

**DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE SÍNTESE E
OTIMIZAÇÃO APLICADO A PROCEDIMENTOS DE
CANHONEIO DE POÇOS DE PETRÓLEO**

Juliana Souza Baioco

Carolina dos Santos Seckler

**PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE
ENGENHARIA DE PETRÓLEO DA ESCOLA POLITÉCNICA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
ENGENHEIRO DE PETRÓLEO.**

Aprovado por:

Prof. Breno Pinheiro Jacob, D.Sc.

Prof. Virgílio José Martins Ferreira Filho, D.Sc.

Antônio Cláudio Soares, Eng.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

JANEIRO DE 2009

Agradecimentos

Dedicamos este projeto de fim de curso a nossas famílias e amigos, que nos apoiaram durante todo o curso e sempre nos deram força. Dedicamos também ao nosso orientador, Breno Pinheiro Jacob, por ter nos guiado na execução do projeto.

Gostaríamos de agradecer aos nossos professores, por terem repassado pacientemente seus conhecimentos, em especial aos professores Virgílio José Martins Ferreira Filho e Paulo Couto, pela ajuda no conteúdo do projeto.

Agradecemos ao pessoal do LAMCSO, especialmente aqueles que acompanharam e ajudaram no desenvolvimento do projeto: Karinna Freitas da Silva, Ian Nascimento Vieira, Carl Horst Albrecht, Beatriz de Souza Leite Pires de Lima.

Agradecemos também aos engenheiros do CENPES pela oportunidade de trabalhar no projeto e pela ajuda no desenvolvimento da monografia.

Gostaríamos de agradecer a Mariana Fernandes Ramos pela ajuda na revisão e a Pedro Paulo dos Santos Machado pela edição das figuras.

Por fim, somos muito gratas a ANP e a COPPETEC pelas bolsas de iniciação científica.

Sumário

LISTA DE FIGURAS	V
LISTA DE TABELAS.....	VII
1 - INTRODUÇÃO.....	1
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
3 - PROCESSO DE CANHONEIO	5
3.1 <i>Descrição do Processo</i>	5
3.2 <i>Classificação</i>	8
3.2.1 <i>Overbalance</i>	9
3.2.2 <i>Underbalance</i>	10
3.2.3 <i>Extreme Overbalance</i>	11
4 - FLUXO EM MEIOS POROSOS.....	12
4.1 <i>Equação da Continuidade</i>	13
4.2 <i>Equação de Darcy</i>	14
4.3 <i>Equação de Estado</i>	15
4.4 <i>Soluções da Equação da Difusividade</i>	16
4.4.1 <i>Fluxo Linear</i>	17
4.4.2 <i>Fluxo Radial</i>	18
5 - MODELAGEM NUMÉRICA.....	20
5.1 <i>Modelo Padrão.....</i>	20
5.2 <i>Razão de Produtividade</i>	23
6 - ESTUDOS PARAMÉTRICOS	24
7 - CONCEITOS DE OTIMIZAÇÃO.....	29
7.1 <i>Otimização.....</i>	29
7.2 <i>Algoritmos Genéticos</i>	30
7.2.1 <i>Conceitos Básicos.....</i>	31

7.2.2	Composição dos Algoritmos Genéticos	32
8	- IMPLEMENTAÇÃO DA OTIMIZAÇÃO.....	38
8.1	<i>Função Objetivo: Modelo Analítico de Fluxo no Canhoneado</i>	38
8.2	<i>Restrições</i>	45
8.2.1	Restrições dos Parâmetros Geométricos	45
8.2.2	Restrições nos Parâmetros de Físicos.....	46
8.3	<i>Modelo de Síntese e Otimização.....</i>	47
8.3.1	Estudos de Caso.....	48
9	- CONCLUSÃO	57
10	- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
ANEXOS		60
	<i>Anexo A.....</i>	60
	<i>Anexo B.....</i>	69

Lista de Figuras

Figura 1 - (a) Canhoneio convencional. (b) Canhoneio TCP. (c) Canhoneio através da coluna de produção. (Fonte: THOMAS, 2001).....	6
Figura 2 - Carga de um perfurador. (Fonte: MATTA, 2007 modificada).....	7
Figura 3 - Detonação da carga de um perfurador e a formação de jato. (Fonte: MATTA, 2007).....	8
Figura 4 - Classificação do canhoneio. (Fonte: SILVA, 2007 modificada).....	9
Figura 5 - Elemento de um meio poroso. (Fonte: ROSA <i>et al.</i> , 2006).....	13
Figura 6 - Fluxo linear em um reservatório com alimentação no limite externo. (Fonte: ROSA <i>et al.</i> , 2006).....	17
Figura 7 - Fluxo radial permanente. (Fonte: ROSA <i>et al.</i> , 2006).....	18
Figura 8 - Estrutura esquemática do canhoneio.	22
Figura 9 - Razão de Produtividade (PR) versus Profundidade do Túnel (L_p).	26
Figura 10 - Razão de Produtividade (PR) versus Diâmetro do Túnel na Rocha (D_{ehr})..	27
Figura 11 - Esquema representativo do Algoritmo Genético básico.....	33
Figura 12 – Tipos de <i>Crossover</i> . (Fonte: LIMA, 2008).....	35
Figura 13 – Processo de Mutação.....	36
Figura 14 – (a) Esquema de um canhoneado. (b) Aproximação do canhoneado por um cilindro.....	39
Figura 15 - Divisão do canhoneado em áreas.....	41
Figura 16 - Malha de resistências representativa do fluxo em meio poroso.	44
Figura 17 – Representação do cromossomo.....	48
Figura 18 – Variáveis otimizadas do caso 1.....	49
Figura 19 – Parâmetros da otimização do caso 1.....	50
Figura 20 – Evolução do algoritmo do caso 1.....	51
Figura 21 - Variáveis otimizadas de MATTA, 2007. (Fonte: MATTA, 2007).....	52

Figura 22 - Variáveis otimizadas do caso 2.....	53
Figura 23 - Parâmetros da otimização de MATTA, 2007. (Fonte: MATTA, 2007).....	54
Figura 24 – Parâmetros da otimização do caso 2.	55
Figura 25 - Evolução do algoritmo de MATTA, 2007. (Fonte: MATTA, 2007).....	56
Figura 26 – Evolução do algoritmo do caso 2.....	56

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Valores dos parâmetros do modelo padrão.....	21
Tabela 2 – Escolha dos parâmetros livres do modelo de otimização.....	28
Tabela 3 – Validação do modelo analítico para 1spf.....	45
Tabela 4 – Comparativo dos valores ótimos.	53

Resumo

O processo de canhoneio é uma etapa importante da fase de construção de poços, realizando o contato da rocha-reservatório com o poço e viabilizando a produção do óleo. O procedimento consiste em utilizar cargas explosivas moldadas para abrir túneis no revestimento e na rocha, permitindo a vazão do fluido para o interior do poço. Desta forma, a seleção adequada do tipo de canhão e da carga a ser utilizada é de extrema importância, visto que vários fatores influenciam nesse processo, interferindo na produtividade, como densidade de tiros, profundidade de penetração, diâmetro do túnel, entre outros. O objetivo deste trabalho é apresentar resultados de estudos paramétricos para avaliar a influência de algumas variáveis relacionadas às cargas explosivas na produtividade do poço, já que existem vários tipos de cargas com diferentes propriedades, as quais conferem características específicas aos canhoneados. Além disso, exibir um modelo de otimização para encontrar o valor ótimo para os parâmetros envolvidos no processo de canhoneio. Para o estudo paramétrico, foi aplicado um programa comercial que permite simular o problema de fluxo, em conjunto com um pré-processador e um aplicativo de geração de malhas de elementos finitos, que permite a construção de modelos representando o reservatório, o poço e os túneis canhoneados. Para o modelo de otimização, foi desenvolvida uma função analítica, a qual avalia a vazão no canhoneado, a partir de uma analogia com transferência de calor e resistências térmicas. Dos parâmetros estudados, pode-se observar que a influência causada pela variação do comprimento do túnel é maior que a do diâmetro de entrada do túnel, sendo um fator importante na escolha do tipo de carga moldada a ser utilizada no projeto do poço.

Palavras-chave: Petróleo, Canhoneio, Algoritmos Genéticos.

Abstract

The perforating process is an important step in the well construction phase, making contact with the reservoir and allowing the oil production. The procedure is to use shaped explosive charges to open a tunnel on the casing and rock, allowing the flow of fluid into the well. Thus, the proper selection of the type of gun and charge in use is of extreme importance, since many factors modify this process, interfering with the productivity, such as density of shots, penetration depth, tunnel diameter, among others. The aim of this paper is to present results of parametric studies to gauge the influence of some variables related to explosive charges in the well productivity, since there are various types of charge with different properties, which confer specific characteristics to the perforated area. Also, display an optimization model to find the optimum value for the parameters involved in perforation. For the parametric study, were applied a commercial program that is able to simulate the flow problem, together with a pre-processor and a finite element meshes generator software, allowing the construction of models representing the reservoir, the well and perforated area. For the optimization model, it was developed an analytical function, which evaluates the flow in the perforated area, from an analogy with heat transfer and thermal resistance. Of the parameters studied, one can observe that the influence caused by changes in the tunnel length is larger than the tunnel diameter, being an important factor in choosing the type of shaped charge used in the design of the well.

Keywords: Petroleum, Perforation, Genetic Algorithms

1 - INTRODUÇÃO

No atual cenário econômico, no qual a oscilação do valor do petróleo tem definido a viabilidade de projetos, é importante verificar a relevância de otimizar a produção a fim de elevar a receita, diminuindo os custos. O presente trabalho tem a motivação de otimizar o processo de canhoneio para elevar a produtividade de poços de petróleo.

Um poço de petróleo, antes de entrar em produção, necessita de uma série de operações, as quais têm como função equipá-lo de modo que sejam minimizadas as intervenções durante a sua vida produtiva. O procedimento de canhoneio compreende uma etapa dessa operação denominada completação, tendo como objetivo restabelecer o contato poço-formação, permitindo o fluxo do óleo para o interior do poço.

Esse procedimento possui várias variáveis, as quais influenciam no processo, interferindo na produtividade, como a geometria do canhoneio e as propriedades físicas da rocha. Desta forma, dentre os diversos parâmetros associados à operação de canhoneio, o diâmetro de entrada do túnel e comprimento do canhoneado, estão diretamente relacionados com a escolha do tipo de carga moldada a ser utilizada no projeto do poço.

Assim, este trabalho tem como objetivo apresentar os resultados de alguns estudos paramétricos, que possibilitem determinar como algumas características afetam a produção, como variáveis geométricas do poço e da região canhoneada, e propriedades da rocha-reservatório. Desse modo, é possível definir como esses parâmetros influenciam no índice de produtividade, e auxiliar na avaliação do tipo de carga a ser empregada no canhoneio. Como a finalidade do projeto do poço é realizar as operações de forma a minimizar os danos à formação e maximizar a produção, o estudo dos parâmetros que influenciam o desempenho do canhoneio é de extrema importância para alcançar uma maior produtividade de óleo ou gás.

Adicionalmente é exibido um modelo de síntese e otimização, o qual tem a função de encontrar o valor ótimo para os parâmetros envolvidos no processo de canhoneio. Este modelo utiliza uma função analítica para o cálculo da vazão e toma como premissa o estudo paramétrico para selecionar as variáveis de interesse.

O trabalho possui uma revisão bibliográfica, citando outros autores que executaram projetos correlatos, seguida pela descrição do processo de canhoneio. Além disso, está inserida uma exposição de fluxo em meios porosos e uma definição da modelagem numérica, a qual serve de premissa para os estudos paramétricos. Por fim, descreve-se os conceitos de otimização que são utilizados na implementação do modelo de síntese e otimização.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Estudos na área de Completação de poços são importantes, visto a relevância desta etapa no desempenho do poço de petróleo. Neste sentido, alguns trabalhos serão descritos abaixo no tocante do estudo de fluxo em poços canhoneados, da análise paramétrica das variáveis que influenciam a operação de canhoneio, bem como da aplicação de ferramentas de síntese e otimização.

ANSAH *et al.* (2002) apresentaram um modelo numérico tridimensional de elementos finitos para solucionar o problema de fluxo em poços canhoneados, mostrando que o escoamento é influenciado por um conjunto de fatores. Desta forma, relacionaram o comprimento dos túneis, o diâmetro de entrada no revestimento, a densidade de tiros, o ângulo de fase entre as cargas e o dano provocado pelo canhoneio. Vale salientar que o modelo numérico estudado foi confrontado com resultados experimentais.

Já em MATTA (2007) e em SILVA (2007), o problema de fluxo em poços canhoneados foi bem representado, utilizando um modelo tridimensional cujas cargas foram alocadas em espiral na parede do poço. Foram adotados, também, túneis cônicos e anisotropia de permeabilidade, além de considerar os danos da formação e do canhoneio. Vale destacar que os modelos utilizados foram validados em FREITAS *et al.* (2006).

Adicionalmente foram realizados nesses trabalhos estudos paramétricos envolvendo fatores geométricos do túnel do canhoneado e propriedades físicas da rocha-reservatório. A partir dos resultados obtidos, pode-se observar a influência do parâmetro estudado na produtividade do poço. Desta forma, foi possível verificar que a extensão do túnel apresenta expressiva influência no desempenho do fluxo e, por conseguinte, na produtividade. Além disso, o dano à formação provocado, principalmente, pelo fluido de perfuração, afeta negativamente a vazão do fluido, reduzindo significativamente a produtividade do poço quando a permeabilidade do dano é reduzida. Outro fator relevante é a espessura do dano à formação, visto que quando o túnel do canhoneado penetra o dano e se estende pela rocha virgem, a produtividade é expressivamente melhorada, uma vez que ultrapassa a região de baixa permeabilidade.

O último aspecto que merece ser destacado é a anisotropia, a qual está relacionada com a orientação da permeabilidade e pode ter uma grande influência na produtividade.

Por último, em MATTA (2007) foi aplicada uma ferramenta de síntese e otimização em algoritmos genéticos, na qual se pode observar que métodos de otimização baseados em algoritmos evolutivos são altamente recomendados em otimização de poços canhoneados, conseguindo analisar dados do canhoneio com eficiência e em menor tempo de análise global.

3 - PROCESSO DE CANHONEIO

Para contextualizar o problema é necessário introduzir os conceitos inerentes ao processo de canhoneio de um poço de petróleo, o qual, antes de entrar em produção, necessita de uma série de operações. Estas, por sua vez, têm como objetivo equipá-lo de modo que sejam minimizadas as intervenções durante a sua vida produtiva, diminuindo assim os custos e os riscos envolvidos. A esse conjunto de atividades é dado o nome de completação.

