



MODELAGEM DE PARÂMETROS OPERACIONAIS PARA SUPORTE À AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE PERFURAÇÃO DE POÇOS OFFSHORE

Felipe Schuwartz Borba Marques

fschuartz@id.uff.br

Universidade Federal Fluminense –
UFF, Niterói, Rio de Janeiro, Brasil

Luis Alberto Duncan Rangel

luiibr2000@yahoo.com.br

Universidade Federal Fluminense –
UFF, Niterói, Rio de Janeiro, Brasil

Gilson Brito Alves Lima

glima@id.uff.br

Universidade Federal Fluminense –
UFF, Niterói, Rio de Janeiro, Brasil

Luiz Octávio Gavião

gaviao@esg.br

Escola Superior de Guerra – ESG,
Rio de Janeiro, Rio de Janeiro,
Brasil

Hardy Leonardo da Cunha Pereira Pinto

hardy@petrobras.com.br

Petróleo Brasileiro S.A. –
Petrobras, Rio de Janeiro, Rio de
Janeiro, Brasil

Danilo Colombo

colombo.danilo@petrobras.com.br

Petróleo Brasileiro S.A. –
Petrobras, Rio de Janeiro, Rio de
Janeiro, Brasil

Claudio Benevenuto de C. Lima

clima@petrobras.com.br

Petróleo Brasileiro S.A. –
Petrobras, Rio de Janeiro, Rio de
Janeiro, Brasil

RESUMO

A exploração de petróleo é uma das principais atividades industriais do País, devido à variedade dos subprodutos e empresas envolvidas no setor. Para que seja possível extrair das bacias sedimentares tal produto, é necessário investimento de grande porte e alta tecnologia. As plataformas e serviços de perfuração estão entre as principais atividades que representam custos significativos para a execução do serviço de exploração. Para viabilizar o investimento e comercialização do barril do petróleo, essas atividades devem ser aprimoradas de maneira a atrair investidores a explorar campos de petróleo de forma cada vez mais eficiente e produtiva, contribuindo, assim, com a geração de riqueza e desenvolvimento da sociedade. Dentro deste cenário, o objetivo deste artigo foi a aplicação de modelagem de dados em um conjunto de parâmetros operacionais para suporte à avaliação de eficiência do processo de perfuração de poços offshore. Por se tratar de um processo que envolve variáveis distintas de entrada e saída, torna-se pertinente analisar poços em áreas homogêneas e identificar os principais parâmetros que permitam contribuir para o melhor desempenho no ganho de taxa em metros perfurados. Neste sentido, no aspecto da abordagem metodológica, o cálculo da eficiência foi avaliado, tomando como base os parâmetros pré-estabelecidos pela engenharia de perfuração, adotando-se, para a modelagem, o modelo clássico, orientado à saída, utilizado pela análise de envoltória de dados. Os resultados obtidos, a partir das variáveis e do modelo aplicado, permitiram uma percepção preliminar da eficiência do sistema de perfuração.



1. INTRODUÇÃO

A área denominada pré-sal possui grandes reservatórios de óleo leve, que se estendem por 800 km do litoral brasileiro (Jones et Chaves, 2015). Estima-se que essa área pode conter 176 bilhões de barris de petróleo, volume significativamente maior que as atuais reservas nacionais, que, em 2014, eram de 16,2 bilhões de barris. Essa perspectiva faz com que a competitividade dos projetos do pré-sal assumam outro patamar, com foco principal na redução do tempo de perfuração. Segundo Guedes (2016), já são mais de 170 poços perfurados em 10 anos.

Nesse aspecto, a maior operadora brasileira declarou a intenção de investir, aproximadamente, 74 bilhões de dólares durante o quinquênio 2017-2021, sendo 82% dirigidos à área de exploração e produção (Petrobras, 2017).

Dividida em diferentes blocos e campos de exploração, o pré-sal tornou-se uma importante reserva de recursos para o País, mesmo considerando alguns óbices, como a queda do preço do barril do petróleo e as questões político-econômicas que afetaram a extração do hidrocarboneto nos últimos anos. Uma das principais considerações é que o *break-even* dos projetos de exploração em águas ultra profundas no Brasil (pré-sal) está, em média, acima dos US\$ 60 por barril (Wood Mackenzie, 2016). Isto é, existiam alguns projetos de desenvolvimento de poços que eram considerados viáveis nas condições econômicas vigentes em 2014 (preço médio do barril em US\$ 101) e deixaram de ser no novo contexto de 2015 (preço médio do barril de US\$ 54).

