AJUSTE DE PARÂMETROS NA SIMULAÇÃO DE PRODUÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO UTILIZANDO O MÉTODO AHP-GAUSSIANO

RESUMO

Usualmente os sistemas de produção de petróleo não têm medição contínua de vazão de cada poço, sendo medida periodicamente, por meio de mudanças de alinhamentos na plataforma, procedimento denominado teste de produção. Nos demais períodos ou nas previsões futuras utilizam-se simuladores que permitem estimar o escoamento do petróleo nas tubulações até a plataforma. A abordagem proposta neste trabalho visa o ajuste dos modelos para previsões de médio ou longo prazo baseado em múltiplos testes de produção, de modo a evitar overfitting a uma situação de produção que pode ser transitória. A metodologia proposta aqui é a utilização do método de decisão multicritério denominado AHP gaussiano, que foi aplicado em um estudo de caso. A classificação obtida foi comparada com algumas outras possíveis formas de classificação.

PALAVRAS-CHAVE. Apoio à Decisão Multicritério; Escoamento de Fluidos Multifásicos; Óleo & Gás; Pesquisa Operacional; AHP.

Tópicos: 8. EN&PG – P.O. na área de Energia, Petróleo e Gás.

ABSTRACT

Usually, oil production systems do not have continuous measurement of the flow of each well, being measured periodically, through changes in alignment on the platform, a procedure called production test. In other periods or in future forecasts, simulators are used to estimate the flow of oil in the pipes to the platform. The approach proposed in this work aims to adjust the models for medium- or long-term forecasts based on multiple production tests, to avoid overfitting to a production situation that may be transitory. The methodology proposed here is the use of the multicriteria decision method called Gaussian AHP, which was applied in a case study. The classification obtained was compared with some other possible forms of classification.

KEYWORDS. Multicriteria Decision Support; Multiphase Flow; Oil Production; Operational Research; AHP.

DOI: 10.59254/sbpo-2023-175104
https://proceedings.science/p/175104?lang=pt-br

1. Introdução

Os reservatórios de petróleo em campos marítimos produzem por uma malha de poços de produção que são ligados à plataforma de forma individual (poços satélites) ou agrupados por meio de equipamentos denominados "*manifolds*". O escoamento do petróleo até a plataforma é feito por meio da coluna de produção do poço, que se estende do reservatório até o equipamento de término do poço no leito marinho, a ANM (árvore de natal molhada), e em seguida por tubulações que a conectam até a plataforma de produção.

Usualmente não se dispõe de medição de vazão contínua para cada poço, portanto sua produção só é medida periodicamente e no resto do tempo está disponível apenas algumas medições de pressão e temperatura em pontos principais, como no fundo do poço, na ANM ou na plataforma. Para medir a vazão, as plataformas dispõem de um separador de testes, vaso em que a produção pode ser direcionada visando medição, o que chamamos de "teste de produção" do poço.

Além da possibilidade de o separador de teste estar ocupado, o alinhamento de um poço demanda um esforço operacional grande, pois é necessário a alteração da posição de válvulas e o acompanhamento dos sensores referentes a este vaso e poço para identificação de qualquer instabilidade da produção nessa nova configuração operacional. Portanto, muitas vezes deseja-se saber sua vazão, porém não é possível fazer o alinhamento, apenas estimativas via simulação.

Por se tratar de fluidos multifásicos (óleo, gás e muitas vezes também água), o cálculo das variações de pressão ao longo do escoamento se torna complexo, e consequentemente a previsão da vazão escoada [Thomas *et al.* 2001; Andreolli 2016].

No dia a dia da indústria de óleo e gás, as previsões de produção são baseadas em modelos de simulação do escoamento nas tubulações realizadas em simuladores comerciais. Esses modelos devem ser atualizados de acordo com os testes de produção mais recentes e não existe uma forma única de fazer isso, dado que são diversos parâmetros que podem ser alterados.

O escoamento do fluido produzido em poços de petróleo é de grande complexidade por se tratar de um fluido multifásico (óleo, água e gás misturados) e cujas composições das fases líquidas e gasosas variam com a mudança das condições de temperatura e pressão ao longo do duto. Para reproduzir essa complexidade, os modelos dos sistemas são construídos em simuladores de escoamento de petróleo em tubulações, com diferentes modelagens do fluido e várias correlações de fluxo multifásico, algumas de caráter experimental, outras com abordagem mecanicista.

Para ajustar um modelo com dados de produção reais, além de alterar essas correlações é possível ajustar diversos parâmetros para minimizar o erro nas medições de pressão, temperatura e vazão. Além disso, para modelos que serão usados em previsões de médio/longo prazo, o ideal é usar dados de mais de um teste, para evitar *overfitting* do modelo com particularidades de um único teste (modelo enviesado). Dessa forma, como são diferentes medições cujos erros devem ser minimizados, é possível modelar como um problema de otimização multicritério.

Alguns métodos já foram propostos para melhorar o ajuste de teste de poço, como o desenvolvimento de medição virtual baseado em Reconciliação de Dados, proposto por Andrade [2022] e os ganhos obtidos com medição virtual apresentados por Udofia *et al.* [2012]. O presente estudo, no entanto, não tem a visão de curto prazo para alocação da produção como os citados.

Outra boa referência para entender o problema de reconciliação de dados, que surge das divergências entre as previsões oriundas dos modelos ajustados com teste de poço e as medições disponíveis, é apresentada em Câmara *et al*. [2017]. Este artigo dá uma descrição geral do problema de reconciliação de dados e apresenta uma vasta lista de técnicas utilizadas e citações de trabalhos.

Aqui, no entanto, o objetivo principal é um modelo que possa ser usado a médio/longo prazo para os estudos de desenvolvimento de novos projetos.

Para isso, é proposta uma outra abordagem, em que se entende o problema como uma decisão baseada em múltiplos critérios, propondo uma metodologia de ajuste dos parâmetros de simulação de poço de petróleo baseada em múltiplos testes de produção usando AHP gaussiano (*Analytic Hierarchy Process* gaussiano).