Ao ser perfurado, o poço na maioria das vezes necessita ser revestido com tubos de aço. Isso é feito com uma série de objetivos, entre eles possibilitar uma seletividade na produção ou injeção de fluidos em diversos intervalos de interesse, uniformizar o diâmetro do poço e dificultar seu desmoronamento ou colapso. O espaço anular entre esse revestimento e a formação é então cimentado para fixação. Uma das etapas da completação do poço é, portanto, restabelecer o contato poço-formação, permitindo o fluxo do óleo. Esse procedimento é chamado de canhoneio.

Essa operação é responsável por gerar túneis, cuja geometria e propriedades físicas dependem das características do reservatório. Entretanto, ela também provoca danos na rocha, o que reduz o fluxo de fluido ao criar regiões de baixa permeabilidade devido à compactação dos poros rochosos, resultante da energia proveniente dos jatos das cargas durante a abertura dos túneis.

Assim, é de vital importância que esse procedimento seja otimizado, para que os danos sejam diminuídos, aumentando a recuperação de óleo e conseqüentemente, os ganhos da produção.

3.1 Descrição do Processo

O processo convencional de canhoneio emprega cargas explosivas dispostas em série dentro de canhões, que são cilindros de aço ou cápsulas fixadas a uma lâmina ou arames, onde as cargas se alojam, sendo estes responsáveis pelo isolamento entre o explosivo e o poço. Os canhões podem ser descidos por dentro da coluna de produção (*through tubing guns*), pelo interior do revestimento (*casing guns*), a cabo (*wireline*

guns) ou com a coluna de perfuração ou de produção (*tubing conveyed perforating – TCP*), como mostra a Figura 1.

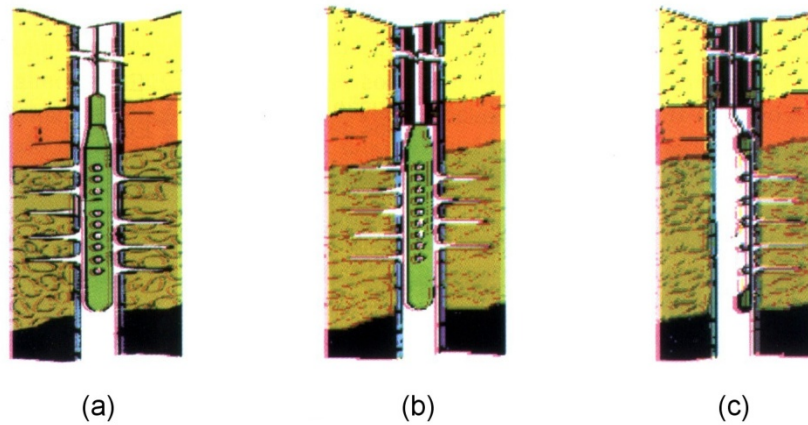


Figura 1 - (a) Canhoneio convencional. (b) Canhoneio TCP. (c) Canhoneio através da coluna de produção. (Fonte: THOMAS, 2001)

As cargas explosivas podem ser do tipo *gun perforation*, que é feito por balas de munição, ou *jet perforation*, que consiste em jatos com cargas moldadas. Esse último é o mais usado desde o final da década de 40 e evoluiu das armas militares da Segunda Guerra Mundial (OTT *et al.*, 2003). O *jet perforation* tem como vantagem a maior penetração e o menor risco de destruição da formação.

Uma carga moldada para canhoneio a jato é constituída por um invólucro externo (*Case*), uma carga principal de alto explosivo, uma carga iniciadora (*Primer*) e um *liner* (revestimento cônico metálico), conforme a Figura 2.

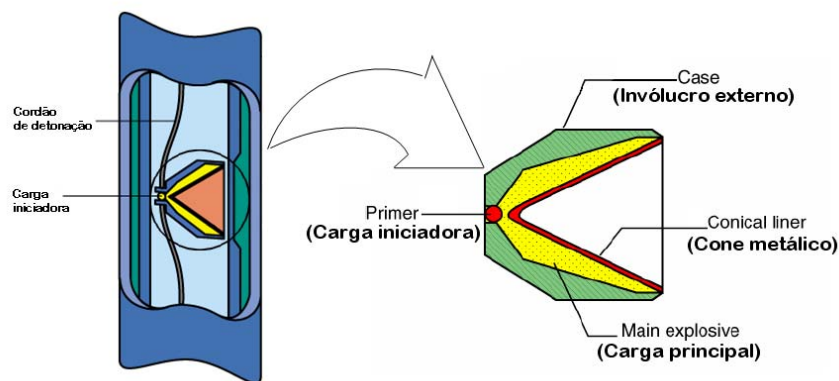


Figura 2 - Carga de um perfurador. (Fonte: MATTA, 2007 modificada)

O invólucro externo é um vaso de contenção projetado para suportar as forças de detonação da carga durante a formação do jato. Este invólucro é também importante na prevenção de interferências com as cargas adjacentes, ao longo da seqüência de disparos. Pode ser fabricado com aço, zinco ou alumínio e a precisão nas tolerâncias de projeto e fabricação são parâmetros importantes no desempenho dos disparos.

A carga iniciadora realiza a ligação entre o cordão detonante e a carga principal de explosivo. É geralmente composta por um material explosivo de maior sensibilidade, reforçando o sinal de detonação do cordão detonante para a carga principal.

O *liner*, revestimento cônico metálico, ou ainda simplesmente cone, é colapsado sob a força de detonação da carga principal, contribuindo para a formação do jato, conforme ilustrado na Figura 3.

Inicialmente, os *liners* eram fabricados de metal sólido. Estas cargas produziam com sucesso, jatos de alta densidade, mas tendendo a tampar o túnel canhoneado com grande quantidade de resíduos. Já nas cargas mais modernas os *liners* são fabricados com uma mistura de metais pulverizados, que produzem jatos com densidade suficiente para uma grande penetração na formação, com uma razoável redução na quantidade de resíduos. Os materiais que comumente compõem os *liners* podem ser cobre, zinco, tungstênio, estanho e chumbo (MATTA, 2007).

Além disso, existem vários tipos de cargas explosivas com diferentes propriedades, as quais conferem características específicas aos canhoneados como, por exemplo, as cargas *deep penetration* (DP), *super deep penetration* (SDP), *big hole* (BH), *super big hole* (SBH), entre outras. A escolha do tipo de carga a ser usada é de

extrema importância, uma vez que as cargas DP e SDP conferem maiores profundidades no túnel e as BH e SBH atribuem maiores diâmetros de entrada.

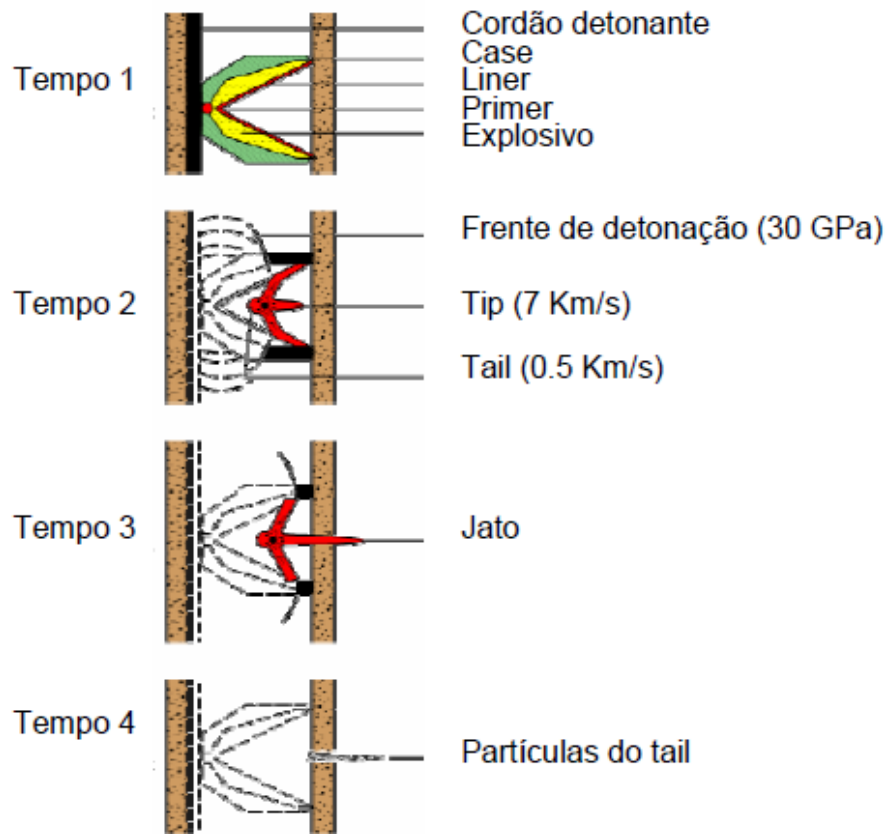
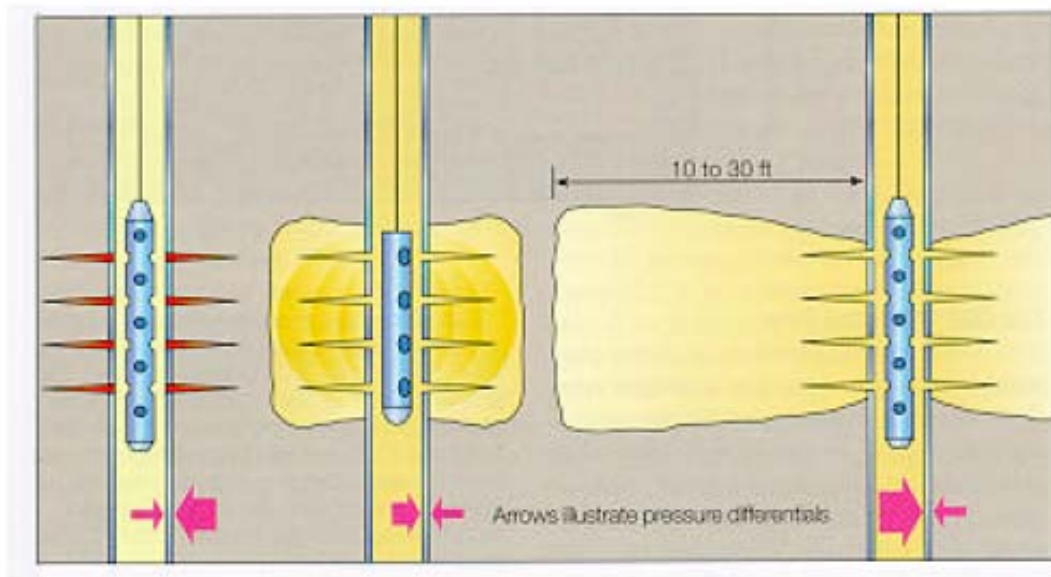


Figura 3 - Detonação da carga de um perfurador e a formação de jato. (Fonte: MATTA, 2007)

3.2 Classificação

O processo de canhoneio pode ser classificado quanto à pressão exercida pelo disparo junto à formação. Ele pode ser *Overbalance*, *Underbalance* ou *Extreme Overbalance*, como ilustrado na Figura 4.



Underbalance Overbalance Extreme Overbalance

Figura 4 - Classificação do canhoneio. (Fonte: SILVA, 2007 modificada)

3.2.1 *Overbalance*

Até o final da década de 40, a maioria das operações de canhoneio realizadas utilizavam lama de perfuração como fluido de amortecimento e diferencial de pressão no sentido poço/formação, caracterizando o canhoneio sobre-balanceado ou *Overbalance*.

Devido a esse diferencial de pressão, logo após o canhoneio ocorre uma invasão do fluido de completação dentro da área canhoneada, contaminando as imediações do poço. Havendo uma incompatibilidade entre o fluido e as argilas da formação, a invasão do fluido pode provocar um dano tal que só seja possível a descontaminação através de tratamento químico específico, o que acarretaria mais gasto com o poço.

O fluxo iniciado após o disparo empurra os resíduos dos explosivos, do cimento e do revestimento, assim como outras partículas existentes na lama ou no fluido de completação, em direção aos poros da formação. Este fenômeno é chamado tamponamento e ocorre devido à compactação dos detritos da explosão nos poros da

formação, o que dificulta o fluxo de fluido da formação em direção ao poço, implicando em queda de produtividade (SILVA, 2007).

Uma vantagem do processo *Overbalance*, é que o poço fica automaticamente amortecido durante o canhoneio, tornando a operação mais segura e, portanto sendo favorável que os disparos ocorram antes que a completação do poço esteja totalmente finalizada (MATTA, 2007).

3.2.2 Underbalance

Estudos indicaram que a indução de um fluxo, da formação para o poço, imediatamente após o canhoneio, implicava uma melhoria significativa na produtividade dos canhoneados, uma vez que possibilitava a remoção de parte dos resíduos existentes no interior dos furos e da matriz da formação. Se um diferencial de pressão no sentido formação/poço fosse aplicado no momento do disparo das cargas, caracterizando um canhoneio sub-balanceado ou *Underbalance*, utilizando ainda um fluido limpo em frente à zona a ser canhoneada, resultados melhores poderiam ser obtidos.

Esse diferencial de pressão é, neste caso, favorável à limpeza dos detritos do canhoneio imediatamente após a explosão, prevenindo assim o tamponamento. Outra vantagem é que, se o fluxo tende a ser da formação para o poço, então também não deve haver contaminação da formação pelo fluido de completação. Neste tipo de canhoneio é necessário que o poço seja totalmente completado antes de se iniciar o processo, visto que a pressão negativa no mesmo, em relação à formação, indica que logo que os disparos ocorram, o poço dará início à produção do fluido do reservatório. Esta capacidade de início imediato da produção é uma das principais vantagens deste método.

Em geral, o *Underbalance* é muitas vezes preferível ao *Overbalance*, devido à limpeza dos detritos da explosão, o que desobstrui as vias para escoamento do fluido da formação. Entretanto, além do custo adicional devido à segurança do poço, para reservatórios de gás altamente pressurizados, o canhoneio *Overbalance* pode obter melhores resultados do que o *Underbalance* (SILVA, 2007).

3.2.3 *Extreme Overbalance*

Objetivando encontrar possíveis soluções para o problema do dano causado pelo canhoneio em poços de petróleo, em 1988, a partir de diversas idéias, optou-se pelo aperfeiçoamento da técnica que utilizava um alto diferencial de pressão no sentido poço/formação no momento do canhoneio, conhecida como *Extreme Overbalance Perforating* – EOP.

O uso desta técnica busca basicamente limpar os túneis dos canhoneados dos resíduos sólidos ou depositados, resultantes do disparo das cargas, e criar fraturas de pequena penetração e alta condutividade que ultrapassem a região danificada pelo fluido de perfuração e pelo próprio canhoneio, ampliando o raio de drenagem do poço.