Neste contexto, busca-se analisar a eficiência da etapa de perfuração. Segundo Amorim Junior (2008), o custo métrico é composto, entre outros fatores, do custo horário de sonda, expresso em dólares por hora (US\$/hora), do tempo de manobra (h) e do tempo de operação da broca (h).

A escolha dos parâmetros de entrada no sistema provoca diferentes resultados, quando se leva em consideração a taxa de perfuração como saída. Dessa forma, a pesquisa busca comparar e analisar a eficiência de poços relacionados a uma determinada área de perfuração, com o objetivo de evidenciar melhores desempenhos operacionais.

A eficiência do processo de perfuração dos poços de petróleo envolvidos nessa pesquisa foi obtida através do método de análise envoltória de dados (*data envelopment analysis - DEA*), com base no modelo clássico DEA-BCC. O método DEA foi inicialmente proposto por Charnes et al. (1978), considerando retornos constantes de escala, sendo designado DEA-CCR. Posteriormente, Banker et al. (1984) apresentaram um modelo para retornos variáveis de escala, sendo denominado DEA-BCC.

Os resultados analisados a partir do software SIAD permitiram identificar as unidades de perfuração consideradas referências de eficiência (Meza et al., 2005) na utilização de parâmetros de perfuração essenciais, como o peso sobre a broca e a rotação da coluna. Os cálculos foram efetuados com o objetivo de maximizar a taxa de penetração em um determinado trecho e profundidade da formação rochosa, que será mantida em sigilo para preservar os dados da empresa exploradora da região, bem como os conhecimentos retidos por ela.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O óleo proveniente do pré-sal possui um valor agregado superior ao óleo presente em outras regiões, devido às concentrações de hidrocarbonetos leves, denominado de grau API. Para Caldas et Amaral. (2015), essa característica é proveniente da profundidade das rochas do reservatório e da presença da camada de sal, que impediram o desenvolvimento de bactérias responsáveis pela degradação das frações voláteis do petróleo.

Acredita-se que apenas um terço dos hidrocarbonetos presentes no pré-sal já foram descobertos, ainda que já passados oito anos da produção do primeiro óleo na região. Por esse motivo, Pita (2014) ressalta que essa localidade é algumas vezes chamada de “Oceano Azul”, em referência ao livro *best-seller* “Estratégia do Oceano Azul”, que ensina como investir em mercados inexplorados.

A região do pré-sal representa uma nova fronteira exploratória para o Brasil. O desafio de produzir óleo e gás em águas ultraprofundas, abaixo da camada de sal, com espessura superior a 2000 metros, tornou necessário o desenvolvimento de pesquisa básica em parceria com universidades, institutos de pesquisa e empresas de base tecnológica (Carneiro, 2016). Em dezembro de 2013, a Petrobrás possuía 954 termos de cooperação tecnológica com 88 instituições de ciência e tecnologia brasileiras. Entre os participantes, destaca-se a Rede Galileu e os Núcleos Regionais de Competência.

Existem diversos desafios científicos, no que tange à compreensão do comportamento do poço, bem como a heterogeneidade das rochas e a melhor estratégia para a exploração de hidrocarbonetos. Além disso, existe também a necessidade de capacitação de mão de obra qualificada frente ao desenvolvimento de novas estratégias e maquinários na exploração e desenvolvimento de poços (Porto et al., 2013).

Antes de ser realizada a perfuração, especialistas, com experiência de campo na área em que o poço será desenvolvido, propõem parâmetros de referência, a partir de um



programa de perfuração. Na realização de uma perfuração de poço, as entradas desses valores são controladas pelo perfurador em superfície e estão relacionadas ao peso aplicado sobre broca e à velocidade da rotação de coluna (Carpenter, 2016).

Segundo Mitchell et Miska (2011), as principais funções da coluna de perfuração são as seguintes: transmitir a rotação da mesa rotativa até a broca e produzir peso sobre a broca, de forma que a perfuração seja efetiva e entregue a maior taxa de perfuração possível, desde que dentro dos limites operacionais vigentes.

A perfuração através do método rotativo se dá pela transferência de rotação para a broca em conjunto com a aplicação de peso sobre a mesma. Desta forma, a broca consegue triturar a rocha e perfurar o poço em direção ao seu objetivo geológico. Nesse método, os cascalhos gerados pela perfuração são removidos do poço e carregados à superfície pelo fluido de perfuração. Este fluido é bombeado por dentro da coluna de perfuração, e retorna pelo espaço existente entre a coluna e as paredes do poço (Mello, 2014)

2.1 Parâmetros de perfuração

2.1.1 Peso sobre broca

O peso sobre broca aplicado na perfuração é proveniente da coluna de perfuração. Esta é composta por diferentes tubos que, conectados a ferramentas de leitura de solo e direcionamento de poço, têm por função realizar a perfuração e direcionar o poço até o seu objetivo geológico (Anjos, 2013). Todo esse material, conectado a um sistema rotativo de perfuração, proporciona uma carga que é suspensa por cabos. Esta carga é responsável por transferir peso para a broca. À medida que o operador suspende o sistema rotativo, o peso sobre a broca é aliviado; em contrapartida, quando este libera a coluna, o peso é transferido para o fundo do poço.

