

BINARY SEARCH TREE ALGORITHM APPLIED TO CASING DESIGN OF OIL WELL BASED ON MINIMUM COST

Douglas Albuquerque Monteiro de Lima Filho¹, Lucas Pereira de Gouveia¹, Thiago Barbosa da Silva¹, Luis Phillipe Ribeiro Almeida¹

¹*Laboratório de Computação Científica e Visualização, Federal University of Alagoas*

Av. Lourival Melo Mota, 57072-900, Alagoas, Brasil

douglas.albuquerque@lccv.ufal.br, lucasgouveia@lccv.ufal.br, thiago.barbosa@lccv.ufal.br,

luisphillipealmeida@lccv.ufal.br

Abstract. This work aims to present a strategy to reach a minimum cost of oil well casing design through a tube's selector algorithm using as support the Binary Search Tree algorithm. The oil well casing system consists of tubes and connections available that are installed on the well phases, having functions as: to prevent rock formation collapse, to avoid fluid contamination to the well, to block fluid migration to the rock formation, to withstand many equipment along the well, among others. It is worth pointing out that, on petroleum industry projects, a significant part of the costs is associated to these casing systems. Therefore, the appropriate choice becomes crucial in order to resist the solicitations, considering minimum safety factors, without economically compromising the oil well's viability. In fact, different weight tubes and grades steel available allows to the designer a wide spectrum of combinations that, if well chosen, provides to the well a higher structural lifetime and, moreover, a lower cost, associated to its building. Thus, the selection problem consists in a discrete optimization, considering the catalog of tubes available by one or more suppliers. To illustrate it and its usability, the algorithm is applied to a hypothetical oil well. To check these results, it is used the linear search method on the discrete optimization problem, that allows the resolution of these problems in an intuitive and classical way.

Keywords: optimization, casing design, binary search tree, oil, minimum cost.

1 Introdução

Companhias de diferentes partes do mundo estão sempre buscando alternativas de como minimizar seus custos e maximizar seus lucros investindo em novos serviços e tecnologia, e esta maneira de pensar não é diferente na indústria do petróleo. É possível verificar esses investimentos ao observar os avanços tecnológicos nos instrumentos de perfuração de poços, nos softwares de modelagem e ferramentas computacionais, onde esses estão conseguindo resultados cada vez melhores, minimizando falhas e custos associados à construção de poços.

Do total do custo de desenvolvimento de um campo de petróleo, metade deste é aproximadamente gasto com as operações de construção e manutenção de poços [1]. Este custo tende a aumentar consideravelmente à medida que as atividades de exploração e produção vão se afastando da costa e caminhando para lâminas d'água cada vez mais profundas [2]. Associado ao custo de construção, os revestimentos de poços de petróleo constituem uma parte significativa e são essenciais para a integridade de um poço. A escolha de um tubo de menor custo e que atenda aos fatores de segurança mínimos pode se tornar bastante complexa à medida que crescem o número de tubulares disponíveis em catálogo e crescem o número de seções desse poço.

No âmbito de ferramentas computacionais, para este trabalho, é utilizado o SCORE (Sistema de Confiabilidade de Revestimentos) [3], que é um software de projeto de poços onde são gerados os carregamentos e onde são feitas as simulações para verificar a integridade do poço. Este software apresenta um tempo de simulação razoável pois implicitamente calcula diversos cenários de carregamentos de serviço e de sobrevivência que podem ocorrer no poço durante sua vida útil. Portanto, o objetivo deste trabalho é automatizar a busca em catálogo de tubos de revestimentos de poço por meio de um algoritmo de otimização discreta utilizando uma

Árvore Binária de Busca a fim de reduzir o custo computacional desta seleção de tubos, uma vez que um número menor de simulações do SCORE será necessário

2 Projeto de revestimento de poço

Em um projeto de revestimento de poço, a escolha do tubo se baseia em características adequadas de peso, grau do aço, espessura do tubo, diâmetro externo e preço, de modo a viabilizar o projeto. No método determinístico é adotado um fator de segurança adimensional que tem como objetivo majorar a carga que será aplicada ao revestimento de modo que se cubram as incertezas do projeto. Esse fator de segurança é calculado por:

$$FS = \frac{R}{S} \quad (1)$$

onde, FS é o fator de segurança, R é a resistência do tubo e S é a carga a qual o tubo será solicitado. Esse fator de segurança deve ser maior ou igual ao fator de segurança mínimo previsto na norma N-2752 [4]. Os principais modos de falha que os tubulares devem resistir são colapso, pressão interna e triaxial utilizando critério de von Mises. A análise triaxial consiste em uma verificação simultânea de esforços combinados.