Dois processos são combinados para atingir esses objetivos: o grande excesso de pressão e a ação do fluxo de fluido e gás pelos canhoneados, no momento do disparo das cargas, asseguram a completa remoção de quaisquer resíduos que possam bloquear a entrada dos canhoneados, forçando-os para o fundo dos túneis; a alta pressão no poço resulta em ruptura abrupta da formação, criando fraturas radiais, de pequena penetração, a partir do túnel canhoneado, cuja extensão ultrapassa a zona danificada pelo fluido de perfuração e pelo próprio canhoneio do poço. O resultado desse processo representa uma eficiência de quase 100% do canhoneio, com a maioria dos canhoneados aptos a contribuir para o fluxo de hidrocarbonetos (SILVA, 2007).

4 - FLUXO EM MEIOS POROSOS

O estudo de fluxo em meios porosos é importante para a definição da formulação dos estudos paramétricos, bem como na compreensão da função de avaliação do modelo de otimização proposto neste trabalho.

Desta forma, adicionalmente, ao descobrir uma acumulação de petróleo deve-se estimar a quantidade de hidrocarbonetos e o tempo de produção desta jazida, sendo necessário o conhecimento das leis que regem o movimento dos fluidos nos meios porosos. Para as diversas situações em que os reservatórios se encontram são desenvolvidas soluções que se baseiam em uma equação conhecida como equação da difusividade hidráulica ou simplesmente equação da difusividade. Ela é obtida a partir da associação de três equações: da equação da continuidade, que é uma equação de conservação de massa; da equação de Darcy, que é uma equação de transporte de massa; e, de uma equação de estado, que tanto pode ser uma lei dos gases como a equação da compressibilidade para o caso dos líquidos.

Para a obtenção da equação da difusividade hidráulica admitiu-se a hipótese de o meio poroso ser homogêneo e isotrópico. Além disso, o fluxo deve ser estritamente horizontal e isotérmico, o poço deve penetrar totalmente a formação, a permeabilidade deve ser constante, deve haver pequenos gradientes de pressão, o fluido e a rocha devem ter compressibilidade pequena e constante, a viscosidade do fluido deve ser constante, as forças gravitacionais desprezíveis e, por fim, fluidos e rochas não reagentes entre si.

Para o desenvolvimento das equações será utilizado um elemento de meio poroso através do qual está ocorrendo o fluxo de um fluido, cuja saturação é igual a 100%, ou seja, é o único fluido presente no meio. O elemento em questão tem a forma de um paralelepípedo com dimensões Δx , Δy e Δz , e o fluxo através do mesmo será estudado durante um intervalo de tempo Δt (ROSA *et al.*, 2006).

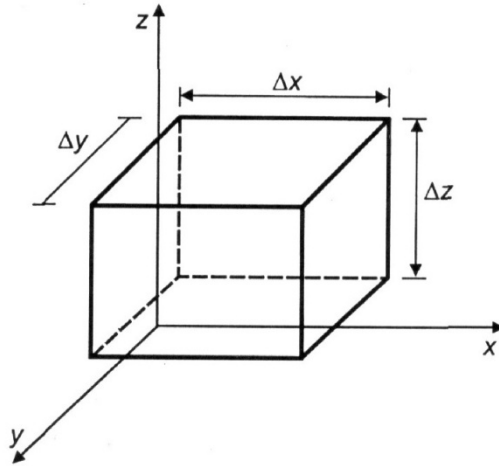


Figura 5 - Elemento de um meio poroso. (Fonte: ROSA *et al.*, 2006)

4.1 Equação da Continuidade

A equação da continuidade afirma, basicamente, que a diferença entre a massa que entra e a massa que sai nas três direções de fluxo é igual à variação de massa dentro do meio poroso no Δt considerado.

Ela é descrita por:

$$\frac{\partial}{\partial x}(v_x \rho) + \frac{\partial}{\partial y}(v_y \rho) + \frac{\partial}{\partial z}(v_z \rho) = -\frac{\partial}{\partial t}(\phi \rho) \quad (1)$$

onde v_x , v_y , e v_z são as velocidades aparentes do fluido nas direções x , y e z respectivamente, ρ é a massa específica e ϕ é a porosidade.

As velocidades aparentes do fluido são descritas por:

$$v_x = \frac{q_x}{\Delta y \Delta z} \quad (2)$$

$$v_y = \frac{q_y}{\Delta x \Delta z} \quad (3)$$

$$v_z = \frac{q_z}{\Delta x \Delta y} \quad (4)$$

onde q_x , q_y e q_z são as vazões de entrada e de saída nas três direções.

4.2 Equação de Darcy

Em 1856, em Dijon, França, Henry Darcy a partir de uma das suas experiências apresentou uma relação matemática que se tornou a base para a compreensão do fenômeno do escoamento de fluidos através de meios porosos. Em seus experimentos, Darcy estudou o fluxo de água através de um filtro de areia horizontal. A formulação geral dessa lei é usualmente feita na forma diferencial, deste modo:

$$v = -\frac{k}{\mu} \frac{dp}{dl} \quad (5)$$

onde v é a velocidade macroscópica do fluxo, μ é a viscosidade do fluido, k é a constante de permeabilidade do meio e dp/dl é o gradiente de pressão na direção do fluxo.

Para os casos em que os efeitos gravitacionais sobre o fluxo são desprezíveis, a seguinte equação diferencial para o escoamento do fluido pode ser obtida:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\rho \frac{k_x}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho \frac{k_y}{\mu} \frac{\partial p}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho \frac{k_z}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial t} (\phi \rho) \quad (6)$$

onde k_x , k_y , k_z são as permeabilidades do meio poroso nas direções x , y e z , respectivamente.

4.3 Equação de Estado

As equações de estado são aquelas que representam as compressibilidades dos fluidos e da rocha, para o caso dos líquidos.

A compressibilidade dos fluidos é dada por:

$$c_f = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial p} \quad (7)$$

e a compressibilidade da rocha é dada por:

$$c_r = \frac{1}{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial p} \quad (8)$$

Assim, a compressibilidade total do meio é dada pela soma dessas duas compressibilidades:

$$c_t = c_f + c_r \quad (9)$$

A introdução das equações (7), (8) e (9) na equação diferencial do escoamento (6) e a consideração de que a compressibilidade e a viscosidade do fluido são constantes, permitem a conclusão:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) = \varphi \mu c_t \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (10)$$

A equação (10) pode ser também escrita em termos da pressão do fluido no reservatório:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial p}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial p}{\partial z} \right) = \varphi c_t \frac{\partial p}{\partial t} \quad (11)$$

Para um meio poroso homogêneo e isotrópico, as permeabilidades nas três direções são iguais, ou seja, $k_x=k_y=k_z=k$. Além disso, tanto a compressibilidade do líquido como os gradientes de elevação são, em geral, valores muito pequenos, de modo que, quando elevados ao quadrado, resultam em termos muito menores ainda. Assim, mostram-se desprezíveis quando comparados com os outros termos da equação, o que está de acordo com o desenvolvimento deste trabalho, onde se considera o fluido incompressível. Assim, a equação da difusividade hidráulica pode ser escrita de forma mais compacta como:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{\eta} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (12)$$

onde η é a constante de difusividade hidráulica e é dada por:

$$\eta = \frac{k}{\varphi \mu c_t} \quad (13)$$

4.4 Soluções da Equação da Difusividade

As soluções da equação da difusividade podem ser dadas para sistemas lineares e radiais. Nesse trabalho, o único regime de fluxo tratado é o permanente, assim só serão apresentadas soluções nesse regime. Deve ser salientado que as soluções a serem apresentadas foram todas obtidas considerando-se que a vazão no ponto de coordenada $x = 0$ para o caso de fluxo linear, ou $r = r_w$ (raio do poço) no fluxo radial, é constante.

4.4.1 Fluxo Linear

Para um sistema de fluxo linear, ou seja, quando há apenas uma direção de fluxo, a direção x , por exemplo, os termos referentes às direções y e z são iguais a zero e a equação da difusividade se reduz a:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{\phi \mu c_t}{k} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (14)$$

As equações para fluxo linear permanente descrevem o movimento de um fluido em um meio poroso linear limitado, de comprimento L e área aberta ao fluxo A .

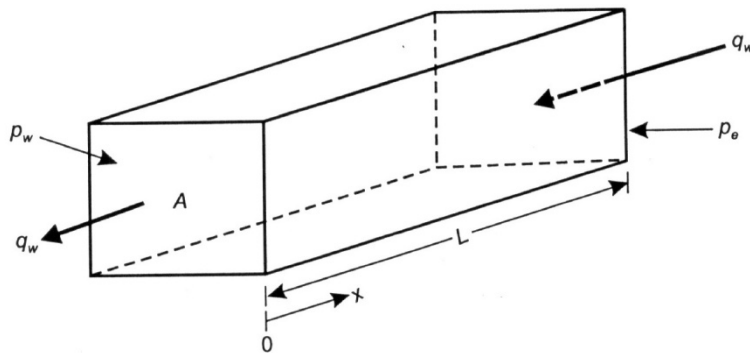


Figura 6 - Fluxo linear em um reservatório com alimentação no limite externo. (Fonte: ROSA *et al.*, 2006)

Nesse regime de fluxo, tanto a vazão quanto a pressão não variam com o tempo. Assim, a equação da difusividade toma o aspecto:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = 0 \quad (15)$$

Assim, inserindo as condições de contorno para as pressões e resolvendo para pressão e para a vazão, a solução da equação da difusividade para regime de fluxo linear e permanente pode ser escrita, de forma reduzida, como:

$$q = \frac{kA}{\mu L} \Delta p \quad (16)$$

onde:

$$\Delta p = p_e - p_w \quad (17)$$

4.4.2 Fluxo Radial

Admitindo-se que não há fluxo no sentido vertical, a equação da difusividade pode ser escrita, em coordenadas cilíndricas, como:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right) = \frac{\phi \mu c_t}{k} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (18)$$

As equações para regime permanente descrevem o movimento do fluido em um meio poroso cilíndrico, de raio da base igual a r_e e altura h , com um poço de raio r_w situado no seu centro.

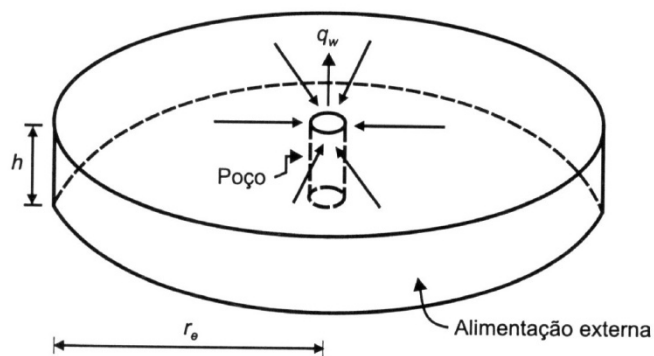


Figura 7 - Fluxo radial permanente. (Fonte: ROSA *et al.*, 2006)

Novamente, em regime de fluxo permanente, tanto a vazão quanto a pressão não variam com o tempo. Assim, a equação da difusividade toma o aspecto:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right) = 0 \quad (19)$$

Assim, inserindo as condições de contorno para as pressões e resolvendo para pressão e para a vazão, a solução da equação da difusividade para regime de fluxo radial e permanente pode ser escrita, de forma reduzida, como:

$$q = \frac{2\pi kh}{\mu \ln(r_e/r_w)} \Delta p \quad (20)$$

5 - MODELAGEM NUMÉRICA

Para modelar o problema de fluxo em poços canhoneados, foi utilizada uma modelagem numérica, a qual soluciona a equação de fluxo por uma equivalência com a equação de difusividade térmica. Desta forma, foi utilizado um programa comercial capaz de reproduzir o problema de transferência de calor para simular o problema de fluxo.

A simulação numérica iniciava a partir de um aplicativo denominado ACUMEN. Este fazia a geração automática das malhas de poços canhoneados, sendo a parametrização da geometria do canhoneio introduzida no pré-processador MSC.PATRAN e por fim simulada no MSC.MARC.

Vale ressaltar que esse modelo foi utilizada no trabalho de JACOB *et al.* (2004), no qual foi desenvolvido um procedimento de modelagem numérica tridimensional, representando a geometria dos canhoneados, bem como as regiões danificadas. A validação do modelo numérico foi obtida comparando os resultados, através de estudos de gradação de malha e da geometria, com modelos e soluções numéricas apresentados por outros pesquisadores.

5.1 Modelo Padrão

O modelo numérico formulado foi empregado para efetuar estudos paramétricos, sendo utilizado um modelo básico a partir do qual se varia o parâmetro de interesse.

A configuração do modelo padrão está descrita na Tabela 1 e apresenta os valores dos parâmetros geométricos e físicos relacionados aos canhoneados e à formação. Além disso, pode-se observar na estrutura esquemática do canhoneio, na Figura 8, o que representa cada variável.

Tabela 1 – Valores dos parâmetros do modelo padrão.