O peso transferido para a broca é determinado por especificações técnicas dos equipamentos, que devem respeitar seus limites mecânicos, a fim de não provocar futuros problemas na perfuração, como o desgaste precoce da broca, ou a flambagem dos tubos de perfuração (Chieza, 2011). As análises de esforços mecânicos, como limite de escoamento, entre outras, são analisadas previamente por softwares específicos de perfuração, para gerar uma recomendação de trabalho a partir dos limites e margens de segurança estipuladas.

O peso sobre a broca também deve ser analisado, levando em consideração o tipo de broca e a formação que irá ser perfurada. O estudo aqui apresentado trata basicamente da

perfuração no sal, em que, na maioria das vezes, a broca utilizada é a *Polycrystalline Diamond Compact* (PDC), pois permite um desempenho superior às demais, por proporcionar maior taxa de penetração.

A interação entre os parâmetros de perfuração é muito importante para atingir as melhores taxas. Um erro comum dos operadores é confiar que parâmetros máximos implicam necessariamente o melhor desempenho. Siqueira (2011) adverte que existe a interferência de uma variável em outra, em que o melhor ajuste de valor entre elas possibilita uma eficiência superior ao desempenho em conjunto. Quando o peso sobre a broca, por exemplo, é aplicado além do necessário, o mesmo afetará a rotação da coluna, gerando vibrações e prejudicando o objetivo final de maior taxa de penetração.

2.1.2 Rotação da coluna

A importância da velocidade de rotação da coluna é a transferência de giro à broca de perfuração. Através de seus insertos, a broca corta a formação e remove partes das rochas que são transportadas para a superfície através do fluido. Segundo Hess (2016), a rotação de coluna é um parâmetro que controla a frequência de contato da coluna de perfuração com a parede do poço.

A determinação do valor de rotações, aplicado à coluna de perfuração, é previamente analisada a partir do limite operacional dos equipamentos da sonda, responsáveis pelo giro da coluna, e pelas especificações técnicas da broca (Monteiro, 2012). Quanto maior o número de rotações executadas pela broca, maior será o seu desgaste e a redução da superfície cortante, levando à redução do diâmetro da broca e à queda na taxa de perfuração.

A rotação também é responsável por gerar vibrações de diferentes tipos na coluna de perfuração, sendo essas responsáveis por danos a ferramentas de fundo de poço. Quando o intervalo de valores pré-definidos de rotação são trabalhados em harmonia com o peso de coluna, é possível minimizar tais efeitos indesejados na coluna (Mattos, 2015). Quando essas variáveis são estabelecidas de forma ideal, a vibração é mitigada e a transferência de peso não sofre influência da vibração, permitindo assim uma perfuração com maior taxa e menos problemas de falhas e desgaste precoce da broca.

2.1.3 Taxa de perfuração

A taxa de perfuração, em metros por hora, é uma medida largamente utilizada na indústria do petróleo para monitorar a velocidade do avanço em que a coluna de perfuração



se movimentam em direção ao objetivo geológico ou reservatório a ser explorado. A taxa de perfuração deve ser maximizada, uma vez que sua redução implica em maior custo para a operação (Mohammadsalehi, 2011).

Este desempenho pode variar em função de diversos fatores, entre eles o tipo da formação e os parâmetros utilizados na operação. Cada tipo de geologia possui características litológicas específicas, por exemplo, sua dureza e porosidade, que influem diretamente na velocidade de avanço da broca. Este artigo se concentra nas formações derivadas do sal que, por possuírem determinadas propriedades, dificultam o avanço da perfuração. O tipo de formação que será perfurado é um fator inerente à vontade humana, no entanto, os parâmetros de perfuração podem ser conduzidos pelos especialistas, no sentido de identificar a melhor combinação entre peso e rotação na coluna que proporcionem a melhor taxa.

Na Figura 1 estão representadas as variáveis do modelo de perfuração de poços de petróleo. A partir do peso aplicado sobre a broca e a rotação da coluna, obtém-se a taxa de penetração como resultado do sistema. Conforme a literatura abordada neste estudo, é possível entender de que forma essas entradas proporcionam o resultado esperado.