DOI: 10.59254/sbpo-2023-175104
https://proceedings.science/p/175104?lang=pt-br

2. Material e Métodos

2.1 Simulação de testes de produção

A pesquisa a ser desenvolvida utilizou dados reais de um poço em produção em águas profundas no Brasil, os quais foram usados de forma descaracterizada, para não permitir identificação do poço. Quando um teste de produção é realizado, gera-se um boletim de teste de produção, que contém as informações principais da produção do poço durante um período de alinhamento para o separador de teste. Foram retirados desses boletins as principais informações, como a vazão produzida e os valores de pressão e temperatura no fundo do poço (sensor denominado *Pressure Downhole Gauge*, PDG), na extremidade superior do poço (ANM) e na chegada à plataforma, antes do alinhamento para o separador. A Figura 1 ilustra o sistema:

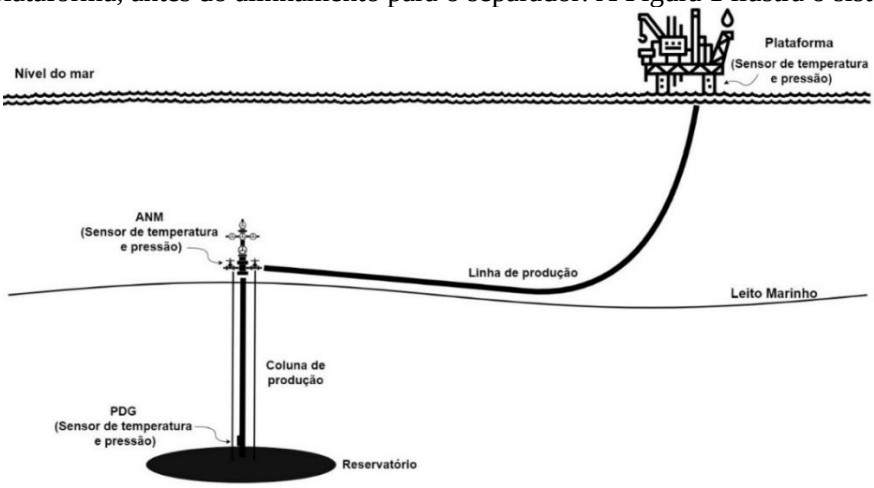

Figura 1: Esquemático de sistema de produção de petróleo
Fonte: Autores (2023)

Em seguida, foi utilizado um simulador de escoamento permanente, comumente utilizado na indústria de óleo e gás para criar um modelo de produção do poço denominado Pipesim. Para isso, são colocados dados físicos do sistema de produção, como diâmetro e comprimento das tubulações, e informações do fluido produzido, disponíveis por resultados laboratoriais.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra um arquivo de simulação usado neste projeto de pesquisa. Como é possível ver, são colocados no modelo diferentes trechos de tubulação por onde o fluido passa e que contêm propriedades distintas. No modelo montado, temos diversos elementos:

- O elemento inicial é o "VertWell_2", onde são colocadas as condições iniciais de entrada do fluido no poço (pressão, temperatura, porcentagem de água, fração de gás). Os dados que temos do sensor de fundo do poço, PDG, referem-se a esse nó.
- Em seguida, temos um elemento que corresponde ao poço propriamente dito ("Tubing_1"), onde se constrói um modelo indicando o comprimento de cada trecho do poço com respectivo diâmetro interno e variação de ângulo. Também há informações referentes às paredes do poço e às trocas térmicas que o fluido pode sofrer com o meio.
- O nó "N_1" representa a ANM, equipamento de conexão do poço com a linha de produção, onde temos sensores gerando informações reais de temperatura e pressão.
- Por fim, foram colocados 4 elementos de linha de produção, que foi assim dividida para melhor representar as diferentes propriedades de cada trecho, em especial no que se refere ao diâmetro interno, rugosidade e às camadas que compõem cada duto e suas respectivas condutividades térmicas. Da mesma forma que no poço, o modelo indica o comprimento de cada trecho com respectiva variação de ângulo.

Além dos elementos conectados no esquemático mostrado no simulador, ainda tem outros ajustes a serem feitos, em especial os que estão destacados na figura:

DOI: 10.59254/sbpo-2023-175104
https://proceedings.science/p/175104?lang=pt-br

- As propriedades da modelagem do fluido (pode usar um modelo *black oil*, que determina as propriedades do fluido para cada condição de pressão e temperatura baseado em correlações empíricas; um modelo composicional, em que é passada a composição do fluido e a equação de estado a ser usada para obtenção das propriedades; ou arquivos de tabelas de propriedades de fluido previamente gerados em outros softwares).
- As correlações de fluxo são a forma de cálculo da variação de pressão (também chamada perda de carga) ao longo do escoamento do fluido. Existem diversas opções de correlações empíricas ou mecanicistas.

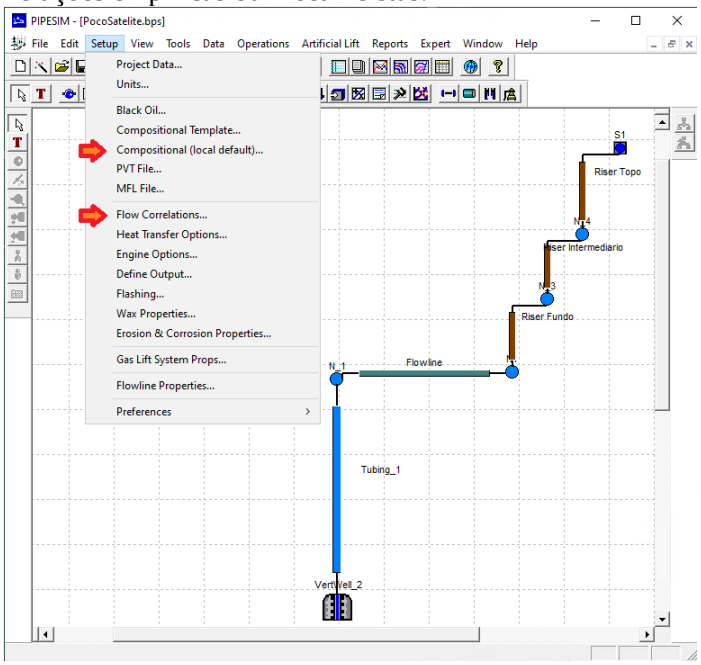

Figura 2: Simulador de fluxo multifásico comercial
Fonte: Autores (2023)

É possível, então, fazer o ajuste do modelo com os testes mais recentes, o que é feito pela variação de diversos parâmetros imprecisos, como rugosidade do duto, coeficientes de troca térmica e as correlações de escoamento multifásico e da modelagem de fluidos. Para cada ajuste, foram registrados os erros em relação aos valores medidos. Portanto, obtivemos ao fim dessa etapa uma matriz de decisão com diversas alternativas e diferentes erros a serem minimizados (critérios).