Parâmetro	Valor (Sistema utilizado pelo Solver)	Valor (Unidades de Campo)
Pressão estática (p_e)	632 N/in ²	142 psi
Pressão no poço (p_w)	316 N/in ²	71 psi
Raio interno do poço (r_w)	4,250 in	4,250 in
Raio externo (r_e)	425,000 in	425,000 in
Raio do dano da formação (r_f)	5,525 in	5,525 in
Comprimento do túnel do canhoneio (L_p)	15,000 in	15,000 in
Comprimento do tip (L_f)	0,500 in	0,500 in
Diâmetro de entrada no revestimento (D_{eh})	0,500 in	0,500 in
Diâmetro de entrada na formação (D_{ehr})	0,750 in	0,750 in
Diâmetro do tip (D_{ehf})	0,500 in	0,500 in
Espessura do dano do canhoneio (e_c)	0,500 in	0,500 in
Espessura do revestimento (e_{cs})	0,375 in	0,375 in
Espessura da cimentação (e_{cm})	0,375 in	0,375 in
Altura do reservatório (h)	3,000 ft	3,000 ft
Permeabilidade da rocha (k_r)	1000 mD	1000 mD
Permeabilidade do túnel (k_t)	1000000 mD	1000000 mD
Permeabilidade da zona danificada pelo Canhoneio (k_c)	100 mD	100 mD
Permeabilidade da zona danificada pela Perfuração (k_f)	1000 mD	1000 mD
Anisotropia (k_z / k_{xy})	0,1	0,1
Viscosidade do fluido do reservatório (μ)	6 p	600 cp

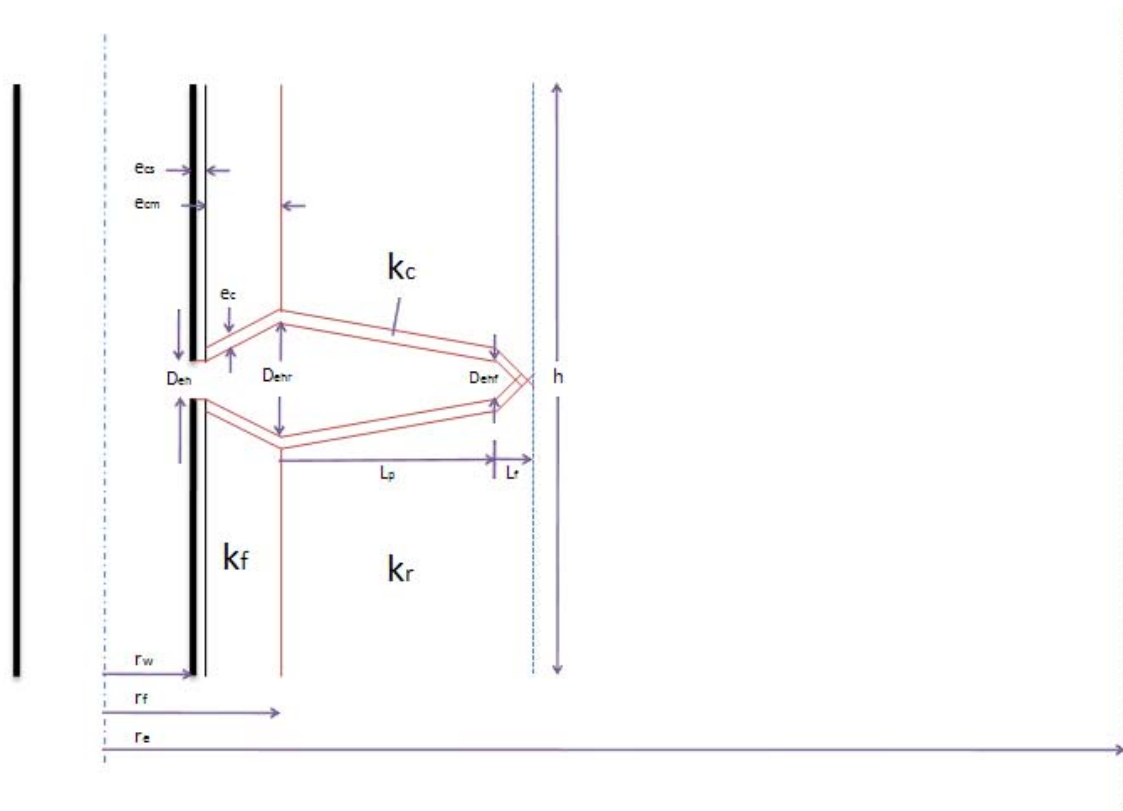


Figura 8 - Estrutura esquemática do canhoneio.

É salutar tecer alguns comentários a respeito dos valores adotados no modelo básico. Desta forma, pode-se observar que a permeabilidade do túnel apresenta um valor muito elevado, a fim de garantir a não existência de perda de carga no local, simulando uma região vazia. Outra permeabilidade que vale comentar é a permeabilidade da zona danificada pela Perfuração, a qual possui o mesmo valor da rocha virgem a fim de que os efeitos do dano da formação não fossem incorporados nas conclusões obtidas para a profundidade do túnel (JACOB *et al.*, 2005). Outro detalhe é que a espessura do dano do canhoneio é constante em todo o perímetro do túnel. Além disso, o poço canhoneado é submetido a um gradiente de pressão em um regime de fluxo permanente, sendo o raio de drenagem, obtido através de uma relação entre o raio interno e o raio externo de 1/100, para garantir bons resultados devido ao afastamento da borda externa do modelo da região perturbada pelo canhoneio, região próxima à parte interna do poço (SILVA, 2007).

5.2 Razão de Produtividade

Para obter os resultados do estudo paramétrico, foi utilizado como referência o índice de produtividade do poço canhoneado. Assim, a variação dos parâmetros fica em função da razão de produtividade (PR) e dos tiros por pé (*spf*).

Desta forma, obtendo o conhecimento da influência causada por cada parâmetro no índice de produtividade, é possível observar quais configurações proporcionam melhores resultados na vazão do poço.

A razão de índices de produtividade (PR) é definida pela equação (21) e o índice de produtividade do poço aberto é calculado conforme a equação (22) pela lei de Darcy para fluxo radial:

$$PR = \frac{J_{\text{poço canhoneado}}}{J_{\text{poço aberto ideal}}} = \frac{\ln(r_e/r_w)}{\ln(r_e/r_w) + s_t} \quad (21)$$

onde $J_{\text{poço canhoneado}}$ é o índice de produtividade do poço canhoneado, $J_{\text{poço aberto ideal}}$ o índice de produtividade do poço aberto e s_t o skin total.

$$J_{\text{poço aberto ideal}} = \frac{q}{\Delta P} = \frac{2\pi kh}{\mu \ln(r_e/r_w)} \quad (22)$$

6 - ESTUDOS PARAMÉTRICOS

O principal objetivo das técnicas e equipamentos empregados na completação de poços é maximizar a produtividade dos mesmos, reduzindo ao mínimo as restrições ao fluxo entre o reservatório e o poço.

Essas restrições são causadas por diversos fatores, durante a fase de perfuração e completação, sendo alguns relacionados ao canhoneio e às condições em que o mesmo foi efetuado. Dentre estes fatores, há diversos conjuntos de parâmetros que podem ser controlados a fim de maximizar a vazão de um poço, incluindo a limpeza dos túneis e fatores geométricos do canhoneio.

Para determinar os parâmetros mais importantes que definem o problema, foram realizados estudos de sensibilidade, variando cada parâmetro e mantendo os outros fixos a fim de verificar sua influência no fluxo de hidrocarbonetos, caracterizando os estudos paramétricos. As principais conclusões desses estudos foram apresentadas em MATTA (2007) e em SILVA (2007) e estão sintetizadas a seguir:

- A redução da produtividade é grande quando tem como causa o aumento da espessura do dano da formação, provocado na maioria das vezes pela invasão de fluidos incompatíveis com a formação, presença de reboco e filtrado de cimento, e expansão de argilas, principalmente quando abrange toda a região canhoneada. Esse prejuízo em produtividade pode ser minimizado pelo uso de cargas de alta penetração ou altas densidades de carga.
- A anisotropia, definida como a relação entre a permeabilidade vertical e a permeabilidade horizontal, para a faixa de valores estudada nas análises paramétricas, mostra pouca influência na razão de produtividade. A produção para um poço vertical, cujo eixo é paralelo a um dos eixos que definem o tensor de permeabilidades, mostra que a permeabilidade que exerce maior influência é a do plano perpendicular ao eixo do poço.
- Quanto à relação entre o raio externo do reservatório e o raio interno do poço, para as relações estudadas, pode-se verificar que, quanto maior o tamanho do modelo do reservatório, mais a razão de produtividade tende a se aproximar de um valor constante, independente da carga considerada. A

razão para isto é que o poço tem um raio de influência, ou seja, ele influencia no comportamento do reservatório nas suas proximidades, mas, em regiões muito distantes, torna-se desprezível.

Adicionalmente a esses parâmetros, foram estudadas as relações do diâmetro de entrada no revestimento, do diâmetro do *tip*, do diâmetro de entrada na rocha e da profundidade do túnel com a produtividade.

Quanto ao diâmetro de entrada no revestimento, apesar dos modelos simulados apresentarem uma variação representativa deste parâmetro, mesmo com o uso de valores cinco vezes maiores não se observou incremento significativo na produtividade do poço. A partir desta observação, é possível concluir que os resultados encontrados poderiam ser extrapolados para uma faixa de diâmetros ainda maiores, sem acarretar incremento significativo em produtividade.

Os modelos simulados para o diâmetro do *tip* permitem concluir que esse parâmetro possui baixa influência na produtividade do poço.

O diâmetro de entrada na rocha e a profundidade do túnel são os parâmetros de maior interesse, haja vista que uma comparação entre eles pode levar a decisão entre utilizar uma carga do tipo *big hole* ou *deep penetration*. Para avaliar a influência destes fatores na produtividade do poço, analisa-se a variação desses com a vazão ou com o índice de produtividade. Assim, por meio de simulações, variando as densidades de carga de 1 a 6 *spf* e com o diâmetro de entrada assumindo valores entre 0,1 e 1,0 in e a profundidade do túnel entre 3 e 80 in, pode-se ponderar a importância de cada parâmetro no projeto do poço.

A obtenção da relação entre a razão de produtividade, o diâmetro do túnel na rocha e a profundidade do túnel para as seis densidades de carga permite a avaliação de quão relevante são os parâmetros estudados no aumento da produtividade e, principalmente, a análise comparativa entre a utilização de túneis com grandes profundidades e túneis com elevado diâmetro de entrada.

Analisando as Figuras 9 e 10, quando se considera a densidade de carga, verifica-se que há um aumento considerável na produtividade à medida que se eleva a densidade de tiros por pé, independentemente do parâmetro que está sendo estudado.

Observa-se também que tanto o diâmetro do túnel na rocha quanto a profundidade do túnel têm sua ação significativamente aumentada na razão de índice de

produtividade quando seus valores aumentam, confirmando a influência destes parâmetros.

A partir dos gráficos, pode-se observar que para uma mesma densidade de carga, a profundidade do túnel (Figura 9) influencia de maneira muito mais intensa a produtividade do que o diâmetro do túnel na rocha (Figura 10). Com base nesses resultados, poder-se-ia concluir que, para os tipos de cargas existentes no mercado, as cargas *deep penetration* são mais eficientes para aumentar a produtividade, visto que conferem maiores profundidades no túnel, do que as *big hole*, ao passo que estas atribuem maiores diâmetros de entrada.

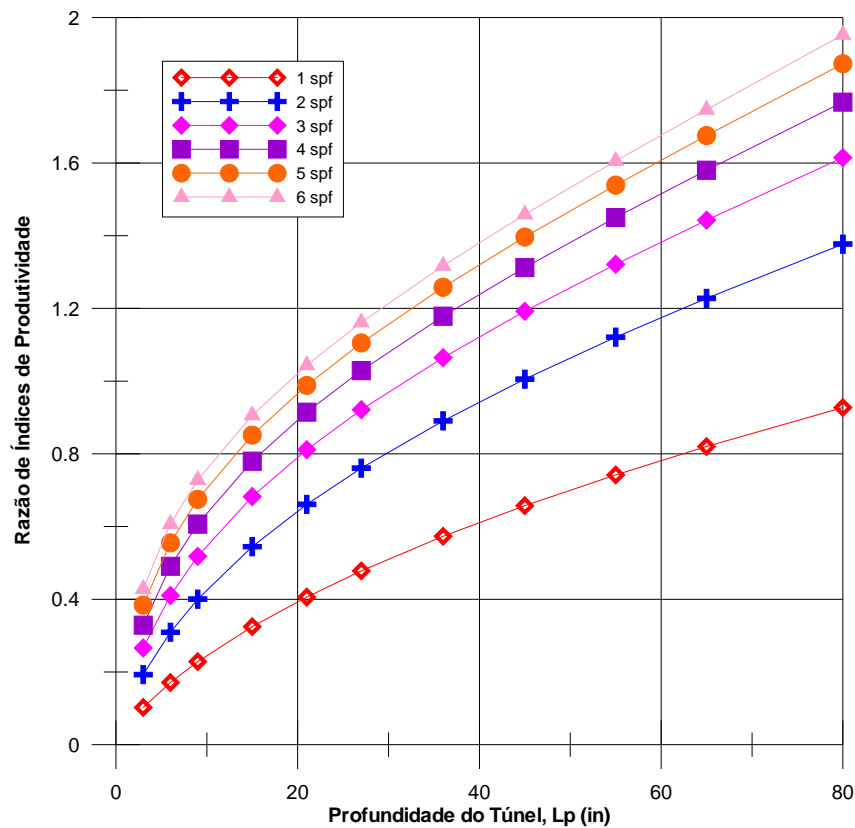


Figura 9 - Razão de Produtividade (PR) versus Profundidade do Túnel (L_p).

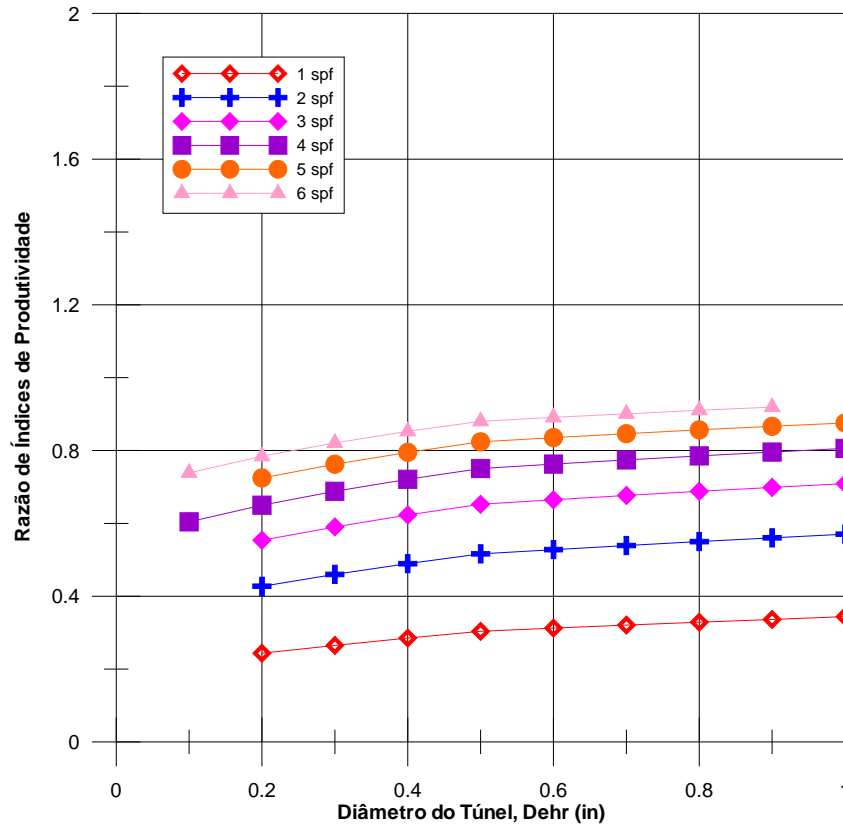


Figura 10 - Razão de Produtividade (PR) versus Diâmetro do Túnel na Rocha (D_{ehr}).