A pressão interna tem origem na coluna hidrostática de fluido e atua na parede interna do tubo. A falha ocasionada por este carregamento ocorre quando a pressão no interior do revestimento supera excessivamente a pressão externa. O colapso é gerado primariamente pela coluna de pressão hidrostática gerada pelos fluidos externos ao revestimento. A falha ocasionada por este carregamento ocorre quando a pressão exterior ao tubo supera excessivamente a pressão no interior do tubo [5]. A tensão axial provém de forças atuantes ao longo do revestimento, dentre elas podemos citar o peso próprio linear do tubo e as forças de pressão em áreas expostas e em válvulas que impedem o fluxo reverso [6].

Dessa forma, os tubos serão solicitados e deverão resistir a esses carregamentos que variam ao longo da construção e utilização do poço. Em projeto, deve-se gerar diferentes cenários de carregamento, enfatizando a necessidade de uma boa seleção de tubos. O software SCORE [3] é capaz de calcular todos esses cenários de carregamento e permite que avaliemos se um tubo está ou não apto a resistir às solicitações e isso se dá avaliando os valores de FS ao longo da seção no poço a qual o tubo deverá ser instalado. Adicionalmente toda a configuração do poço deve ser inserida previamente como entrada para que o cálculo dos carregamentos seja realizado.

3 Árvore de busca binária

O algoritmo de árvore de busca binária é um método de busca que tem como objetivo acelerar a busca por um determinado elemento, sem a necessidade de um algoritmo prévio de ordenação desses elementos e que se torna mais eficiente quão maior for a quantidade de elementos inseridos nessa árvore. Os critérios de inserção desses elementos permitem ao algoritmo uma busca diferente do que é visto em uma busca linear ou uma busca binária, por exemplo. A Fig. 1 a seguir esquematiza como se dá uma árvore binária.

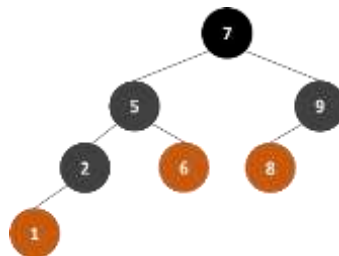


Figura 1. Representação de uma árvore binária de busca

O primeiro elemento da árvore denomina-se raiz da árvore e se encontra no topo, cada elemento de uma árvore binária é chamado de nó. Nós sem filhos, isto é, nós sem ramificações à esquerda ou à direita, são chamados de folhas. As profundidades de uma árvore binária são os níveis em que se encontram os nós da árvore, tendo o nó raiz profundidade um, os nós filhos, profundidade dois e assim por diante. A altura da árvore é dada pela maior

profundidade que essa árvore alcançou de elementos inseridos [7]. Na Fig. 1, por exemplo, a altura da árvore é quatro. Para verificar como se dá a inserção, parte fundamental para compreender a busca em árvore, é utilizada como exemplo a Fig. 1.

Ao inserir um elemento numa árvore vazia, esse elemento é automaticamente o nó raiz, que é o nó 7 da Fig. 1. Para inserir o próximo elemento na árvore, por exemplo o 9, é preciso avaliar se este é maior ou menor que o nó raiz. Se for menor, o elemento deve ser posicionado à esquerda, se maior, deve ser posicionado à direita do nó raiz, como 9 é maior que 7, no exemplo, foi posicionado à direita de 7. O próximo elemento (nó 8) a ser adicionado na árvore deve ser avaliado mais uma vez em relação ao nó raiz e como ele é maior que o valor apresentado no nó 7, ele se encontrará à direita do nó raiz, e como esse nó já tem um filho à direita (nó 9), é preciso avaliar se o nó 8 é maior ou menor que o nó 9, e, como 8 é menor que 9, foi posicionado à esquerda de 9. E esse algoritmo se repete até que todos os elementos sejam inseridos na árvore.

Seguindo esse critério de inserção, a árvore binária ganha uma propriedade muito importante para o desenvolvimento do algoritmo alvo deste trabalho: todos os nós à esquerda do nó raiz são menores que a própria raiz e de forma similar, todos que estão à direita são maiores. A propriedade também é válida se avaliarmos as subárvores geradas a partir dos demais nós. Para buscar o nó 6, por exemplo, verificamos se é maior ou menor que o nó raiz, e como é menor estará à esquerda da raiz, depois verifica-se se é maior ou menor que o nó filho até chegar no nó encontrado.