2.1 Definição do problema como uma modelagem de decisão multicritério

No procedimento usualmente realizado de ajuste do modelo baseado em testes de produção, fica a critério do agente decisor a escolha de qual alternativa ajustou melhor com os testes e a quantidade de critérios torna a decisão complexa. Este trabalho teve como objetivo propor uma forma de selecionar a melhor alternativa, em que se entende o problema como uma decisão baseada em múltiplos critérios.

Foi necessário, portanto, o uso de um método multicritério de apoio à decisão, como é o caso do consagrado método AHP (*Analytic Hierarchy Process*), proposto originalmente por Thomas Saaty [1977]. Mais do que determinar qual a decisão correta, o AHP ajuda o decisor a escolher e justificar a sua escolha. Baseado em matemática e psicologia, é um método de tomada de decisão multicritério simples de usar e flexível. Este método ganhou grande notoriedade por permitir a avaliação de problemas complexos, baseados em critérios conflitantes entre si.

O método AHP baseia-se em uma análise hierárquica das variáveis, portanto um agente decisor deve classificar as alternativas quanto aos critérios de influência de acordo com uma escala proposta pelo método [Saaty 2004]. A comparação é feita em pares de variáveis de acordo com essa escala que atribui até nove pontos para cada par de variáveis, indicando se elas são igualmente

DOI: 10.59254/sbpo-2023-175104
https://proceedings.science/p/175104?lang=pt-br

importantes (menor pontuação, 1 ponto) até uma extremamente mais importante que a outra (9 pontos), conforme mostra a Tabela *1*:

Tabela 1: Escala de Saaty para comparação par a par de critérios

Relação de Importância	Grau de Importância	Recíproca
Igualdade	1	1
Intermediário	2	1/2
Importância moderada	3	1/3
Intermediário	4	1/4
Mais importante	5	1/5
Intermediário	6	1/6
Muito mais importante	7	1/7
Intermediário	8	1/8
Extremamente mais importante	9	1/9

Fonte: Saaty (2004)

Essa classificação por vezes é difícil ou muito custosa de se fazer, uma vez que são muitos pares a serem analisados. Para cinco critérios, por exemplo, precisam ser feitas dez comparações paritárias. Se forem 15 critérios, como o estudo de caso que será apresentado a seguir, serão 105 combinações paritárias. A partir da matriz dessas comparações é calculado um vetor de prioridades para os critérios, que será usado para classificar as alternativas.

Uma variação desse método que dispensa a classificação subjetiva, é o método AHP Gaussiano, apresentado em Santos *et al.* [2021] e Soares *et al.* [2021]. Essa abordagem, usada para variáveis quantitativas, propõe obter os pesos dos critérios por meio de operações realizadas com as entradas quantitativas das alternativas em cada critério em análise, ou seja, a partir dos dados da própria matriz de decisão. Essa é a abordagem que será adotada nesta pesquisa.

Como resume bem Araujo *et al.* [2022], o algoritmo para o método AHP Gaussiano possui sete passos, que vão desde a criação da matriz de decisão até a obtenção da classificação das alternativas, após calcular o fator gaussiano e aplicá-lo na matriz. A Figura 2, adaptada de De Paula *et al.* [2022], resume os passos:

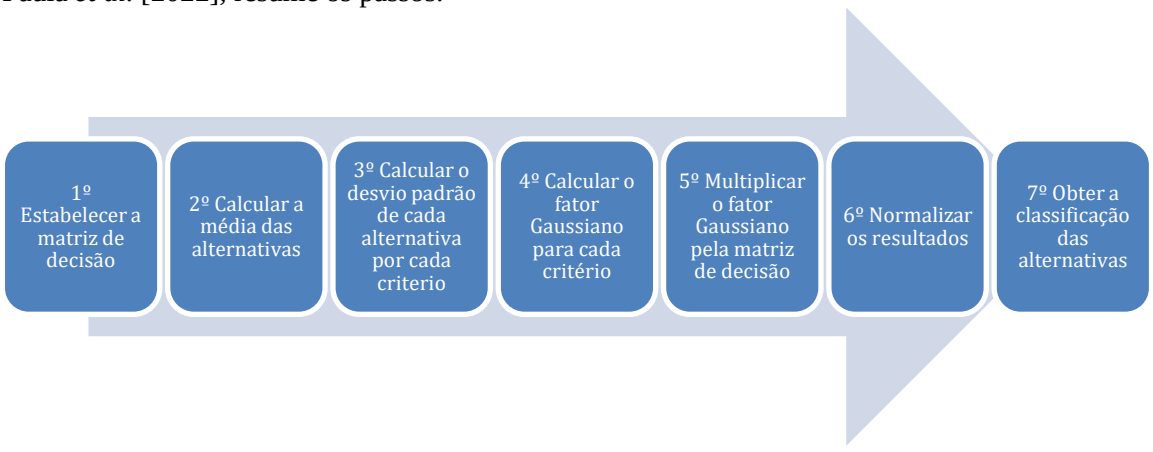

Figura 2: Passo a passo para aplicação do método AHP-Gaussiano
Fonte: Adaptado de Santos et al. (2021)