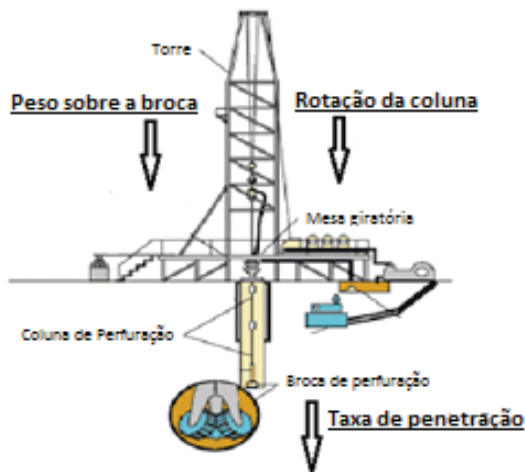


Figura 1. Variáveis de perfuração
 Fonte: Adaptado de Freudenrich et Strickland (2001)

3. METODOLOGIA

3.1 Análise Envoltória de Dados (DEA)

A DEA é um método não paramétrico, com base em programação linear, utilizada para análise de eficiência de unidades tomadoras de decisão (decision-making units – DMU),

que convertem múltiplas variáveis de entrada (inputs) em múltiplas variáveis de saída (outputs) (Cooper et al., 2011).

No estudo que deu origem ao conceito de DMU, Charnes et al. (1978) definiram DEA como um modelo de programação matemática, aplicado para a estimativa empírica de relações que são pilares da economia moderna, como as funções de produção.

A comparação entre as distintas produtividades faz referência ao conceito de eficiência das DMU, conforme Figura 2. É possível verificar que determinadas DMU produzem mais, com menor ou igual quantidade de recursos (Mello et al., 2005).

Os objetivos da análise de eficiência realizada com a DEA, resumidamente, são: a) evidenciar as causas e a dimensão da ineficiência relativa de cada DMU comparada; b) gerar um indicador de eficiência; c) determinar novas metas de produção que maximizem a eficiência das DMU (Jorge et al., 2010). Existem dois fatores que influenciam significativamente os resultados obtidos quando da aplicação da DEA: o modelo e a orientação a entradas ou saídas.

3.2 MODELOS CLÁSSICOS EM DEA

Quanto aos *modelos*, existem dois que são mais amplamente utilizados: CCR e BCC. O primeiro tem sua sigla oriunda do nome dos autores que publicaram o primeiro artigo sobre a DEA (Charnes et al., 1978). O segundo é uma extensão do primeiro, como se verá adiante e também tem sua sigla oriunda do nome dos autores (Banker et al., 1984).

Para Souza et al. (2016), o modelo CCR é utilizado para retornos constantes de escala (*Constant Returns to Scale - CRS*), indicando as relações de produção das DMU, atendendo ao critério de proporcionalidade entre insumos e produtos. No entanto, existem contextos em que não existe a constância desses retornos de escala. Nestas condições, o modelo CCR pode gerar medidas de eficiência mascaradas pela escala (La Forgia et Couttolenc, 2009). Devido a essa configuração do modelo CCR, surgiu um modelo posterior, conhecido como BCC. Esse modelo é um complemento do CCR, admitindo retornos variáveis de escala (*Variable Returns to Scale - VRS*).

3.3 Modelo BCC Orientado ao Output

O cálculo da eficiência foi baseado nos parâmetros pré-estabelecidos pela engenharia de perfuração, no programa de poço entregue aos operadores antes de cada operação. A partir desses valores, pretende-se encontrar a combinação mais eficiente entre peso sobre broca, rotação de coluna e a taxa de perfuração, em metros perfurados. Considerando



que as DMU apresentam dimensões diversas, representadas pela escala de suas variáveis, assumiu-se que o modelo adequado é o DEA-BCC, de forma que os parâmetros de entrada no sistema não possuem uma proporcionalidade direta com os valores de saída.

Associando o foco sobre a maximização das saídas e as variáveis selecionadas, verificou-se a necessidade de escolha do modelo orientado a output. Dessa forma, o DEA-BCC orientado a output atende ao objetivo de avaliar a eficiência de perfuração, com as melhores taxas.

O modelo dos multiplicadores atribui pesos que são multiplicados aos parâmetros de entrada e saída do sistema, de forma que a eficiência de uma DMU seja calculada através da razão entre o produto dos seus outputs por seus pesos correspondentes e o produto dos seus inputs por seus pesos correspondentes. Esta razão expressa a eficiência da DMU analisada e as restrições do problema trabalham para garantir que não haja nenhuma DMU com eficiência superior a 100%. Os modelos dos multiplicadores e do envelope compõem um par primal-dual (Calôba, 2003).