Sendo assim, é possível observar que quanto menor for a altura desta árvore, mais rapidamente se dará a busca pelos seus elementos e, conseqüentemente, quanto mais aleatoriamente estiverem dispostos esses elementos que forem sendo inseridos, mais balanceada essa árvore será.

3.1 Aplicação em projeto de revestimento

A escolha ótima discreta do tubular de menor custo e que atende às solicitações respeitando as normas de segurança se dá através da inserção de um catálogo de tubos previamente randomizado na árvore baseando-se nos seus preços e seguindo o critério adotado na seção 3. *Árvore binária de busca.*

Além da verificação do preço ser maior ou menor dos tubos, no algoritmo de busca em árvore binária, é necessário analisar a restrição abaixo em todos os pontos ao longo da seção do poço a qual o tubo irá ser instalado.

$$FS \geq FS_{\min} \quad (2)$$

Como exemplo, os fatores de segurança mínimos para cada um dos carregamentos supracitados previstos na norma N-2752 [4] são:

Tabela 1. Fatores de segurança mínimos para cada carregamento

Carregamento	Fator de segurança mínimo
Colapso	1,100
Pressão interna	1
Triaxial	1,250

Na busca linear por um tubo se faz necessária a implementação de um algoritmo de ordenação crescente por preços de um catálogo para aí então fazer a verificação um a um dos vários tubos disponíveis, o que pode ter um custo computacional elevado quando um tubo mais robusto e caro se faz necessário.

Com o catálogo não ordenado e estruturado em uma árvore binária, a busca se inicia a partir da raiz desse catálogo. Esse tubular é avaliado dentro da ferramenta SCORE [3] para verificar se a restrição apresentada na eq. (2) é atendida. Como espera-se que tubos com especificações mais robustas tenham um preço mais elevado e de forma análoga para tubos com especificações menos robustas, a busca deve caminhar para tubos mais à direita quando esse critério não for atendido. Quando um tubular apresentar uma configuração aceitável, deve-se caminhar na árvore à esquerda deste tubular a fim de buscar um tubo mais viável economicamente. A depender da organização da árvore, o caminho percorrido pela árvore binária de busca pode encontrar um tubo de maior custo que não consegue atender às restrições devido a tensão de escoamento, por exemplo, e, nesses casos, ao invés de testar um tubo à direita (mais robusto), se torna interessante avaliar se a tensão de escoamento de um tubo mais à esquerda do revestimento em análise não seria maior, assim o erro pode ser melhor contornado.

4 Resultados

Quando comparamos o algoritmo de árvore binária de busca com a busca em catálogo ordenado por preços, onde os tubos precisam ser ordenados previamente em ordem crescente de preços e em seguida deve ser feita a verificação um a um dos tubos disponíveis no catálogo, verifica-se o comportamento conforme Figura 2.

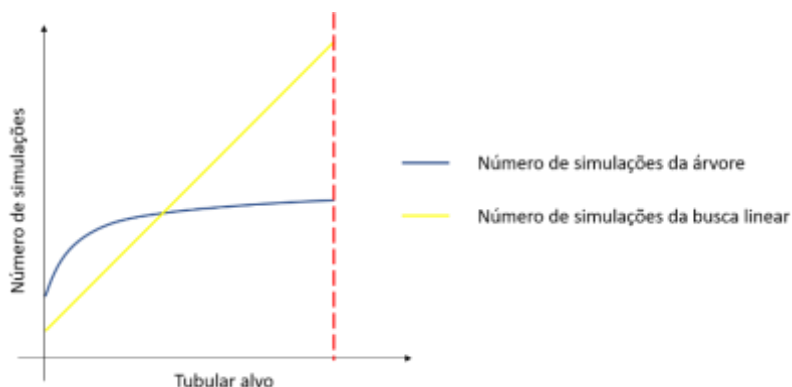


Figura 2. Número de simulações comparando os métodos de otimização

No pior caso, cada operação durará $O(n)$ em uma árvore com n elementos, mas em uma árvore binária de busca formada aleatoriamente, a complexidade de tempo esperada para cada operação é $O(\lg n)$ [7].