O primeiro passo consiste na obtenção de uma matriz com os critérios versus as alternativas a serem analisadas. Em um problema de escolha de melhor aparelho de celular para comprar, por exemplo, as alternativas que se deseja classificar são as diferentes marcas e os critérios vão ser as características a comparar, como preço, memória, bateria etc. Para aplicação do método, todos os valores da matriz, representados por a_{ij}, devem estar normalizados, isto é, para cada critério *j*, deve-se calcular um novo valor para a alternativa *i* por meio da fórmula:

DOI: 10.59254/sbpo-2023-175104
https://proceedings.science/p/175104?lang=pt-br

$$v_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_i a_{ij}}$$

Em seguida, calcula-se a média $\overline{x}$ das alternativas em cada critério e o desvio-padrão σ para cada critério, que pode ser obtido pela fórmula:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \overline{x})^2}{n-1}}$$

Os fatores gaussianos para cada critério são obtidos pela razão desvio-padrão pela média:

$$Fator\ gaussiano = \frac{\sigma}{\overline{x}}$$

O vetor de pesos dos critérios é obtido pela normalização dos fatores gaussianos, multiplicado pela matriz de decisão, de modo a obter as ponderações de cada alternativa, isto é, a classificação de cada uma delas.

Observa-se, portanto, que o AHP-gaussiano parte da matriz de decisão normalizada usada no AHP tradicional, não necessitando da priorização dos critérios pelo decisor, pois cria o fator gaussiano via cálculo das médias e desvio-padrão nos valores da matriz de decisão normalizada.

3. Resultados e Discussões

Para a simulação de escoamento em sistemas de produção de petróleo, podemos fornecer a pressão no nó inicial (fundo do poço) e final (plataforma) e rodar o simulador para calcular a vazão correspondente ou fixar a vazão e a pressão em uma das extremidades e pedir que calcule as pressões ao longo das tubulações até a outra extremidade. As simulações realizadas consideraram vazão e pressão na plataforma fixas, cujos valores foram os medidos nos testes de produção. Dessa forma, o erro dessas variáveis era nulo e os erros que queríamos minimizar correspondiam às diferenças entre medido e simulado para pressão e temperatura nos pontos de medição, isto é:

- pressão e temperatura no PDG (fundo do poço);
- pressão e temperatura na ANM;
- temperatura na chegada à plataforma.

Em diferentes instantes de tempo o poço estudado foi alinhado para o separador de testes e as medidas foram realizadas. Todas as simulações foram feitas para 3 testes diferentes desse poço. Foram considerados apenas testes previamente analisados e considerados válidos (medições estáveis, nenhuma anomalia detectada durante a execução do teste). Dessa forma, no total foram monitorados 15 erros diferentes (5 medições em cada um dos 3 testes).

Este trabalho mostra o resultado da comparação de 5 ajustes diferentes no modelo do simulador. As variações feitas foram descaracterizadas dos dados reais:

- Alternativa 1: correlação de fluxo mecanicista A, equação de estado SRK, composição do fluido X;
- Alternativa 2: correlação de fluxo mecanicista A, equação de estado SRK, composição do fluido X, variação de condutividades térmicas;
- Alternativa 3: correlação de fluxo mecanicista A, equação de estado Peng-Robinson, composição fluido X, variação de condutividades térmicas, alteração de rugosidade;
- Alternativa 4: correlação de fluxo mecanicista A, equação de estado SRK, composição fluido Y, condutividade térmica alternativa 1, novo valor de rugosidade;
- Alternativa 5: correlações de fluxo clássica B, equação de estado SRK, composição do fluido Y, condutividade térmica da alternativa 1, valor de rugosidade da alternativa 4.

DOI: 10.59254/sbpo-2023-175104
https://proceedings.science/p/175104?lang=pt-br

A Tabela 2 mostra os erros percentuais obtidos após as simulações utilizando as cinco combinações diferentes de ajustes no simulador. Cada ajuste desses é uma alternativa possível de ser escolhida pelo método de decisão a ser aplicado. Cada linha da tabela é o resultado de três simulações com o mesmo ajuste, uma para cada conjunto de dados medidos em um teste de produção. Conforme indicado na tabela, para cada critério de decisão foi atribuído um nome "Cn" e as tabelas dos resultados usam essa denominação.

Tabela **2**: Erros obtidos para cada ajuste

	Teste de produção - data1					Teste de produção - data2					Teste de produção - data3				
	Erro P_PDG (%)	Erro P_ANM (%)	Erro T_PDG (%)	Erro T_ANM (%)	Erro T_plat. (%)	Erro P_PDG (%)	Erro P_ANM (%)	Erro T_PDG (%)	Erro T_ANM (%)	Erro T_plat. (%)	Erro P_PDG (%)	Erro P_ANM (%)	Erro T_PDG (%)	Erro T_ANM (%)	Erro T_plat. (%)
	C1	**C2**	**C3**	**C4**	**C5**	**C6**	**C7**	**C8**	**C9**	**C10**	**C11**	**C12**	**C13**	**C14**	**C15**
Ajuste1	1,6	**5,7**	0,1	0,8	**-6,8**	4,4	**11,8**	-1,6	**-5,1**	**-25,7**	-2,3	-4,7	-1,9	**-12,0**	**-64,1**
Ajuste2	0,4	4,0	3,3	**8,1**	**17,5**	3,4	**10,1**	-0,8	-0,4	-1,1	-3,5	**-6,6**	-2,1	**-7,0**	**-12,9**
Ajuste3	0,3	3,4	0,8	**6,7**	**11,3**	3,0	**8,2**	-0,8	0,3	**-6,7**	-2,5	**-6,3**	-2,0	**-6,3**	**-27,9**
Ajuste4	-3,4	-0,4	1,4	**6,0**	**7,7**	-1,5	4,4	-0,3	0,0	-4,1	**-7,9**	**-10,8**	-1,5	**-6,4**	**-19,6**
Ajuste5	-2,6	2,0	1,5	**6,2**	**8,1**	-0,1	**8,6**	-0,2	0,5	-3,4	**-9,1**	**-11,3**	-1,5	**-6,6**	**-19,3**

Fonte: Autores (2023)

O objetivo da análise é minimizar as diferenças entre dados medidos e simulados, portanto independe se essa diferença está negativa ou positiva. Por esse motivo, tanto para o método AHP original como para o AHP-Gaussiano, sendo necessário considerar o módulo dos erros, de modo a ficar com todos os valores positivos. Além disso, por esses métodos é preciso escolher se cada critério deve ser minimizado ou maximizado. Como todos os critérios se referem a erros de ajuste, todos deveriam ser minimizados (no algoritmo, é feita a inversão desse valor, de modo a virar uma condição de maximização).