Para que seja a melhor possível em relação às outras, cada DMU escolhe seus pesos de modo a corroborar com sua eficiência, entretanto, isso pode colocar outras DMU na fronteira de eficiência, provocando um grande número de unidades com 100%, reduzindo, assim, a discriminação entre elas, conforme Equação 1, na maximização dos *outputs* no modelo BCC *Primal* (*Envelope*).

$$\begin{aligned} x_{i0} - \sum_{k=1}^n x_{ik} \lambda_k &\geq 0, \forall i \\ -\theta y_{j0} + \sum_{k=1}^n y_{jk} \lambda_k &\geq 0, \forall j \end{aligned} \quad (1)$$

$$\sum_k y_k = 1$$

$$\lambda_k \geq 0 \forall k$$

em que:

x_{ik}, y_{jk} – inputs i e outputs j da K ;

x_{i0}, y_{j0} – inputs i e outputs j da DMU 0;

λ_k – k -ésima coordenada da DMU 0 em uma base formada pelas DMU de referência.

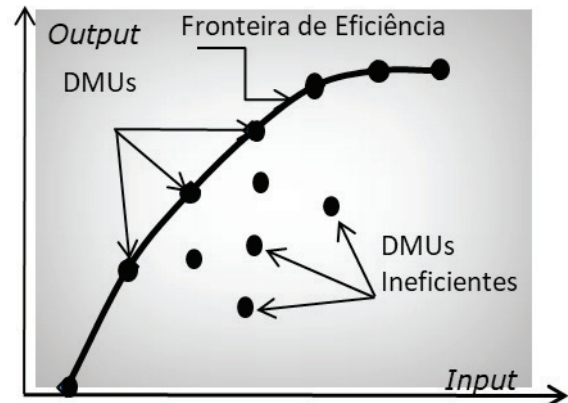


Figura 2. Esquema gráfico básico da DEA

Fonte: Próprio autor

3.4 Fronteira Invertida

Visando aprimorar o poder de discriminação do modelo utilizado, pode-se utilizar a técnica da fronteira invertida, que tem por base considerar o que antes era input como sendo output e vice-versa. Desta forma é efetuada uma análise de eficiência do ponto de vista pessimista.

Os cálculos por fronteira invertida permitem construir um índice de eficiência composta (E_{ffc}), para simplificar a análise dos resultados (Pimenta et al., 2004; Meza et al., 2005; Mello et al., 2008). Esse índice equivale à média aritmética entre a eficiência em relação à fronteira DEA convencional e o complemento da eficiência em relação à fronteira invertida, conforme apresentada na Equação 2.

$$E_{ffc} = \frac{[E_{ffp} + (1 - E_{ffi})]}{2} \quad (2)$$

em que:

E_{ffc} – Eficiência composta

E_{ffp} – Eficiência padrão

E_{ffi} – Eficiência invertida

3.5 Fatores Críticos na Modelagem DEA

Na utilização da DEA, Banker et al. (1984) indicam que a quantidade de DMU deve ser pelo menos igual ao produto do número de variáveis utilizadas no input pelo número de variáveis utilizadas no output ou, então, igual a três vezes o total de variáveis, utilizando o resultado que fornecer o maior número de DMU.



Essa proporção de DMU permite a maior discriminação dos resultados, evitando que significativa quantidade de DMU seja considerada eficiente.

4. COLETA E TRATAMENTO DOS DADOS

Os dados foram coletados em relatórios diários de perfuração de cada poço, conforme a Tabela 1. Os valores dos parâmetros de perfuração e a taxa de penetração obtida são enviados simultaneamente para o escritório do cliente, à medida que ocorre a perfuração. A leitura desses valores é feita por meio de sensores que reportam ao software de acompanhamento os resultados obtidos.

Objetivando manter a integridade dos dados e, ao mesmo tempo, proteger o sigilo da informação, a identificação dos poços perfurados foi renomeada. Além disso, as unidades de medida também foram omitidas, o que não prejudica os cálculos, uma vez que o método DEA é invariante às escalas das variáveis (Barreto et Mello, 2012).

Os dados de entrada para modelagem do processo de perfuração, conforme representado na Figura 3, correspondem aos inputs, enquanto os dados da saída correspondem aos outputs do sistema.