Ao final do estudo paramétrico, os parâmetros mais importantes são selecionados e serão as variáveis livres da otimização, como será observado mais a frente. Apesar de alguns parâmetros não obterem variação significativa com a produtividade, essas variáveis foram selecionadas a fim de tornar completa a representação da geometria do canhoneado. Os parâmetros estão relacionados e divididos de acordo com a Tabela 2:

Tabela 2 – Escolha dos parâmetros livres do modelo de otimização.

Variáveis Fixas			
Parâmetros Geométricos		Parâmetros Físicos	
L_f	Extensão do tip	k_z/k_{xy}	Anisotropia
r_w	Raio do poço	k_r	Permeabilidade da rocha
r_e	Raio externo	k_f	Permeabilidade dano da formação
h	Altura do reservatório	k_c	Permeabilidade dano do canhoneio
e_{cs}	Espessura do revestimento	k_t	Permeabilidade do túnel
		p_w	Pressão interna
e_{cm}	Espessura da cimentação	p_e	Pressão externa
		μ	Viscosidade do fluido
Variáveis Livres			
Parâmetros Geométricos			
spf	Densidade de tiros		
L_p	Comprimento do túnel		
D_{ehr}	Diâmetro do túnel na rocha		
D_{eh}	Diâmetro do túnel no revestimento		
D_{ehf}	Diâmetro do tip		
e_c	Espessura do dano do canhoneio		

7 - CONCEITOS DE OTIMIZAÇÃO

No projeto de um poço de petróleo existe a preocupação de maximizar o desempenho da operação, minimizando os custos. Desta forma, no processo de canhoneio é preciso utilizar o procedimento que eleve ao máximo a produtividade. Contudo, determinar a melhor estratégia de produção é um processo complexo, visto que há um grande número de variáveis envolvidas. No procedimento do canhoneio os fatores que regem são as propriedades geométricas, físicas, condições operacionais e cenário econômico.

Desta forma, observa-se a importância de estudos paramétricos para determinar quais variáveis efetivamente influenciam no desempenho do poço de petróleo, a fim de obter informação de como atingir a maximização da produção, reduzindo os riscos na tomada de decisão e diminuindo o tempo computacional.

Uma vez considerados os parâmetros relevantes, pode-se abordar a metodologia utilizada para o modelo de síntese e otimização, ferramenta que auxilia na determinação do valor ótimo, a qual é baseada em Algoritmos Genéticos¹.

7.1 Otimização

No processo de otimização pretende-se encontrar a solução ótima dentro de um conjunto de soluções, normalmente sujeitas a restrições. Para isso, certos conceitos e definições são imprescindíveis para o entendimento da modelagem, sendo estes descritos abaixo, utilizando como referencial MATTA (2007) e LIMA (2008):

- Função Objetivo: Representa o valor a ser otimizado podendo ser maximizado ou minimizado dependendo do modelo;
- Variáveis de Projeto: São os parâmetros que afetam o valor da função objetivo e que serão alteradas para a solução do problema;

¹ Técnica de busca aleatória direcionada, desenvolvida por HOLLAND (1975), capaz de obter a solução ótima num espaço de busca complexo.

- Restrições: São funções que restringem os valores que podem ser atribuídos às variáveis de projeto, limitando as soluções através de igualdades ou desigualdades;
- Espaço de Busca: Compreende a região das soluções viáveis ou possíveis do problema a ser otimizado, sendo caracterizada pelas funções de restrição.

Assim é possível modelar um problema complexo com inúmeras variáveis com o objetivo de atender as necessidades de projeto e atingir o ponto ótimo. Adicionalmente, para alcançar a esse valor, é utilizada uma técnica de busca, que no presente trabalho aplica o modelo de Algoritmos Genéticos.

7.2 Algoritmos Genéticos

A técnica de busca denominada Algoritmo Genético tem como inspiração a teoria da evolução natural de Darwin e tem a função de achar o ponto ótimo do problema a ser estudado.

A metodologia seleciona os indivíduos mais adaptados para reprodução e geração de descendentes até atingir o ótimo. Desta forma, durante a reprodução, características dos pais são passadas aos filhos que por sua vez podem sofrer mutações, gerando novos traços. Posteriormente, no processo da seleção natural, ocorre a escolha dos indivíduos mais adaptados. Prosseguindo nesse processo ao longo do tempo gerando populações com diferentes atributos, sendo os mais aptos perpetuados.

No processo de seleção natural o indivíduo mais adaptado sobrevive por mais tempo, sendo as características, codificadas em genes, transmitidas para os filhos, se propagando nas gerações futuras.

Vale destacar que o Algoritmo Genético é uma ferramenta de busca robusta, apresentando um bom desempenho para uma gama de problemas, além de dispensar uma formulação matemática precisa do problema.

Contudo, o algoritmo pode apresentar algumas dificuldades na representação do indivíduo, bem como possuir uma evolução demorada para alguns problemas.

7.2.1 Conceitos Básicos

O modelo de Algoritmos Genéticos compreende algumas terminologias, que serão apresentadas para o entendimento da abordagem do problema, adotando como referencial MATTA (2007) e LIMA (2008), conforme exposto abaixo:

- Geração: Representa o número da iteração que o Algoritmo Genético está executando, sendo um ciclo de criação e de transformação de uma população;
- População: Compreende o conjunto de indivíduos (soluções) de um problema;
- Indivíduo: É um membro da população, formado por um cromossomo e sua aptidão, representando uma solução candidata do problema;
- Cromossomo: Representa a estrutura que codifica uma solução, sendo a cadeia de dados que contém informações relativas às variáveis do problema;
- Gene: Descreve os caracteres de um parâmetro formando a unidade elementar do cromossomo;
- Alelo: Significa o valor assumido por um gene;
- Genótipo: Simboliza a informação contida no cromossomo, representando a estrutura de dados de uma solução candidata;
- Fenótipo: É a decodificação do genótipo no espaço de busca;
- Aptidão: Mede a capacidade de sobrevivência de um cromossomo no processo evolutivo, e conseqüentemente a probabilidade dele se reproduzir.

Descritas essas terminologias, é possível apresentar as operações genéticas, que são realizadas sobre os cromossomos, a fim de contemplar grande parte do espaço de busca para chegar ao ótimo global do problema. Assim, os principais operadores são:

- Seleção: Permite escolher os indivíduos que servirão como pais no processo de reprodução, para gerar descendência, sendo a sobrevivência preterida aos menos aptos;

- Cruzamento ou *Crossover*: Gera novos indivíduos a partir da combinação aleatória dos genes de outros cromossomos. Essa troca entre ancestrais tem o objetivo de determinar a carga genética dos descendentes;
- Mutação: Realiza modificações aleatórias no gene de alguns cromossomos, a fim de garantir a diversidade entre os indivíduos, sendo aplicado após os processos de seleção e cruzamento.

7.2.2 Composição dos Algoritmos Genéticos

A estrutura do Algoritmo Genético assemelha-se a um processo evolutivo natural, no qual as informações são compiladas em cromossomos. Sendo assim, para representar essa evolução é necessário codificar as variáveis relacionadas, construir a população inicial do modelo, avaliar os indivíduos, aplicar as operações de cruzamento e mutação e selecionar os mais aptos.

O esquema representativo do Algoritmo Genético básico está mostrado na Figura 11 e apresenta o fluxograma do processo, que é iniciado pela população de indivíduos gerados aleatoriamente, a partir da qual é avaliado o desempenho de cada um, sendo os melhores selecionados para gerar descendência. A partir da avaliação de aptidão, inicia-se um ciclo que é interrompido por um critério de parada ou recomeçado com outra geração. Neste circuito selecionam-se os pares para o cruzamento, realiza-se o cruzamento e a mutação e, por fim, é avaliada a aptidão da nova geração, para então selecionar os mais aptos.

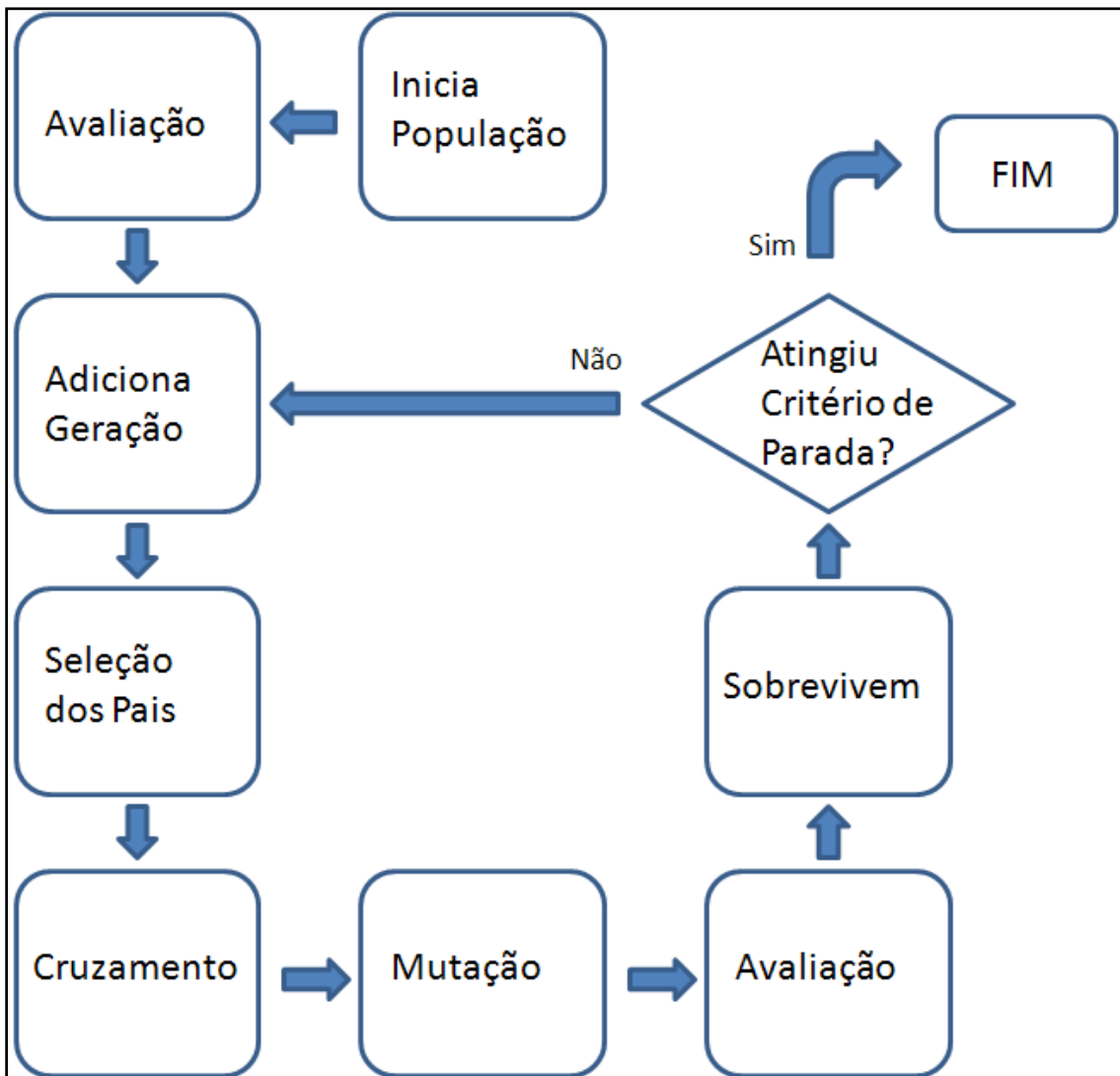


Figura 11 - Esquema representativo do Algoritmo Genético básico.

7.2.2.1 População e Avaliação

O cromossomo codifica uma solução do problema, representando um indivíduo da população. Desta forma, quanto maior a quantidade de cromossomos, maior a diversidade de soluções encontradas para o problema, entretanto maior o tempo computacional exigido. Isso ocorre, pois para cada indivíduo é necessário avaliar a aptidão.

A função de aptidão tem a função de qualificar cada indivíduo da população para então selecionar os que sobreviverão e serão utilizados para reprodução. Para problemas de otimização, a função *fitness* pode ser igual à função objetivo, um resultado de seu

escalonamento ou baseada no ranking do indivíduo da população, estando ambas sempre relacionadas (LIMA, 2008).

7.2.2.2 Seleção

A operação de seleção tem como objetivo preservar a sobrevivência dos indivíduos mais aptos da população para reprodução, direcionando a evolução do algoritmo. Para isso os principais métodos de seleção são Roda da Roleta e o Torneio.

No método da Roleta, aplicado no presente trabalho, a população é distribuída na roda de acordo com a aptidão, sendo a área disponível ajustada à aptidão do indivíduo que ela representa. Desta forma, a probabilidade do ponteiro parar em um número é proporcional a fatia da roleta, ou seja, a probabilidade do indivíduo ser escolhido será proporcional à sua aptidão.

No procedimento do Torneio, os indivíduos são selecionados aleatoriamente e posteriormente comparados entre eles, sendo o melhor indivíduo escolhido para a população intermediária. Em geral, a triagem é feita entre dois ou três indivíduos, não sendo necessário o *ranking* da população.

7.2.2.3 Cruzamento

O operador cruzamento é utilizado após a seleção e tem como objetivo a propagação das características dos indivíduos mais aptos da população através da troca de material genético. Esta operação gera novos indivíduos a partir de indivíduos promissores, podendo aqueles serem melhores ou piores.

No cruzamento, é aplicada uma taxa de *crossover* (p_c), a qual define se haverá ou não troca de segmentos entre os cromossomos selecionados. Essa probabilidade geralmente é elevada, variando de 0,5 a 1,0 (LIMA, 2008), e para que ocorra o cruzamento entre os pares é necessário que o número aleatório associado a eles seja menor que a p_c .

A partir disso, decide-se o ponto de corte onde ocorrerá a troca de genes, sendo necessária a geração de um número aleatório inteiro entre 1 e (l_c-1) , onde l_c representa o comprimento do cromossomo, para representar o local de manipulação de bits.

Os tipos de reprodução mais comuns em algoritmos genéticos são:

- Simples (um ponto de cruzamento);
- Múltiplo (mais de um ponto de corte);
- Uniforme (máscara).