Para comparação, neste trabalho optou-se por rodar o método AHP e o método AHP-gaussiano. Como comentado anteriormente, cabe ressaltar que o método AHP é dependente de uma classificação subjetiva dos critérios e as comparações são feitas par a par. Deste modo, para o caso em estudo, que tem 15 critérios, foram feitas 105 comparações, conforme será mostrado a seguir.

3.1 AHP: Matriz de julgamentos e teste de consistência

Para montagem da matriz de julgamentos do problema proposto, levou-se em consideração que os três testes de produção têm peso igual. Em algumas situações, isso pode não ser verdade, por exemplo, a depender do uso do modelo pode ser interessante priorizar os testes de produção mais recentes, por entender que as condições do reservatório têm uma evolução natural e que o teste mais recente reflete as condições mais atuais. Como neste caso havia três testes realizados em curto espaço de tempo, a influência das condições do reservatório foi desprezada.

Além disso, de acordo com a experiencia do decisor, os dados de pressão foram considerados mais importantes que os dados de temperatura e os dados do fundo do poço e da plataforma foram considerados mais importantes que o da ANM, isto é:

P_PDG > P_ANM > T_plataforma = T_PDG > T_ANM

O resultado da matriz de julgamentos determinada com as comparações par a par de acordo com os critérios mencionados é mostrado Tabela *3*:

DOI: 10.59254/sbpo-2023-175104
https://proceedings.science/p/175104?lang=pt-br

Tabela 3: Matriz de julgamentos do método AHP

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15
C1	1	3	5	7	5	1	3	5	7	5	1	3	5	7	5
C2	1/3	1	3	5	3	1/3	1	3	5	3	1/3	1	3	5	3
C3	1/5	1/3	1	3	1	1/5	1/3	1	3	1	1/5	1/3	1	3	1
C4	1/7	1/5	1/3	1	1/3	1/7	1/5	1/3	1	1/3	1/7	1/5	1/3	1	1/3
C5	1/5	1/3	1	3	1	1/5	1/3	1	3	1	1/5	1/3	1	3	1
C6	1	3	5	7	5	1	3	5	7	5	1	3	5	7	5
C7	1/3	1	3	5	3	1/3	1	3	5	3	1/3	1	3	5	3
C8	1/5	1/3	1	3	1	1/5	1/3	1	3	1	1/5	1/3	1	3	1
C9	1/7	1/5	1/3	1	1/3	1/7	1/5	1/3	1	1/3	1/7	1/5	1/3	1	1/3
C10	1/5	1/3	1	3	1	1/5	1/3	1	3	1	1/5	1/3	1	3	1
C11	1	3	5	7	5	1	3	5	7	5	1	3	5	7	5
C12	1/3	1	3	5	3	1/3	1	3	5	3	1/3	1	3	5	3
C13	1/5	1/3	1	3	1	1/5	1/3	1	3	1	1/5	1/3	1	3	1
C14	1/7	1/5	1/3	1	1/3	1/7	1/5	1/3	1	1/3	1/7	1/5	1/3	1	1/3
C15	1/5	1/3	1	3	1	1/5	1/3	1	3	1	1/5	1/3	1	3	1

Fonte: Autores (2023)

Além de ser custoso determinar essa matriz, é fácil cometer inconsistências nos julgamentos par a par, isto é, se julgo que A é mais importante que B e que B é mais importante que C, A deve necessariamente ser mais importante que C. Muitas vezes, no entanto, ocorre algumas incoerências nos julgamentos, dada a grande quantidade de comparações subjetivas. A verificação da quantidade de inconsistências deve ser feita para definir se a matriz de julgamentos está válida, conforme proposto por Saaty. O método AHP permite trabalhar com uma pequena quantidade de inconsistências, para isso calcula-se uma razão de consistência (CR) para comparar o índice de consistência (CI) da matriz de julgamentos com um índice de consistência de uma matriz aleatória (RI). Como parte do algoritmo, primeiramente foi feita a normalização da matriz de julgamentos, que resultou na Tabela *4*:

Tabela 4: Matriz de julgamentos normalizada

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15
C1	0,178	0,205	0,161	0,123	0,161	0,178	0,205	0,161	0,123	0,161	0,178	0,205	0,161	0,123	0,161
C2	0,059	0,068	0,097	0,088	0,097	0,059	0,068	0,097	0,088	0,097	0,059	0,068	0,097	0,088	0,097
C3	0,036	0,023	0,032	0,053	0,032	0,036	0,023	0,032	0,053	0,032	0,036	0,023	0,032	0,053	0,032
C4	0,025	0,014	0,011	0,018	0,011	0,025	0,014	0,011	0,018	0,011	0,025	0,014	0,011	0,018	0,011
C5	0,036	0,023	0,032	0,053	0,032	0,036	0,023	0,032	0,053	0,032	0,036	0,023	0,032	0,053	0,032
C6	0,178	0,205	0,161	0,123	0,161	0,178	0,205	0,161	0,123	0,161	0,178	0,205	0,161	0,123	0,161
C7	0,059	0,068	0,097	0,088	0,097	0,059	0,068	0,097	0,088	0,097	0,059	0,068	0,097	0,088	0,097
C8	0,036	0,023	0,032	0,053	0,032	0,036	0,023	0,032	0,053	0,032	0,036	0,023	0,032	0,053	0,032
C9	0,025	0,014	0,011	0,018	0,011	0,025	0,014	0,011	0,018	0,011	0,025	0,014	0,011	0,018	0,011
C10	0,036	0,023	0,032	0,053	0,032	0,036	0,023	0,032	0,053	0,032	0,036	0,023	0,032	0,053	0,032
C11	0,178	0,205	0,161	0,123	0,161	0,178	0,205	0,161	0,123	0,161	0,178	0,205	0,161	0,123	0,161
C12	0,059	0,068	0,097	0,088	0,097	0,059	0,068	0,097	0,088	0,097	0,059	0,068	0,097	0,088	0,097
C13	0,036	0,023	0,032	0,053	0,032	0,036	0,023	0,032	0,053	0,032	0,036	0,023	0,032	0,053	0,032
C14	0,025	0,014	0,011	0,018	0,011	0,025	0,014	0,011	0,018	0,011	0,025	0,014	0,011	0,018	0,011
C15	0,036	0,023	0,032	0,053	0,032	0,036	0,023	0,032	0,053	0,032	0,036	0,023	0,032	0,053	0,032