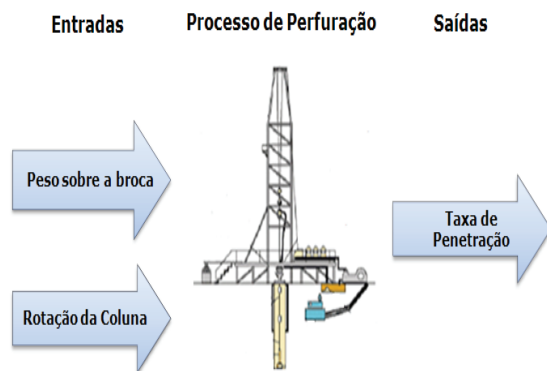


Figura 3. Modelagem da perfuração

Fonte: Adaptado de Freudenrich et Strickland (2001)

Tabela 1. Dados de modelagem para perfuração

DMU	INPUT		OUTPUT
	Poços	Peso	Rotação
pp1	51	99,3	5,2
pp2	56,1	166,8	5,4
pp3	41,5	195,9	26
pp4	36,8	195,6	26,4
pp5	34,5	180	40
pp6	29,9	158	2,1
pp7	61,8	97,8	1,1
pp8	19,6	82,1	29,5

pp9	64,6	199,8	35,4
pp10	30,3	33,6	1,4
pp11	19,4	60,6	33,5

4.1 Escolha do Modelo DEA

A partir do comportamento de cada variável e da análise do processo de perfuração, o contexto aponta para a utilização do modelo DEA-BCC orientado a output, considerando-se as seguintes características:

- A taxa de perfuração obtida não guarda proporcionalidade com os parâmetros de entrada no sistema, reforçando o conceito do modelo BCC (retornos variáveis de escala).
- Os insumos não podem ser otimizados em função da taxa de perfuração, uma vez que são pré-determinados pelos programas de engenharia de poço; isso reforça a orientação a output, que deve ser maximizado em função de reduzir elevados custos de exploração, como diárias de plataformas e equipamentos a bordo.

5. ANÁLISE DE RESULTADOS

Os dados coletados das variáveis de entrada e saída, inputs e output das DMU envolvidas no processo de perfuração, foram aplicados no modelo DEA-BCC orientado a output. Para atender a função objetiva e considerando as restrições do problema de programação linear, o software SIAD processou as informações das DMU, resultando em informações de eficiência que foram o foco de análise deste artigo.

5.1 Resultados de Benchmark

Os resultados obtidos pelo modelo matemático indicam quais DMU foram selecionadas como referências. A utilização da fronteira invertida permite identificar as DMU menos eficientes e calcular a eficiência composta, que será o resultado de desempate entre a eficiência padrão e a eficiência invertida (Tabela 2).

Tabela 2. Resultados de eficiência (SIAD)

DMU	Eficiências			
	Padrão	Invertida	Composta	Composta*
DMU_1	0,15	0,22	0,46	0,47
DMU_2	0,14	1,00	0,07	0,07
DMU_3	0,65	1,00	0,33	0,33
DMU_4	0,66	0,98	0,34	0,35



DMU_5	1,00	0,37	0,82	0,83
DMU_6	0,06	1,00	0,03	0,03
DMU_7	0,03	1,00	0,02	0,02
DMU_8	0,88	0,04	0,92	0,94
DMU_9	0,89	1,00	0,44	0,45
DMU_10	1,00	0,79	0,61	0,62
DMU_11	1,00	0,03	0,98	1,00

Em seguida, foram ordenadas as DMU analisadas em ordem de eficiência. Na Tabela 3, é possível visualizar os poços que tiveram melhor aproveitamento de seus recursos disponíveis na plataforma, como o peso aplicado sobre a broca e a rotação de coluna, para obtenção de uma taxa de perfuração como saída do sistema.

Tabela 3. Classificação por eficiência composta (SIAD) em ordem decrescente

Eficiências				
DMU	Padrão	Invertida	Composta	Composta*
DMU_11	1,00	0,03	0,98	1,00
DMU_8	0,88	0,04	0,92	0,94
DMU_5	1,00	0,37	0,82	0,83
DMU_10	1,00	0,79	0,61	0,62
DMU_1	0,15	0,22	0,46	0,47
DMU_9	0,89	1,00	0,44	0,45
DMU_4	0,66	0,98	0,34	0,35
DMU_3	0,65	1,00	0,33	0,33
DMU_2	0,14	1,00	0,07	0,07
DMU_6	0,06	1,00	0,03	0,03
DMU_7	0,03	1,00	0,02	0,02

O estudo possibilitou identificar a DMU_11 como a mais eficiente no ganho de taxa de perfuração, a partir dos parâmetros analisados. Apesar de não possuir a maior taxa de perfuração entre os poços, sua utilização de recursos de forma moderada, associados a uma entrega de taxa satisfatória, garantiu o posicionamento desta DMU entre as mais eficientes da pesquisa.

A DMU_8, embora não esteja na fronteira de eficiência padrão, obteve o segundo lugar, favorecida pelo baixo valor calculado na fronteira de eficiência invertida, já que, utilizando parâmetros moderados de perfuração, obteve uma taxa expressiva como resultado.