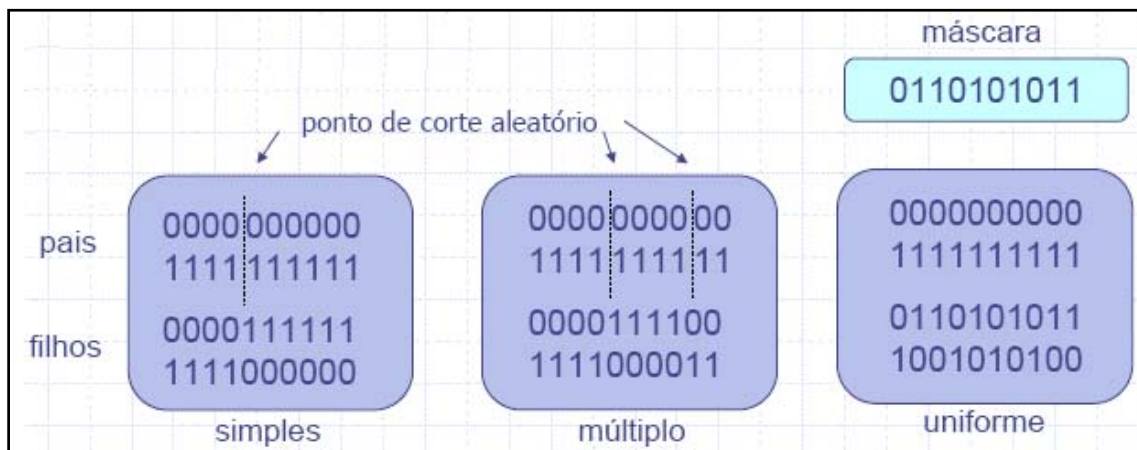


Figura 12 – Tipos de *Crossover*. (Fonte: LIMA, 2008)

Na Figura 12 podem-se observar cromossomos compostos por dez genes com caracteres de binários, ilustrando os tipos de reprodução mais corriqueiros. O cruzamento simples possui um único ponto de quebra, que é escolhido aleatoriamente e permite a troca de informação genética entre os cromossomos a partir deste ponto. Já a reprodução múltipla é análoga ao cruzamento simples, e está representada na Figura 12 com dois pontos de corte (quatro e oito), sendo a troca de segmentos realizada a partir desses dois pontos. Por último, o *crossover* uniforme é efetuado a partir de uma máscara aleatória de cruzamento, na qual cada gene do descendente é criado através da cópia de um gene dos pais. Assim, onde houver 1 na máscara de cruzamento, o gene correspondente será copiado do primeiro pai e onde houver 0 será copiado do segundo, repetindo o processo com os pais trocados para produzir o segundo descendente (MATTA, 2007).

7.2.2.4 Mutação

O operador de muta o substitui um alelo de um gene por outro, aleatoriamente, resultando em um novo cromossomo. A finalidade deste processo   melhorar a diversidade da popula o, possibilitando uma maior varredura do espaço de busca e impedindo problemas de convergência prematura.

O processo ocorre logo após o cruzamento e, no caso de codifica o binária, inverte o valor de um dado bit de um indivíduo descendente, com certa probabilidade, conforme explicitado na Figura 13. Esta probabilidade   uma taxa de muta o (p_m) e somente aqueles indivíduos que tiverem um numero aleatório associado menor que a p_m podem ser alvo desse processo. Vale ressaltar que a p_m tem baixa probabilidade para não tornar o processo por demasiado aleatório, sendo o valor recomendado entre 0,1% e 5% (LIMA, 2008).

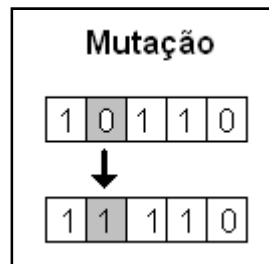


Figura 13 – Processo de Muta o.

7.2.2.5 Sobrevivência

O procedimento de sobrevivência visa   substitui o dos cromossomos depois da gera o da popula o de descendentes, sendo necessário escolher quem permanecerá na evolu o. Dentre os métodos disponíveis, os principais são o Geracional, o Elitista e o *Steady-State*.

O método Geracional substitui toda a popula o pelos descendentes em cada gera o. Na estratégia Elitista, preservam-se os melhores indivíduos da gera o, garantindo que apareçam na gera o seguinte. Assim, caso a elite não esteja na próxima gera o, devido aos operadores genéticos, os piores indivíduos são substituídos pelos elementos ausentes. Além disso, vale destacar que o número de indivíduos que

constituem a elite deve ser limitado, para evitar problemas de convergência prematura, sendo geralmente utilizado apenas o melhor indivíduo (LIMA, 2008). Por fim a substituição *Steady-State* gera um ou dois descendentes por vez. Estes substituem os piores cromossomos, assim não há população intermediária. Entretanto, só insere o indivíduo na população se possuir aptidão maior que a média populacional, gerando um custo operacional adicional, já que é necessário reordenar os indivíduos e recalcular a aptidão média.

7.2.2.6 Critério de Parada

Gerada a nova população, testa-se o algoritmo para verificar se o critério de parada foi atingido, caso contrário repete-se o processo até atingir um ponto satisfatório. Contudo, nem sempre se pode afirmar que esse ponto satisfatório representa o ótimo global, principalmente quando o critério de parada corresponde a um número máximo de gerações ou avaliações ou ainda um tempo limite de processamento.

Outra forma de parar o processo é quando o algoritmo não evolui, não havendo melhoria no valor da aptidão do melhor indivíduo ou da média da população depois de várias gerações consecutivas. Ou ainda, pode-se utilizar, como critério de convergência, interromper o processo quando a média da população se aproximar do valor do melhor indivíduo.

Além disso, pode-se utilizar uma combinação destes critérios para garantir que o processo não seja interrompido antes de um valor plausível, ou então que o processo prossiga por gerações que não evoluem.

8 - IMPLEMENTAÇÃO DA OTIMIZAÇÃO

O objetivo do desenvolvimento de uma ferramenta computacional de síntese e otimização, aplicada a procedimentos de canhoneio de petróleo, é atingir a configuração ótima do processo, a fim de obter maior ganho na produtividade, sendo de grande valia para a gestão de operações de canhoneio, podendo ser aplicado à tomada de decisão de projetos de completção.

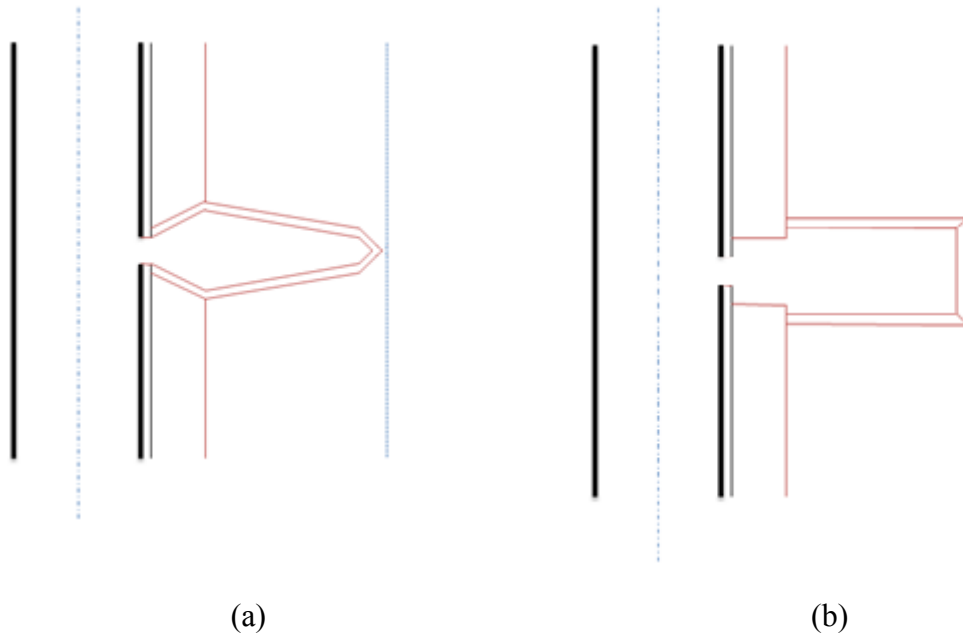
Empregando Algoritmos Genéticos é possível obter uma solução ótima num espaço de busca complexo, avaliando a influência de cada parâmetro na produção de um poço canhoneado. Desta forma, foi formulada uma solução analítica para o cálculo da vazão no canhoneado, a partir de uma analogia da Lei de Darcy para fluxo em meios porosos com transferência de calor e resistências térmicas. Essa função foi validada a partir dos resultados obtidos pelo modelo numérico e possui a vantagem de exigir menos esforço computacional, reduzindo o tempo de análise. Adicionalmente, adotaram-se restrições da geometria dos canhoneados e de parâmetros de permeabilidade para obter resultados coerentes com a realidade.

8.1 Função Objetivo: Modelo Analítico de Fluxo no Canhoneado

Recordando que o principal objetivo do procedimento de otimização é maximizar a produção, na montagem da ferramenta deve-se, portanto, contar com um método de avaliação dos indivíduos (ou configurações candidatas no processo de otimização), cada um deles caracterizado por um conjunto de valores para os parâmetros de entrada do modelo.

Para o desenvolvimento, calibração e testes da ferramenta de otimização, é necessário contar com um método de avaliação mais rápido e expedito. Para tanto, foi formulada uma função analítica que requer muito menos esforço computacional.

Para a formulação analítica do cálculo da vazão em meio poroso, representado pela Figura 14 (a), foi necessário simplificar o problema, aproximando a geometria do canhoneado para cilindro de mesma área lateral, como ilustrado na Figura 14 (b).



(a) Esquema de um canhoneado.
 (b) Aproximação do canhoneado por um cilindro.

Para formular o problema, foi feita uma analogia entre o fluxo no meio poroso e o fluxo térmico, gerando um sistema de resistências elétricas em série e em paralelo. Para tanto, foi utilizada a Lei de Darcy para fluxo linear e radial; equações (16) e (20).

A equação de condução de calor unidimensional em regime estacionário para parede plana é dada por:

$$q_x = \frac{k_{tm}A}{L} \Delta T \quad (23)$$

e, para sistema radial, por:

$$q_r = \frac{2k_{tm}\pi L}{\ln(r_2/r_1)} \Delta T \quad (24)$$

onde q_x e q_r são as taxas de transferência de calor, k_{tm} é a condutividade térmica, A representa a área normal à direção da transferência de calor, L é o comprimento

característico, T é a temperatura e r_1 e r_2 são os raios interno e externo do cilindro, respectivamente (INCROPERA *et al.*, 1998).

Assim, a resistência térmica para parede plana é dada por:

$$R_t = \frac{L}{k_{tm}A} \quad (25)$$

e, para sistema radial, tem-se:

$$R_t = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2k_{tm}\pi L} \quad (26)$$

A resistência ao fluxo linear é dada por:

$$R_f = \frac{L\mu}{kA} \quad (27)$$

e, para fluxo radial, tem-se:

$$R_f = \frac{\mu \ln(r_e/r_w)}{2k\pi h} \quad (28)$$

Portanto, comparando as equações, temos que:

$$R_f = R_t \cdot \mu \quad (29)$$

Com isso, obtemos a função simplificada para a vazão:

Para calcular R_f , o esquema do canhoneado foi dividido em áreas, conforme mostrado na Figura 15.

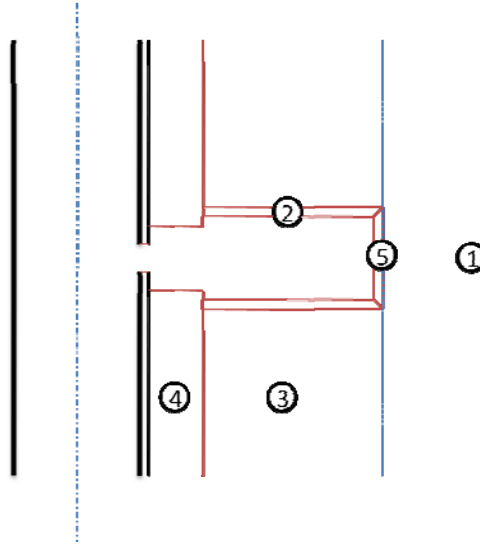


Figura 15 - Divisão do canhoneado em áreas.

Na Figura 15, 1 representa a rocha virgem depois do túnel, 2 a área lateral do dano do túnel, 3 a rocha virgem ao lado do canhoneado, 4 a área de dano do poço e 5 a área da base do dano do túnel.

Para cada transição de área foi calculada uma resistência ao fluxo, como descrito a seguir:

- A resistência R_{1-3} representa um fluxo radial varrendo horizontalmente o reservatório, desde o raio externo até o início da rocha virgem abaixo da área canhoneada na espessura da altura do passo de cada furo excluindo o túnel e o dano do canhoneado.
- A resistência R_{1-5} representa um fluxo radial varrendo horizontalmente o reservatório, desde o raio externo até a ponta do canhoneado na espessura do túnel incluindo o dano do canhoneado.

- A resistência R_{3-2} representa um fluxo radial varrendo verticalmente o reservatório, desde a altura total do passo de cada furo até o dano do canhoneado na espessura do túnel incluindo o dano do canhoneado.
- A resistência R_{3-4} representa um fluxo radial varrendo horizontalmente o reservatório, desde a rocha virgem abaixo da área canhoneada até a área de dano do poço na espessura da altura do passo de cada furo excluindo o túnel e o dano do canhoneado.
- A resistência R_{2-C} representa um fluxo radial varrendo verticalmente o reservatório, desde a espessura do dano do canhoneado até o interior do túnel na espessura do túnel.
- A resistência R_{4-C} representa um fluxo radial varrendo verticalmente o reservatório, desde a altura total do passo de cada furo até o interior do túnel na espessura do dano do poço.
- A resistência R_{5-C} representa um fluxo linear varrendo horizontalmente o reservatório, desde a espessura do dano do canhoneado até o interior do túnel na espessura do túnel incluindo o dano do canhoneado.