Fonte: Autores (2023)

DOI: 10.59254/sbpo-2023-175104
https://proceedings.science/p/175104?lang=pt-br

Para determinação do índice de consistência, determina-se um vetor de prioridades por meio de uma média aritmética em cada linha da matriz normalizada, isto é, se a_{ij} representa os elementos da matriz de julgamentos normalizada e *n* é a quantidade de critérios, então o elemento *i* do vetor de prioridades é dado por:

$$Vetor_i = \frac{\sum_i a_{ij}}{n}$$

O vetor resultante é mostrado na Tabela *5*.

Tabela 5: Vetor de prioridades do método AHP

	Prioridade
C1	0,1657
C2	0,0818
C3	0,0351
C4	0,0156
C5	0,0351
C6	0,1657
C7	0,0818
C8	0,0351
C9	0,0156
C10	0,0351
C11	0,1657
C12	0,0818
C13	0,0351
C14	0,0156
C15	0,0351

Fonte: Autores (2023)

Para obtenção do índice de consistência, primeiro calcula-se a variável auxiliar denominada λ_{max}, que é obtido ao se aplicar o vetor de pesos na matriz de julgamentos original e fazer a soma dos elementos em cada linha, dividindo pelo peso correspondente ao critério desta linha, conforme mostrado na Tabela *6* e Tabela *8*:

Tabela 6: Matriz de julgamento ponderada pelo vetor de prioridades

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15
C1	0,166	0,245	0,176	0,109	0,176	0,166	0,245	0,176	0,109	0,176	0,166	0,245	0,176	0,109	0,176
C2	0,055	0,082	0,105	0,078	0,105	0,055	0,082	0,105	0,078	0,105	0,055	0,082	0,105	0,078	0,105
C3	0,033	0,027	0,035	0,047	0,035	0,033	0,027	0,035	0,047	0,035	0,033	0,027	0,035	0,047	0,035
C4	0,024	0,016	0,012	0,016	0,012	0,024	0,016	0,012	0,016	0,012	0,024	0,016	0,012	0,016	0,012
C5	0,033	0,027	0,035	0,047	0,035	0,033	0,027	0,035	0,047	0,035	0,033	0,027	0,035	0,047	0,035
C6	0,166	0,245	0,176	0,109	0,176	0,166	0,245	0,176	0,109	0,176	0,166	0,245	0,176	0,109	0,176
C7	0,055	0,082	0,105	0,078	0,105	0,055	0,082	0,105	0,078	0,105	0,055	0,082	0,105	0,078	0,105
C8	0,033	0,027	0,035	0,047	0,035	0,033	0,027	0,035	0,047	0,035	0,033	0,027	0,035	0,047	0,035
C9	0,024	0,016	0,012	0,016	0,012	0,024	0,016	0,012	0,016	0,012	0,024	0,016	0,012	0,016	0,012
C10	0,033	0,027	0,035	0,047	0,035	0,033	0,027	0,035	0,047	0,035	0,033	0,027	0,035	0,047	0,035
C11	0,166	0,245	0,176	0,109	0,176	0,166	0,245	0,176	0,109	0,176	0,166	0,245	0,176	0,109	0,176
C12	0,055	0,082	0,105	0,078	0,105	0,055	0,082	0,105	0,078	0,105	0,055	0,082	0,105	0,078	0,105
C13	0,033	0,027	0,035	0,047	0,035	0,033	0,027	0,035	0,047	0,035	0,033	0,027	0,035	0,047	0,035
C14	0,024	0,016	0,012	0,016	0,012	0,024	0,016	0,012	0,016	0,012	0,024	0,016	0,012	0,016	0,012
C15	0,033	0,027	0,035	0,047	0,035	0,033	0,027	0,035	0,047	0,035	0,033	0,027	0,035	0,047	0,035

Fonte: Autores (2023)

DOI: 10.59254/sbpo-2023-175104
https://proceedings.science/p/175104?lang=pt-br

Tabela 7: Cálculos para obtenção do lambda máximo

	∑pesos	Prioridade	∑pesos/Prioridade
C1	2,6145	0,1657	15,7779
C2	1,2773	0,0818	15,6159
C3	0,5325	0,0351	15,1690
C4	0,2372	0,0156	15,1786
C5	0,5325	0,0351	15,1690
C6	2,6145	0,1657	15,7779
C7	1,2773	0,0818	15,6159
C8	0,5325	0,0351	15,1690
C9	0,2372	0,0156	15,1786
C10	0,5325	0,0351	15,1690
C11	2,6145	0,1657	15,7779
C12	1,2773	0,0818	15,6159
C13	0,5325	0,0351	15,1690
C14	0,2372	0,0156	15,1786
C15	0,5325	0,0351	15,1690

Fonte: Autores (2023)

O valor de λ_{max} é a média aritmética da última coluna mostrada na Tabela *7*, que resultou em $\lambda_{max} = 15{,}382$. Por fim, o índice de consistência para o problema proposto é dado por:

$$C.I. = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} = \frac{15{,}382 - 15}{15 - 1} = 0{,}0273$$

Conforme mencionado, esse valor é comparado a um índice de consistência de uma matriz aleatória (RI). De acordo com a escala proposta por Saaty, para uma matriz de 15 critérios o valor de RI é 1,59. A razão do CI pelo RI deve ser menor que 10% para a matriz de julgamentos ser considerada válida para aplicação do método AHP. No problema proposto, tem-se que:

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0{,}0273}{1{,}59} = 0{,}0172 < 10\%$$

Portanto, a matriz de julgamentos construída é consistente viabilizando o método AHP.