4.1 Estudo de caso

Para demonstrar o algoritmo, foi utilizado um poço hipotético de desenvolvimento, offshore de 4 fases, e cada uma com apenas uma seção, cujo objetivo é encontrar o revestimento intermediário de menor custo dentre os tubos disponíveis no catálogo de 32 tubos encontrados e retirados de Roque [8], que conta com valores que servem apenas para ilustrar o problema. O que se deseja verificar é que o número de simulações é inferior ao que seria preciso se fosse utilizada a busca linear, diminuindo assim o custo computacional e o tempo necessário para se encontrar a solução ótima. Os algoritmos performaram em um computador com processador i7 Intel Core, 8ª Geração e a linguagem de programação utilizada foi Python 3.7. A tabela 2 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 2. Tempo de simulação dos algoritmos de busca

Algoritmo	Tempo (s)	Execuções do SCORE
Árvore Binária de Busca	6,211	7
Busca linear	16,339	25

O tubo selecionado utilizando os dois algoritmos foi o mesmo e apresenta as características mostradas na tabela 3.

Tabela 3. Especificações do tubo selecionado

Propriedade	Valor
Diâmetro Externo	7"
Grau do aço	V150
Peso linear	29 lb/ft
Espessura	0,408 in
Preço	US\$ 2763,84

5 Conclusões

O algoritmo de árvore binária de busca é um algoritmo que permite ser utilizado em uma gama de aplicações. Quando aplicado em uma busca otimizada de revestimento, vê-se que ele se torna mais eficiente quanto maior o custo do tubo que se deseja encontrar, pois em uma lista ordenada com a implementação de busca linear, se a carga a qual o tubular for solicitado for baixa, um dos primeiros tubulares já servirão e na árvore esses tubos estarão um pouco mais distantes da primeira interação. Em catálogos com grande quantidade de revestimentos, o algoritmo alcança essas respostas mais rapidamente, com um custo computacional e número de chamadas do módulo SCORE [3] muito menor, evidenciando seu potencial.

Para que o algoritmo se comporte ainda melhor, poderá ser implementado como trabalho futuro, o algoritmo das chamadas árvores AVL, cujo nome vem dos seus criadores soviéticos Adelson Velsky e Landis autores do livro *An algorithm for organization of information* [9] que consta seu algoritmo, e que permitem, através de rotações dos elementos da árvore, chegar a uma árvore balanceada, onde sua altura será a menor possível e a velocidade para se alcançar um tubo ótimo aumenta ainda mais.

Agradecimentos. Os autores agradecem à PETROBRAS pelo apoio financeiro relacionado ao desenvolvimento de pesquisas no projeto Modelos e Ferramentas Computacionais para Apoio ao Dimensionamento de Revestimentos de Poços registrado através do instrumento jurídico número 5850.0104857.17.9.

Authorship statement. The authors hereby confirm that they are the sole liable persons responsible for the authorship of this work, and that all material that has been herein included as part of the present paper is either the property (and authorship) of the authors, or has the permission of the owners to be included here.

References

- [1] Formigli Filho, J. M. Santos Basin Pre-Salt Cluster: How to Make Production Development Technical and Economically Feasible. Rio Oil & Gas, Rio de Janeiro, 2008.
- [2] Addison, F., Kennelley, K., Botros, F. Future Challenges for Deepwater Developments. Offshore Technology Conference, OTC-20404. Houston, Texas, USA, 2010.
- [3] SANTOS, J. P. L. et al. Sistema de Confiabilidade de Revestimentos (SCORE). Titulares: Petróleo Brasileiro S.A. – PETROBRAS; Universidade Federal de Alagoas – UFAL. Registro de Software n. BR512019001289-5. Publicação: 17 mar. 2017. Concessão: 01 jan. 2018.
- [4] PETROBRAS. Norma Petrobras 2752: Segurança de poço para projetos de perfuração de poços marítimos. Rio de Janeiro, Brasil, 2014. 43 p.
- [5] Rahman, S.; Chilingarian, G. Casing Design: theory and practice. Elsevier, 1995
- [6] Souza, Charlton O. de. Dimensionamento de Revestimento. Capítulo sobre levantamento de cargas em revestimentos. 2ª Edição. Rio de Janeiro, 2015.
- [7] Cormen, Thomas H.; et al. (2001). Introduction to Algorithms. Massachusetts: MIT Press.
- [8] Roque, J. L. “Dimensionamento de Revestimentos para Poços Profundos, Poços Direcionais e Horizontais de Longo Afastamento Horizontal Pelo Método do Mínimo Custo Global”. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Petróleo, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), 1992.
- [9] Adelson-Velskii, G.; E. M. Landis. "An algorithm for the organization of information". Proceedings of the USSR Academy of Sciences 146, 1962. 263–266 p.