A seguir apresentam-se as expressões correspondentes a estas quantidades:

$$R_{1-3} = \frac{\mu}{spf} \frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_w + e_{cs} + e_{cm} + L_p + L_f + e_c}\right)}{k_r 2\pi \left(\frac{h}{spf} - \left(\frac{D_{ehr} + D_{ehf}}{2}\right) - 2e_c\right)} \quad (31)$$

$$R_{1-5} = \frac{\mu}{spf} \frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_w + e_{cs} + e_{cm} + L_p + L_f + e_c}\right)}{k_r \frac{2\pi}{spf} \left(\left(\frac{D_{ehr} + D_{ehf}}{2}\right) + 2e_c\right)} \quad (32)$$

$$R_{3-2} = \frac{\mu}{spf} \frac{\ln\left(\frac{h/2spf}{\left(\frac{D_{ehr} + D_{ehf}}{4}\right) + e_c}\right)}{k_r 2\pi (L_p + L_f + e_c)} \quad (33)$$

$$R_{3-4} = \frac{\mu}{spf} \frac{\ln\left(\frac{r_w + e_{cs} + e_{cm} + L_p + L_f + e_c}{r_w + e_{cs} + e_{cm}}\right)}{k_r 2\pi \left(\frac{h}{spf} - \left(\frac{D_{ehr} + D_{ehf}}{2}\right) - 2e_c\right)} \quad (34)$$

$$R_{2-C} = \frac{\mu}{spf} \frac{\ln\left(\frac{\left(\frac{D_{ehr} + D_{ehf}}{4}\right) + e_c}{\left(\frac{D_{ehr} + D_{ehf}}{4}\right)}\right)}{k_c 2\pi (L_p + L_f)} \quad (35)$$

$$R_{4-C} = \frac{\mu}{spf} \frac{\ln\left(\frac{h/2spf}{\left(\frac{D_{eh} + D_{ehr}}{4}\right)}\right)}{k_f 2\pi e_{cm}} \quad (36)$$

$$R_{5-C} = \frac{\mu}{spf} \frac{e_c}{k_c \pi \left(\frac{D_{ehr} + D_{ehf}}{4}\right)^2} \quad (37)$$

onde:

R_{1-3} = Resistência ao fluxo da área 1 para a área 3;

R_{1-5} = Resistência ao fluxo da área 1 para a área 5;

R_{3-2} = Resistência ao fluxo da área 3 para a área 2;

R_{3-4} = Resistência ao fluxo da área 3 para a área 4;

R_{2-C} = Resistência ao fluxo da área 2 para o canhoneado;

R_{4-C} = Resistência ao fluxo da área 4 para o canhoneado;

R_{5-C} = Resistência ao fluxo da área 5 para o canhoneado;

D_{eh} = Diâmetro de entrada no revestimento;

D_{ehr} = Diâmetro do túnel na rocha;

D_{ehf} = Diâmetro do *tip*;

e_c = Espessura do dano do canhoneio;

e_{cs} = Espessura do revestimento;

e_{cm} = Espessura da cimentação;

L_p = Profundidade do túnel;

L_f = Extensão do *tip*;

k_r = Permeabilidade da rocha virgem;

k_f = Permeabilidade do dano da formação;

k_c = Permeabilidade do dano do canhoneio;

spf = Densidade de tiros por pé.

Com isso, foi montada uma malha de resistências, como mostra a Figura 16.

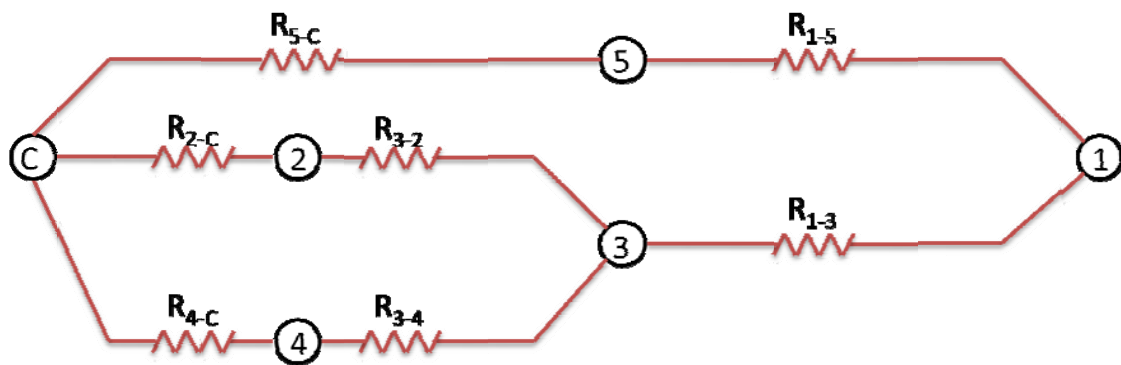


Figura 16 - Malha de resistências representativa do fluxo em meio poroso.

A resistência R_f é, portanto, dada pela resistência equivalente deste sistema:

$$R_f = \frac{(R_{5-C} + R_{1-5}) \left[\frac{(R_{2-C} + R_{3-5})(R_{4-C} + R_{3-4})}{R_{2-C} + R_{3-5} + R_{4-C} + R_{3-4}} + R_{1-3} \right]}{\left[\frac{(R_{2-C} + R_{3-5})(R_{4-C} + R_{3-4})}{R_{2-C} + R_{3-5} + R_{4-C} + R_{3-4}} \right] + R_{1-3} + R_{5-C} + R_{1-5}} \quad (38)$$

Desta forma, pode-se calcular a vazão do poço de forma analítica, Equação (38), considerando a geometria do túnel gerado pelo processo de canhoneio.

Para validar esta formulação, podem-se empregar os resultados obtidos pelos estudos paramétricos, utilizando o solver MSC.MARC de elementos finitos. Na Tabela 3 são apresentados o resultado da simulação do modelo padrão no MSC.MARC, bem como a solução obtida pela função analítica para esses dados.

Observa-se que há uma aproximação razoável entre os resultados, o que permite concluir que a função analítica pode ser utilizada para representar pelo menos qualitativamente o comportamento do problema de fluxo no canhoneado.

Tabela 3 – Validação do modelo analítico para 1spf.

Vazão do MSC.MARC	Vazão da Função Analítica	Discrepância (%)
1721,97 in ³ /d	1882,06 in ³ /d	9,3%
0,1774 bbl/d	0,1939 bbl/d	9,3%

8.2 Restrições

Associadas à função objetivo, as restrições têm o papel de limitar o espaço de busca impedindo que indivíduos não representativos do processo de canhoneio sejam solução do problema, ou seja, visam evitar, durante evolução do algoritmo genético, o surgimento de indivíduos ou valores de parâmetros que não sejam factíveis.

As restrições dizem respeito à geometria do canhoneado e às propriedades físicas da rocha, além das regiões de dano do canhoneio, como será descrito a seguir.

8.2.1 Restrições dos Parâmetros Geométricos

Com relação à geometria do canhoneado, é necessário observar a dimensão dos diâmetros envolvidos no processo. Desta forma, deve-se garantir que os diâmetros de entrada no revestimento (D_{eh}) e no *tip* (D_{ehf}) sejam menores que o diâmetro na rocha (D_{ehr}), conforme mostrado na Figura 8, a fim de não gerar canhoneados destorcidos da realidade.

Destaca-se que, para evitar sobreposição dos túneis dos canhoneados, foi estipulado que o número de tiros por pé (*spf*) multiplicado pelo diâmetro na rocha (D_{ehr}) não pode extrapolar o perímetro do poço e a altura do passo (h), conforme explicitado nas equações (39) e (40).

$$SPF * D_{ehr} < 2 * \pi * D_w / 2 \quad (39)$$

$$SPF * D_{ehr} < h \quad (40)$$

Outro fator a ser considerado é o raio externo do reservatório (r_e), que deve ser maior que o raio do poço (r_w) acrescentado ao comprimento do túnel (L_p) e do *tip* (L_f), para haver coerência em relação ao raio de drenagem do reservatório.

Além disso, ainda há uma última consideração em relação à geometria dos canhoneados no que tange a espessura do dano do canhoneio (e_c), visto que este deve ser menor que o diâmetro do túnel na rocha (D_{ehr}).

8.2.2 Restrições nos Parâmetros de Físicos

Com relação à restrição de permeabilidade, deve-se respeitar a relação em que a permeabilidade do túnel (k_t) deve ser maior que a da rocha (k_r), equação (41), que por sua vez deve ser maior que a dos danos do canhoneio (k_c), equação (42), e da formação (k_f), equação (43).

$$k_r < k_t \quad (41)$$

$$k_r > k_c \quad (42)$$

$$k_r > k_f \quad (43)$$

8.3 Modelo de Síntese e Otimização

O modelo de síntese e otimização é de grande valia para a gestão de operações de canhoneio, uma vez que selecionando a carga adequada, pode-se obter maior ganho na produtividade.

Para a estruturação deste modelo, utilizou-se Algoritmos Genéticos como método de otimização, sendo a função de avaliação calculada pela formulação analítica, a qual avalia a vazão no canhoneado, a partir de uma analogia da Lei de Darcy para meios porosos com transferência de calor e resistências térmicas, conforme explicado anteriormente. Adicionalmente, foram aplicadas restrições de parâmetros geométricos e físicos para obter resultados coerentes com a realidade.

Outro fator que vale destacar é a representação do cromossomo, o qual varia de acordo com o número de variáveis livres, sendo um esquema representativo apresentado na Figura 17. É importante salientar que o espaço reservado para cada parâmetro varia de acordo com o tamanho do gene, sendo delimitado pelo valor máximo da variável em bits.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1.	Diâmetro externo do reservatório																
2.	Diâmetro do poço																
3.	Altura do passo																
4.	Num. Furos por Pé																
5.	Diâmetro de entrada no revestimento																
6.	Diâmetro do túnel na interface cimentação/reservatório																
7.	Diâmetro final do túnel																
8.	Espessura do dano do canhoneio																
9.	Espessura do revestimento																
10.	Espessura da cimentação																
11.	Comprimento do túnel																
12.	Comprimento da ponta do túnel (tip)																
13.	Permeabilidade da rocha																
14.	Permeabilidade do revestimento																
15.	Permeabilidade do dano																
16.	Permeabilidade do túnel																
17.	Pressão interna																
18.	Pressão externa																

Figura 17 – Representação do cromossomo.

8.3.1 Estudos de Caso

Foram estudados dois casos para a exemplificação do modelo, tendo o primeiro a finalidade de apresentar o algoritmo e o segundo de comparar os resultados obtidos através da função analítica e a partir do programa de elementos finitos apresentado por MATTA (2007).

8.3.1.1 Estudo de Caso 1

Para o caso estudado, fez-se a otimização de todas as variáveis envolvidas no processo de canhoneio para ilustrar o funcionamento da ferramenta. Assim foram

selecionados todos os parâmetros envolvidos, conforme ilustra a Figura 18, podendo-se notar que a coluna “Melhor” representa o valor ótimo da variável.

Vale ressaltar que os parâmetros envolvidos na configuração da malha, que se aplicam ao modelo utilizando elementos finitos, e a anisotropia, que não é considerada na função analítica, não são otimizados.

Otimização - Algoritmo Genético						
Modelos : RISEP ANCORAGEM CANHONEIO FUNÇÕES						
Variáveis de Projeto e Restrições		Parâmetros de Síntese e Otimização		Parâmetros de Análise e Avaliação		Convergência e Resultados
Canhoneio :						
	Min	Máx	Precisão	Ind. de Custo	Melhor	Ativa
Diametro Externo do Reservatório	500	1000	1	1	535,23	<input checked="" type="checkbox"/>
Espessura da Parede de Rocha	11,05	18,53	1	1	16,39	<input checked="" type="checkbox"/>
Diametro do Poço	7	9,5	1	1	8,67	<input checked="" type="checkbox"/>
Altura do Passo	1	3	1	1	3,00	<input checked="" type="checkbox"/>
NUM. Total de Voltas	1				1	<input type="checkbox"/>
Num. Furos por Pé	1	6	1	1	6,00	<input checked="" type="checkbox"/>
Diametro de entrada no revestimento	0,5	1	0,01	1	0,52	<input checked="" type="checkbox"/>
Diametro do túnel na interface cimentação/reservatório	0,7	1	0,01	1	0,72	<input checked="" type="checkbox"/>
Diametro final do túnel	0,1	0,7	0,01	1	0,62	<input checked="" type="checkbox"/>
Espessura do dano do canhoneio	0,1	0,7	0,01	1	0,10	<input checked="" type="checkbox"/>
Espessura do revestimento	0,1	0,5	0,01	1	0,22	<input checked="" type="checkbox"/>
Espessura da cimentação	0,1	0,5	0,01	1	0,35	<input checked="" type="checkbox"/>
Comprimento do túnel	3	65	1	1	63,03	<input checked="" type="checkbox"/>
Comprimento da ponta do túnel(tip)	0,1	0,7	0,01	1	0,57	<input checked="" type="checkbox"/>
Permeabilidade da rocha	0,1	0,5	0,01	1	0,50	<input checked="" type="checkbox"/>
Permeabilidade do revestimento	0,01	0,3	0,01	1	0,19	<input checked="" type="checkbox"/>
Permeabilidade do dano	0,001	0,1	0,001	1	0,09	<input checked="" type="checkbox"/>
Permeabilidade do túnel	10000	100000	1	1	76036,58	<input checked="" type="checkbox"/>
Anisotropia	0,0001				0,0001	<input type="checkbox"/>
Pressão interna	300	500	1	1	302,35	<input checked="" type="checkbox"/>
Pressão externa	600	800	1	1	796,86	<input checked="" type="checkbox"/>
Grau de refinamento	1				1	<input type="checkbox"/>

Figura 18 – Variáveis otimizadas do caso 1.

Adicionalmente, observam-se na Figura 19 os parâmetros utilizados no processo de síntese do Algoritmo Genético, como o tamanho da população, as probabilidades dos operadores genéticos, o mecanismo de seleção e o critério de parada.

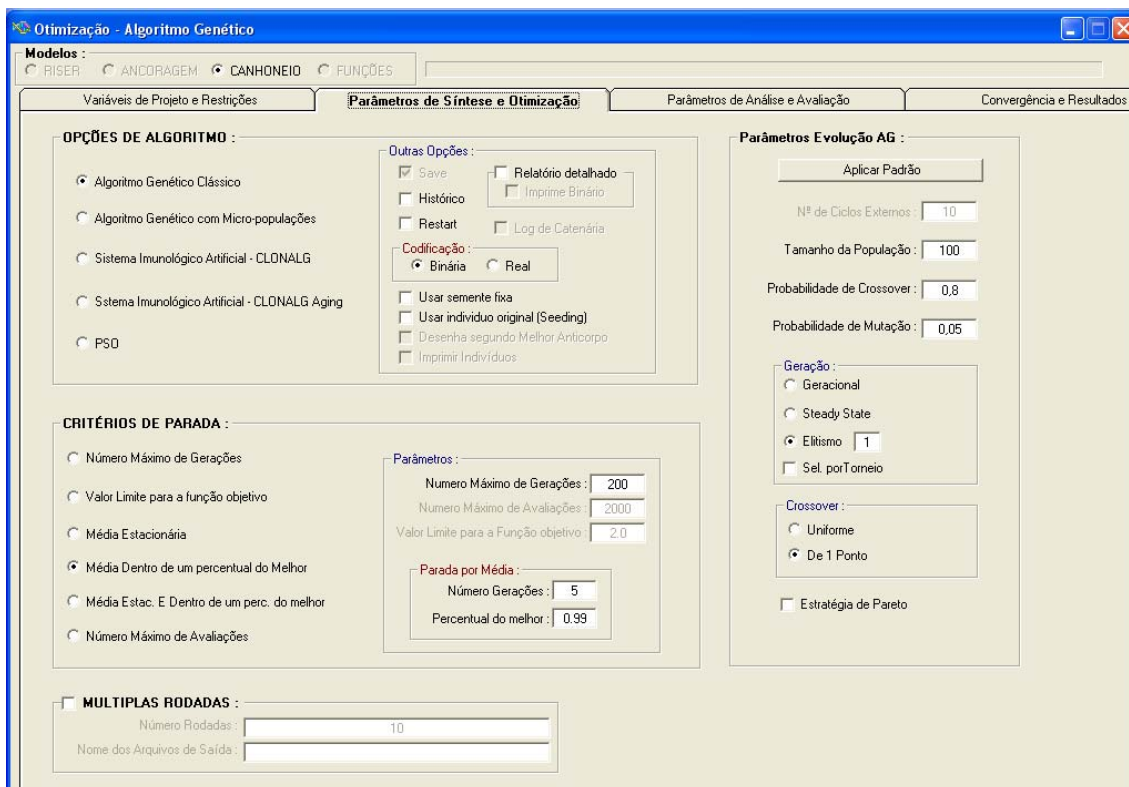


Figura 19 – Parâmetros da otimização do caso 1.