3.1 AHP e AHP gaussiano: matriz de decisão (critérios e alternativas)

Tanto o método AHP original como o método AHP gaussiano partem da mesma matriz de decisão, o que difere é a forma como o vetor de pesos é construído, o primeiro caso parte da matriz de julgamentos e o segundo é obtido por meio de operações sobre a própria matriz de decisão.

A matriz de decisão no problema em estudo é mostrada na Tabela 8, obtida por meio do cálculo do valor absoluto dos erros resultantes das simulações mostrados na Tabela 2.

Tabela 8: Matriz de ponderação de critérios e alternativas

	C1	**C2**	**C3**	**C4**	**C5**	**C6**	**C7**	**C8**	**C9**	**C10**	**C11**	**C12**	**C13**	**C14**	**C15**
A1	1,635	5,739	0,100	0,781	6,823	4,436	11,78	1,616	5,072	25,69	2,312	4,746	1,868	12,04	64,12
A2	0,413	3,970	3,347	8,055	17,50	3,401	10,14	0,808	0,402	1,063	3,519	6,606	2,131	7,010	12,94
A3	0,292	3,418	0,833	6,707	11,30	3,005	8,176	0,755	0,262	6,688	2,538	6,281	1,999	6,295	27,94
A4	3,434	0,384	1,438	5,979	7,656	1,548	4,399	0,252	0,035	4,125	7,907	10,84	1,486	6,402	19,56
A5	2,619	2,001	1,478	6,228	8,125	0,129	8,605	0,185	0,490	3,375	9,126	11,31	1,513	6,599	19,26

Fonte: Autores (2023)

DOI: 10.59254/sbpo-2023-175104
https://proceedings.science/p/175104?lang=pt-br

Conforme descrito na seção “Material e Métodos”, o primeiro passo para a aplicação do método AHP e do AHP-gaussiano é a normalização da matriz de decisão. Em seguida, é aplicado sobre ela o vetor de pesos, como apresentado na Tabela 5 e para o método AHP Gaussiano é obtido pelo cálculo do vetor de fatores gaussianos e sua normalização, como apresentado na Tabela 9.

Tabela 9: Matriz de decisão normalizada e cálculo do vetor de pesos gaussiano

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15
A1	0,086	0,046	0,777	0,681	0,268	0,024	0,131	0,049	0,005	0,023	0,321	0,300	0,189	0,120	0,067
A2	0,340	0,066	0,023	0,066	0,105	0,032	0,152	0,099	0,067	0,564	0,211	0,216	0,165	0,206	0,334
A3	0,481	0,077	0,093	0,079	0,162	0,036	0,188	0,106	0,103	0,090	0,293	0,227	0,176	0,229	0,154
A4	0,041	0,681	0,054	0,089	0,239	0,070	0,350	0,317	0,770	0,145	0,094	0,131	0,237	0,226	0,221
A5	0,053	0,131	0,053	0,085	0,225	0,838	0,179	0,430	0,055	0,178	0,081	0,126	0,233	0,219	0,224
Média	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200
σ	0,199	0,271	0,323	0,269	0,066	0,357	0,087	0,165	0,321	0,212	0,110	0,073	0,033	0,046	0,098
Fator Gaussiano	0,994	1,354	1,617	1,344	0,330	1,785	0,435	0,823	1,603	1,059	0,552	0,364	0,165	0,228	0,491
Fator G. Normalizado	0,076	0,103	0,123	0,102	0,025	0,136	0,033	0,063	0,122	0,081	0,042	0,028	0,013	0,017	0,037

Fonte: Autores (2023)

3.2 Comparação de resultados

Ao aplicar o vetor de priorizações do método AHP e do método AHP-gaussiano, resulta em uma classificação das alternativas.

A Tabela 10 apresenta o resultado obtido ao rodar esses métodos e outras estatísticas para comparação. A primeira coluna mostra o somatório dos erros quadráticos e a classificação que se obtém ao buscar a minimização dessa soma, isto é, se x representar o valor simulado para cada critério i (pressão/temperatura em determinado ponto) e $\bar{x}$ representar o valor medido para esse critério i, então essa coluna contém o resultado do cálculo:

$$\sum_i (x_i - \overline{x_i})^2$$

Já na segunda coluna é mostrado o somatório dos valores absolutos dos erros percentuais de cada medida e a respectiva classificação obtida, ou seja,

$$\sum_i |x_i - \overline{x_i}|$$

Por fim, a terceira coluna mostra os valores obtidos no cálculo do AHP-gaussiano e a classificação obtida com esse método e a quarta coluna apresenta o resultado do cálculo do AHP.

Tabela 10: Comparação de classificações obtidas com o AHP-gaussiano e outros métodos

	∑ (Erro)²		∑ |Erro_% |		AHP-G		AHP	
	Valor	**Rank**	**Valor**	**Rank**	**Valor**	**Rank**	**Valor**	**RANK**
Ajuste1	871,2	3	148,6	5	0,212453	3	0,17124	5
Ajuste2	691,3	2	81,3	3	0,14885	4	0,182512	4
Ajuste3	**477,1**	**1**	86,5	4	0,138959	5	0,208144	2
Ajuste4	1276,6	4	**75,4**	**1**	**0,268194**	**1**	0,188527	3
Ajuste5	1558,9	5	81,0	2	0,231544	2	**0,249576**	**1**

Fonte: Autores (2023)

DOI: 10.59254/sbpo-2023-175104
https://proceedings.science/p/175104?lang=pt-br

Observa-se que o AHP-Gaussiano resulta em uma classificação bem semelhante à obtida com somatório dos erros percentuais absolutos. Em ambos os casos, a alternativa selecionada como melhor ajuste foi o "Ajuste 4". Já no método de erro quadrático o valor calculado cresce mais rapidamente com a magnitude dos erros e isso afetou de forma diferente a classificação, com resultados bastante diferentes e resultando na seleção do "Ajuste 3". O método AHP, da forma como foi gerada a matriz de julgamento, resultou na escolha do "Ajuste 5", o que poderia alterar se o decisor classificasse a importância dos critérios de forma diferente.