No caso da DMU_5, é possível perceber que, não obstante tenha sido responsável pela maior taxa de perfuração obtida, ficou posicionada em terceiro lugar, pois o alto consumo de rotações na coluna prejudicou seu desempenho no comparativo entre as DMU analisadas.

O caso da DMU_9 é interessante, pois mesmo que possua uma das maiores taxas de perfuração (2ª posição),

apresentou uma das maiores taxas de ineficiência calculada pela fronteira invertida, em razão do seu alto consumo dos parâmetros de entrada, o que, por fim, foi responsável pelo seu rebaixamento no ranking geral de eficiência.

A DMU_7 foi considerada a menos eficiente entre as analisadas. Sua baixíssima taxa de perfuração obtida causou seu rebaixamento; embora os parâmetros de entrada utilizados não estejam fora do padrão, acredita-se que o poço deve ter apresentado algum tipo de problema técnico, prejudicando, assim, seu desempenho final.

6. CONCLUSÕES

Dado o desempenho das perfurações analisadas, foi pertinente a aplicação do método DEA para obter a eficiência relativa entre os poços estudados.

A partir dos parâmetros e taxas considerados é possível ter uma nova perspectiva de recomendações sobre parâmetros e taxas de perfuração para futuros poços de correlação, a fim de motivar o melhor desempenho e menor custo de operação.

É importante ressaltar que, apesar da homogeneidade das DMU ser justificada por recursos de perfuração e trechos do pré-sal semelhantes, as intercalações de outros tipos de formação não foram levadas em consideração, o que pode justificar a menor eficiência de algumas DMU.

Como sugestões de desdobramento da pesquisa, pode ser apontada a avaliação de outras variáveis que poderiam ter sido abordadas para medir a eficiência da perfuração de poços, como o tempo entre fases, o que possibilitaria uma visão mais abrangente do desempenho da perfuração da primeira à última fase, quando o poço é entregue para produção.

REFERÊNCIAS

Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP (2017), Apresenta dados de investimento e licitações. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/ww-wanp/noticias/anp-e-p/3860-diretor-geral-da-anp-apresenta-perspectivas-de-investimentos-no-rj>>. Acesso em 29 nov. 2017.

Almeida, M. R.; Mariano, E. B.; Rebellato, D. (2006), A nova administração da produção: uma sequência de procedimentos pela eficiência. Seminários em Administração. Universidade de São Paulo, São Paulo.

Amorim Junior, D. S. (2008), Metodologia para redução de custos na perfuração de poços de petróleo e gás. Dis-



- sertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Anjos, L. L. R. (2013), Análise de vibrações torcionais em perfuração de poços de petróleo. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Banker, R. D.; Charnes, A.; Cooper, W. W. (1984), Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. *Management Science*, Vol. 30, pp. 1078-1092.
- Barreto, A. S.; Mello, J. C. C. S (2012), Benchmarks de eficiência no processamento de petróleo com produtos químicos. *Relatórios de pesquisa em engenharia de produção*. Vol. 12, No. 4, pp. 41-52, 2012.
- Bezerra, P. R. C.; Vieira, M. M; Almeida, M. R (2015). Modelagem DEA: teoria e aplicações na indústria do petróleo. *Revista ADMpg Gestão Estratégica*, Vol. 8, No. 2, pp. 139-146.
- Caldas, L. Q.; Amaral, N. B. (2015), Análise de viabilidade econômica de projetos de Exploração e Produção no regime de partilha de produção: Um estudo de caso do campo de Libra no Pré-Sal. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Calôba, G. M. (2003), Combinando Envoltória sob Ótica Dupla, Teoria da Preferência e Análise de Investimento para Avaliação de Blocos Exploratórios de Petróleo e Gás no Leilão da ANP. Dissertação (Mestrado) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.
- Carneiro, M. F. (2016), Petrobras no Pré-Sal: geração e uso de novas tecnologias. Dissertação (Mestrado) - Setor de Ciências Sociais Aplicadas, Universidade Federal do Paraná.
- Carpenter, C. (2016). Stuck-Pipe Prediction with Automated Real-Time Modeling and Data Analysis. *Journal of Petroleum Technology*, Vol. 68, No. 6, pp. 72-73.
- Charnes, A.; Cooper, W. W.; Rhodes, E. (1978), Measuring the efficiency of decision-making units. *European Journal of Operational Research*, Vol. 2, No. 6, pp. 429-444.
- Chieza, P. C. (2011), Diagnósticos de problemas operacionais durante a perfuração de poços de petróleo. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro.
- Cooper, W. W.; Seiford, L. M.; Zhu, J. (2011), *Handbook on data envelopment analysis*. Springer Science & Business Media.
- Farrel, M. J. (1957), The Measurement of Productive Efficiency. *Journal of the Royal Statistical Society*, Vol. 120, No. 3.
- Freudenrich, C.; Strickland, J. (2001), How oil drilling works. Disponível em: <https://science.howstuffworks.com/environmental/energy/oil-drilling.htm>. Acesso: 21 fev. 2019.
- Guedes, S. (2016), Polo Pré-Sal da Bacia de Santos. A consolidação de uma infraestrutura produtiva. Petrobras. Disponível em: <https://goo.gl/5J229z> Acesso: 21 fev. 2019.
- Hess, J. (2016), Pipe sticking prediction using LWD Real-time measurements. Society of Petroleum Engineers. IADC/SPE-178828-MS.
- Jones, C. M.; Chaves, H. A. F. (2015), Assessment of yet-to-find-oil in the Pre-Salt area of Brazil. 14th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Rio de Janeiro, Brazil, August 3-6.
- Jorge, M. J.; Carvalho, F. A.; Carvalho, M. P. et al. (2010), Gestão orientada para resultado: um estudo sobre os hospitais navais da Marinha do Brasil. In: SEGeT - Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, 7., Anais... Resende.
- La Forgia, G.; Couttolenc, B. F. (2009), Desempenho hospitalar no Brasil: em busca da excelência. Singular, São Paulo.
- Mattos, P. A. C. (2015), Vibrações em Colunas de Perfuração em Operações na Bacia do Solimões. Tese (Doutorado) - Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro.
- Mello, E. V. (2014), Top drive: aplicações e experiências em sistemas de perfuração. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Departamento de Engenharia Química e de Petróleo, Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ.
- Mello, J. C. C. B. S.; Meza, L. A.; Gomes, E. G. et al. (2005), Curso de análise de envoltória de dados. XXXVII Simpósio brasileiro de pesquisa operacional, 27-30 set. 2005, Gramado, RS.
- Meza, L. A.; Biondi Neto, L.; Mello, J. C. C. B. S. et al. (2005), ISYDS-Integrated System for Decision Support (SIAD-Sistema Integrado de Apoio à Decisão): a software package for data envelopment analysis model. *Pesquisa Operacional*, Vol. 25, No. 3, pp. 493-503.
- Mitchell, R. F.; Miska, Z. S. (2011), *Fundamentals of drilling engineering*. Society of Petroleum Engineers, SPE Textbook Series No. 12.
- Mohammadsalehi, M. (2011), Application of New Hole Cleaning Optimization Method within All Ranges of Hole Inclinations. IPTC 14154, International Petroleum Technology Conference, 15-17 Nov, Bangkok, Thailand.



Monteiro, H. L. S. (2012), Análise de desempenho de diferentes leis de controle de vibrações torcionais em colunas de perfuração de poços de petróleo. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Carlos.

Petroleo Brasileiro S/A. (2017), Plano de negócios e gestão. Disponível em: <http://www.petrobras.com.br/pt/quem-somos/plano-estrategico/plano-de-negocios-e-gestao/>. Acesso em 22 nov. 2017.

Pita, A. (2014), PPSA estima que 1/3 do pré-sal já tenha sido descoberto. Exame, 25 jul. 2014. Disponível em: <http://exame.abril.com.br/economia/ppsa-estima-que-1-3-do-pre-sal-ja-tenha-sido-descoberto/> Acesso em 22 nov. 2017.

Rocha, L.; Azuaga, D.; Andrade, R. et al. (2011). Perfuração direcional, 3ª ed., Interciência, Rio de Janeiro.

Souza, P. C.; Scatena, J. H.; Kehrig, R. T. (2016), Aplicação da Análise Envoltória de Dados para avaliar a eficiência de hospitais do SUS em Mato Grosso. Physis: Revista de Saúde Coeltiva, Vol. 26, No. 1, pp. 289-308.

ps://exame.abril.com.br/economia/ppsa-estima-que-1-3-do-pre-sal-ja-tenha-sido-descoberto/ Acesso em 22 nov. 2017.

Recebido: 16 nov. 2018

Aprovado: 27 nov. 2018

DOI: 10.20985/1980-5160.2019.v14n1.1481

Como citar: Marques, F. S. B.; Rangel, L. A. D.; Lima, G. B. A. et al. (2019), "Modelagem de parâmetros operacionais para suporte à avaliação do processo de perfuração de poços offshore", *Sistemas & Gestão*, Vol. 14, N. 1, pp. 77-85, disponível em: <http://www.revistasg.uff.br/index.php/sg/article/view/1481> (acesso dia mês abreviado. ano).