | 0,18575062 | |
| g | 0 | 0 | 1 | |
| h | 0 | 0 | 1,21905656 | |
| i | 0,57155093 | 0 | 1,06394455 | |
| k | 0 | 0 | 1,21481151 | |
| l | 0,39151137 | 0 | 0,69751405 | |
| m | 0 | 0 | 1,6902064 | |

5. CONCLUSÕES

A pesquisa permitiu indicar uma corrente de produção (*DMU* g) como a mais eficiente na utilização de desemulsificante para a separação água/óleo no processamento primário de petróleo. Para as outras *DMUs* apontadas (a e c), a *DMU* c alcançou a fronteira da eficiência por possuir a maior produção bruta de petróleo, ou seja, por uma limitação da metodologia *DEA* que

coloca na fronteira as *DMUs* com os maiores *outputs*. Portanto, deve ser desconsiderada mesmo porque foi referencial apenas para si mesma. A *DMU* a foi referencial para outras quatro *DMUs* (d, f i, l) e deve ser considerada como resultado do estudo juntamente com a *DMU* g.

A *DMU* g é formada por uma única UEP, a qual possui a nona posição no volume de óleo produzido (s1) e a décima colocação no consumo de desmulsificante (e1), o que lhe conferiu a melhor eficiência composta dentre as *DMUs* avaliadas.

Essa *DMU* foi referencial para todas as demais *DMUs* que não alcançaram a fronteira padrão. O SIAD indicou os valores que as variáveis das demais *DMUs* deveriam alcançar para se posicionar na fronteira da eficiência padrão, mas esses resultados não foram analisados nesse artigo. Vale ressaltar que a UEP em questão tem uma planta de produção mais recente que as demais UEPs das outras correntes de produção, o que pode justificar sua menor ineficiência.

Outro aspecto, que não foi levado em consideração nesse artigo, foi a qualidade dos diversos desmulsificantes envolvidos no PPP. As UEPs utilizam desmulsificantes de diversos fornecedores e esse dado não foi computado como uma variável de decisão. Ademais, os campos de produção possuem características de petróleo bruto distintas, como por exemplo, grau de viscosidade (API), o que influencia sobremaneira a eficiência do tratamento.

Outros fatores poderiam ser citados para uma investigação futura, como “idade” das plantas de processamento, ou regularidade de produção dos poços, dentre outros. Essas variáveis poderiam compor um modelo mais preciso de avaliação, o que fica como sugestão para trabalhos futuros.

6. REFERÊNCIAS

ANGULO MEZA, Lídia. Data Envelopment Analysis na determinação da eficiência dos Programas de Pós-Graduação da COPPE/UFRJ. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1998.

ANGULO MEZA, L. *et al.* ISYDS - Integrated System for Decision Support (SIAD Sistema Integrado de Apoio a Decisão): A Software Package for Data Envelopment Analysis Model. *Pesquisa Operacional*, v.25, n.3, p.493-503. 2005.

BANKER, R. D.; CHARNES, A.; COOPER, W. W. Some models for estimating technical scale inefficiencies in data envelopment analysis. *Management Science* v.30, n.9, p.1078-1092. 1984.

CHARNES, A.; COOPER, W. W.; RHODES, E. Measuring the efficiency of decision-making units. *European Journal of Operational Research*, v.2, n.6, p.429-444. 1978.

ENTANI, T.; MAEDA, Y.; TANAKA, H. Dual models of interval *DEA* and its extension to interval data. *European Journal of Operational Research*, v.136, n.1, p.32-45. 2002.

FARRELL, M. J. The Measurement of Productive Efficiency. *Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General)*, v.120, n.3, p.253-290. 1957.

LETA, F. R. *et al.* Métodos de melhora de ordenação em *DEA* aplicados à avaliação estática de tornos mecânicos. *Investigação Operacional*, v.25, n.2, p.229-242. 2005.

LINS, M. P. E.; ANGULO MEZA, L. *Análise Envolvória de Dados e perspectivas de integração no ambiente de Apoio à Decisão*. Rio de Janeiro: Editora da COPPE/UFRJ. 2000

LINS, M. P. E.; NOVAES, L.; LEGEY, L. Real Estate Appraisal: A Double Perspective Data Envelopment Analysis Approach. *Annals of Operations Research*, v.138, n.1, p.79-96. 2005.

MORABITO NETO, R.; PUREZA, V. M. M. Modelagem e Simulação. In: Elsevier (Ed.). Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações. Rio de Janeiro: Campus, 2010. p.165-194.

NUNAMAKER, T. R. Using data envelopment analysis to measure the efficiency of non-profit organizations: A critical evaluation. *Managerial and Decision Economics*, v.6, n.1, p.50-58. 1985.

PEREIRA, E. R.; SILVEIRA, J. Q.; CHAVES, M. C. C.; SOARES DE MELLO, J. C. C. B. Eficiência de empresas aéreas: uma análise baseada no modelo de Li & Reeves. *Journal of Transport Literature*, v. 6, p. 105-123, 2012.

PIMENTA, H.; MACEDO, M.; MELLO, J. Decisão da Realização de Investimentos em Tecnologia da Informação Com Análise Envoltória de Dados. *Revista Produção Online*, v.4, n.2. 2004. Disponível em: <<http://producaoonline.org.br/index.php/rpo/article/view/311/411>>. Acesso em: 14 Jul. 2010.

SALAGER, J. L. Teoria de Emulsões e sua Aplicação na Indústria de Petróleo. Rio de Janeiro: CENPES, 1956

SILVA, Rosivânia da Paixão. Geração e Caracterização Reológica de Emulsões de Água em Óleo Pesado para Aplicação em Projeto de Separadores Gravitacionais. 2004. 107 p. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Petróleo). Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

SOARES DE MELLO, J. C. C. B. *et al.* Curso de Análise de Envoltória de Dados. Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. Gramado, 2005.

SOARES DE MELLO, J. C. C. B. *et al.* *DEA* Advanced Models for Geometric Evaluation of used Lathes. *WSEAS Transactions on Systems*, v.7, n.5, p.500-520. 2008.

THOMAS, J. E. Fundamentos de Engenharia de Petróleo. Editora Interciência Ltda. Rio de Janeiro. 2001.

YAMADA, Y.; MATUI, T.; SUGIYAMA, M. New analysis of efficiency based on *DEA*. *Journal of the Operations Research Society of Japan*, v.37, p.158-167. 1994.