Dada a natureza do problema analisado, não é possível afirmar que um método é melhor que o outro, pois os resultados podem variar. Ao analisar um poço diferente, ou mesmo outros testes de produção desse mesmo poço, os erros encontrados vão variar e pode mudar a classificação dos diferentes ajustes. Como mencionado na seção introdutória, o objetivo não era descobrir um ajuste que pudesse ser considerado o melhor, mas sim propor uma nova metodologia de análise, a qual é simples de implementar e nos dá um caminho para sistematizar a análise.

A comparação entre o método AHP e o método AHP gaussiano mostra que o segundo atende o objetivo de propor uma metodologia válida e de fácil implementação, pois há um esforço maior para montagem e validação da matriz do método AHP.

4. Conclusão

O presente trabalho abordou o ajuste dos parâmetros de simulação de poço de petróleo. Na indústria é usual utilizar apenas um teste de produção para ajuste do modelo no simulador mesmo para análises de médio/longo prazo e muitas vezes de forma empírica, sem sistematização para a escolha do melhor ajuste, deixando a cargo da experiência do agente decisor.

A abordagem proposta visa o ajuste dos modelos para previsões de médio ou longo prazos, portanto buscou-se um ajuste baseado em múltiplos testes de produção. Certamente o uso de vários testes de produção traz ganho em relação à análise de um único teste, reduzindo o *overfitting*. Sem critérios bem definidos de comparação, no entanto, fica difícil a utilização de vários testes.

A utilização do método de decisão multicritério denominado AHP gaussiano mostrou-se eficiente. A metodologia foi aplicada em um estudo de caso e a classificação obtida foi comparada com algumas outras possíveis formas de classificação, inclusive uma abordagem com o método AHP tradicional. Conforme mencionado, pelas características da problemática analisada, não é possível afirmar que uma metodologia é melhor que a outra, porém o método proposto mostrou-se uma boa alternativa de sistematização, com fácil implementação.

Referências

Andreolli, Ivanilto. (2016). *Introdução à Elevação e Escoamento Monofásico e Multifásico de Petróleo*. 1ª edição. Editora Interciência, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Andrade, G. M.P.; Menezes, D.Q.F. de; Soares, R. M.; Lemos, T.S.M.; Teixeira, A.F.; Ribeiro, L.D.; Vieira, B.F.; Pinto, J.C. (2022). Virtual flow metering of production flow rates of individual wells in oil and gas platforms through data reconciliation. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. Vol. 208, Part E.

Araujo, J.; Tenório, F.; Santos, M.; Gomes, C.F. (2022). Priorização de atividades na indústria de óleo e gás na bacia de Santos: uma abordagem multimetodológica a partir dos métodos VFT e AHP-GAUSSIANO. In: *Conference XLII Encontro Nacional de Engenharia de Produção - ENEGEP 2022*, Foz do Iguaçu/PR, Brasil.

Câmara, M. M.; Soares, R. M.; Feital, T.; Anzai, T. K.; Diehl, F.C.; Thompson, P.H.; Pinto, J.C. (2017). *Numerical Aspects of Data Reconciliation in Industrial Applications*. Processes 5, no. 4: 56. https://doi.org/10.3390/pr5040056.

DOI: 10.59254/sbpo-2023-175104
https://proceedings.science/p/175104?lang=pt-br

Paula, N.; Santos, M.; Gomes, C. F.; Rodrigues, L. (2022). Classificação de saneantes de larga escala para limpeza hospitalar através dos métodos VFT e AHP-GAUSSIANO. In: *Conference LIV Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional - SBPO 2022*, Juiz de Fora/MG, Brasil.

Saaty, T.L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, Vol. 15, No. 3, pp. 234-281.

Saaty, T.L. (1980). The Analytic Hierarchy Process. McGraw Hill, New York, USA. *Reprinted by RWS Publications*, Pittsburgh, PA, USA, 2000a.

Saaty, T.L. (2000b). Fundamentals of Decision Making with the Analytic Hierarchy Process, *RWS Publications*, Pittsburgh, USA.

Saaty, T.L. (2004). Decision Making – The Analytic Hierarchy and Network Processes (AHP/ANP). *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, Vol. 13, No. 1.

Santos, M.; Lima, I. C.; Gomes, C. F. S.; Costa, I. (2021). Multicriteria Decision-Making In The Selection Of Warships: A New Approach To The AHP Method. *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*, Vol. 13.

Soares, L. M. B.; Santos, M.; Gomes, A. E. S. (2021). Quadro para Tomada de Decisões estratégicas e o método AHP Gaussiano: uma abordagem multi-metodológica na seleção de um modelo de aeronave cargueira de grande porte para a Força Aérea Brasileira. *In*.: *Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia – XVIII SEGET*. Faculdades Dom Bosco.

Thomas, J. E.; Triggia, A.A., Correia, C.A.; Verotti Filho, C.; Xavier, J.A.D.; Machado, J.C.V.; Souza Filho, J.E.; de Paula, J.L.; Rossi, N.C.M.; Pitombo, N.E.S.; Gouvea, P.C.V.M.; Carvalho, R.S.; Barragan, R.V. (2001). *Fundamentos de Engenharia de Petróleo*. 2ª edição. Editora Interciência, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Udofia, E.; Akporuno, M.; Vandenberg, F.; Beijer, V.; Oguntimehen, G.; Oni, O. (2012). Advances in production allocation: Bonga field experience. In: *SPE Intelligent Energy International Conference and Exhibition*, All Days, URL https://doi.org/10, 2118/150450-MS, SPE-150450-MS.

DOI: 10.59254/sbpo-2023-175104
https://proceedings.science/p/175104?lang=pt-br