O resultado, apresentado pela Figura 20, reproduz a evolução do algoritmo utilizando a função analítica. Pode-se notar que o algoritmo evoluiu satisfatoriamente para ótimo com a vazão de 2425,55 in³/d (0,2498 bbl/d). Outro fator destacável é o número de gerações em que o algoritmo evoluiu e o tempo de simulação:

- Tempo total de simulação : 00:00:59
- Número total de avaliações da função: 1818
- Número de gerações: 26

Outros dados a respeito da evolução do algoritmo podem ser observados no Anexo A.

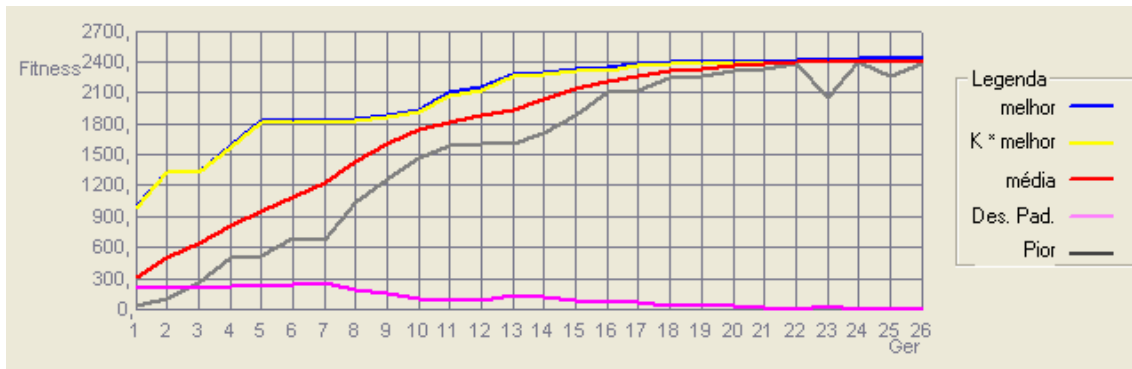


Figura 20 – Evolução do algoritmo do caso 1.

8.3.1.2 Estudo de Caso 2

O presente estudo de caso visa comparar os resultados obtidos pela função analítica com os encontrados por MATTA (2007), que calculou a função objetivo através do MSC.MARC.

Desta forma, as variáveis otimizadas foram os parâmetros escolhidos como variáveis livres na

Tabela 2: o número de tiros por pé (spf), o comprimento do túnel (L_p), diâmetro de entrada no revestimento (D_{eh}), diâmetro no reservatório (D_{ehr}), diâmetro final do túnel (D_{ehf}) e espessura do dano do canhoneio (e_c).

As listas das variáveis de projeto podem ser visualizadas na Figura 21 e na Figura 22, sendo aquela referente ao estudo executado por MATTA, 2007 e esta realizada pelos autores. Vale salientar que os valores máximos e mínimos dos parâmetros foram os mesmos a fim de validar a comparação.

Variáveis de Projeto e Restrições		Parâmetros de Síntese e Otimização		Convergência e Resultados		
Variável de Projeto/Limites de Busca						
	Min	Máx	Precisão	Ind. de Custo	Melhor	Ativa
Dímetro Externo do Reservatório (c1)	850				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Espessura da Parede de Rocha (d2)	11,05				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Dímetro do Poço (d3)	8,5				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Altura do Passo (altura)	1				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Num. Total de Vollos	1				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Num. Furos por Pé	2	6	1	1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Diâmetro de entrada no revestimento (t1)	0,1	0,5	0,1	1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Diâmetro do túnel na interface cimentação/reservatório (t2)	0,5	1	0,1	1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Diâmetro final do túnel (t3)	0,1	0,5	0,1	1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Espessura do dano do canhoneio (t4)	0,1	1	0,1	1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Espessura do revestimento (t6)	0,1				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Espessura da cimentação (t7)	0,1				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comprimento do túnel (t8)	3	80	1	1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Comprimento da ponta do túnel (t9)	0,5				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Permeabilidade da rocha (M1)	0,341				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Permeabilidade da formação (M2)	0,034				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Permeabilidade do canhoneio (M3)	0,034				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Permeabilidade do túnel (M4)	100000				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anisotropia (kz)	0,1				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Pressão interna (P1)	316				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Pressão externa (P2)	632				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Grau de refinamento	6				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 21 - Variáveis otimizadas de MATTA, 2007. (Fonte: MATTA, 2007)

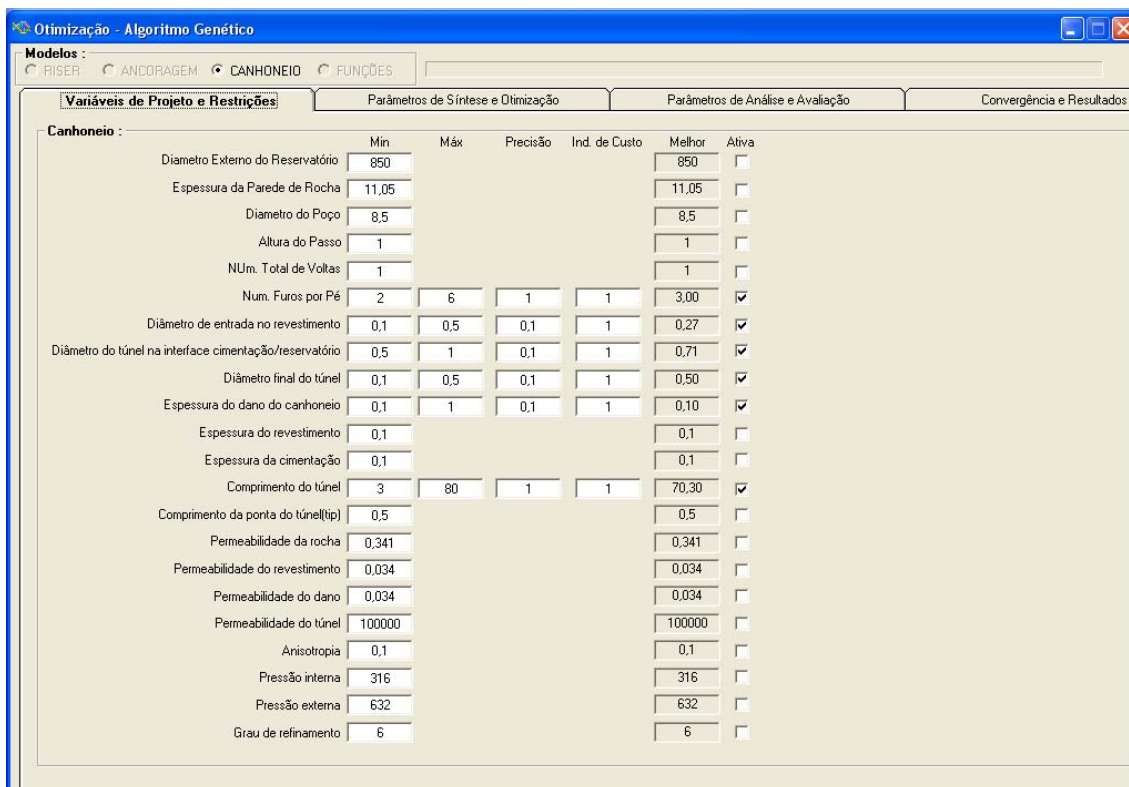


Figura 22 - Variáveis otimizadas do caso 2.

Na Tabela 4 estão descritos os valores obtidos por cada estudo para o melhor indivíduo. Vale destacar que ocorreu uma discrepância nos valores de tiros por pé (*spf*) e do comprimento do túnel (L_p), a qual será explicada melhor a seguir.

Tabela 4 – Comparativo dos valores ótimos.

	Matta, 2007	Autores
SPF	6	3
L_p	46,05''	70,30''
D_{eh}	0,21''	0,27''
D_{ehr}	0,86''	0,71''
D_{ehf}	0,21''	0,50''
e_c	0,22''	0,10''

Adicionalmente, observam-se na Figura 23 e na Figura 24 os parâmetros utilizados no processo de síntese do Algoritmo Genético, como o tamanho da população, as probabilidades dos operadores genéticos, o mecanismo de seleção e o critério de parada. Estes foram iguais tanto em MATTA (2007) quanto no estudo de caso, com o objetivo de tornar coerente a comparação.

The screenshot displays the 'Parâmetros de Síntese e Otimização' window of the MATTA software. The window is organized into three main sections:

- Opções do Algoritmo:**
 - Radio buttons for 'Algoritmo Genético Clássico' (selected), 'Algoritmo Genético com Micro-populações', and 'Enxame'.
 - Input field for 'Nº de Ciclos Externos' set to 10.
 - Buttons for 'Save', 'Restart', and 'Relatório detalhado'.
 - 'Codificação' section with radio buttons for 'Binária' (selected) and 'Real'.
 - Checkboxes for 'Histórico' and 'Relatório detalhado'.
- Critério de Parada:**
 - Radio buttons for 'Nº Máximo de Gerações' (200), 'Limite para a função objetivo' (2.0), 'Duplo (Média)', 'Média x Melhor' (selected), and 'Média'.
 - 'Critério para parada por Média' section with input fields for 'N = 0.02' and '4', and 'K = 0.99'.
- Parâmetros de Evolução:**
 - Input fields for 'Tamanho da População' (20), 'Probabilidade de Crossover' (0.8), and 'Probabilidade de Mutação' (0.05).
 - 'Geração' section with radio buttons for 'Geracional', 'Steady State', 'Elitismo' (1, selected), and 'Sel. por Torneio'.
 - Buttons for 'Aplicar Padrão', 'Crossover Uniforme', 'Crossover de 1 Ponto' (selected), 'Usar semente fixa', and 'Usar indivíduo original (Seeding)'.

Figura 23 - Parâmetros da otimização de MATTA, 2007. (Fonte: MATTA, 2007)

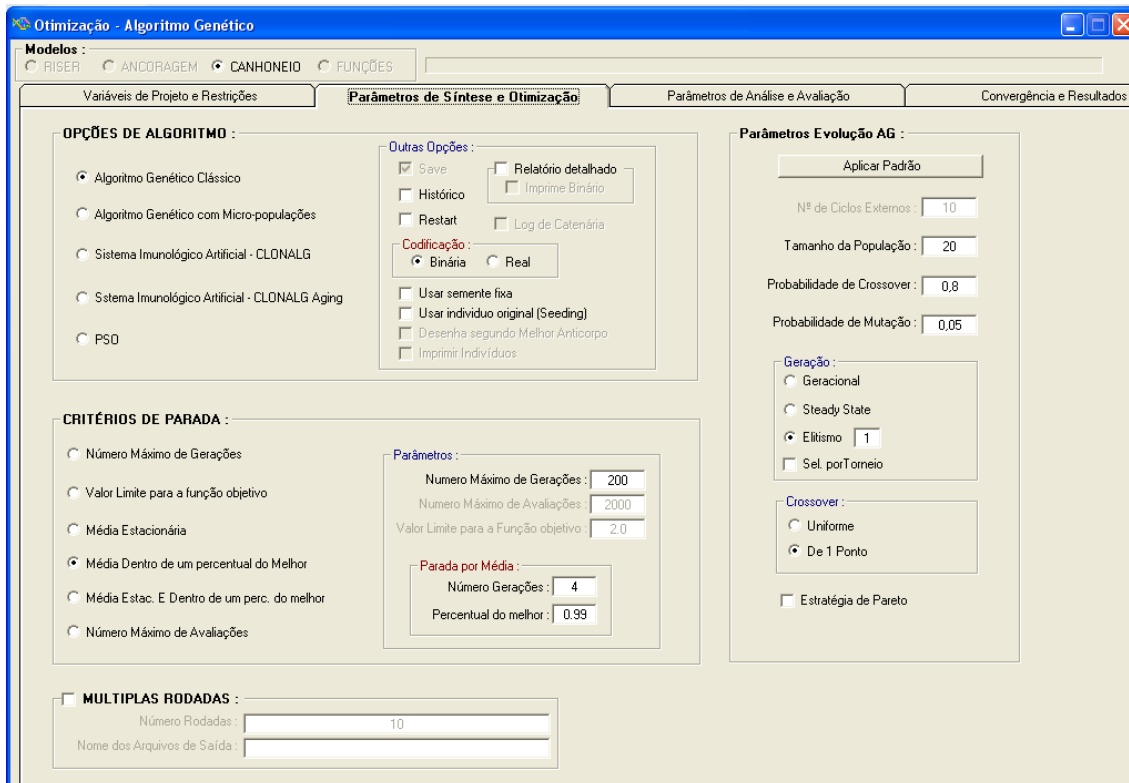


Figura 24 – Parâmetros da otimização do caso 2.

Por último, os resultados obtidos por ambos os estudos são apresentados na Figura 25 e na Figura 26. Pode-se observar que a evolução do algoritmo, utilizando a função analítica, foi finalizada em menos gerações que o modelo numérico. Além disso, destaca-se o valor da vazão sendo, em MATTA (2007), próximo de 2600 in³/d (0,2678 bbl/d) e no estudo de caso, 2790,47 in³/d (0,2874 bbl/d). O valor é bem próximo o que explica os valores ótimos obtidos pelas variáveis de projeto, sendo que, no presente estudo de caso, a redução do valor de *spf* compensa o maior valor do L_p , quando comparado a MATTA (2007).

Vale ainda salientar o tempo total de simulação e o número total de avaliações da função. Infelizmente esses parâmetros não são mostrados no estudo de caso de MATTA (2007), porém há um fragmento de um relatório de avaliação no corpo da tese MATTA (2007) em que foram feitas 142 avaliações no tempo total de 01:18:09. Em contrapartida o estudo de caso 2 apresentou 102 avaliações no tempo de 00:00:01. Isso mostra a eficiência do modelo analítico no que tange ao tempo computacional.

Outros dados a respeito da evolução do algoritmo podem ser observados no Anexo B.

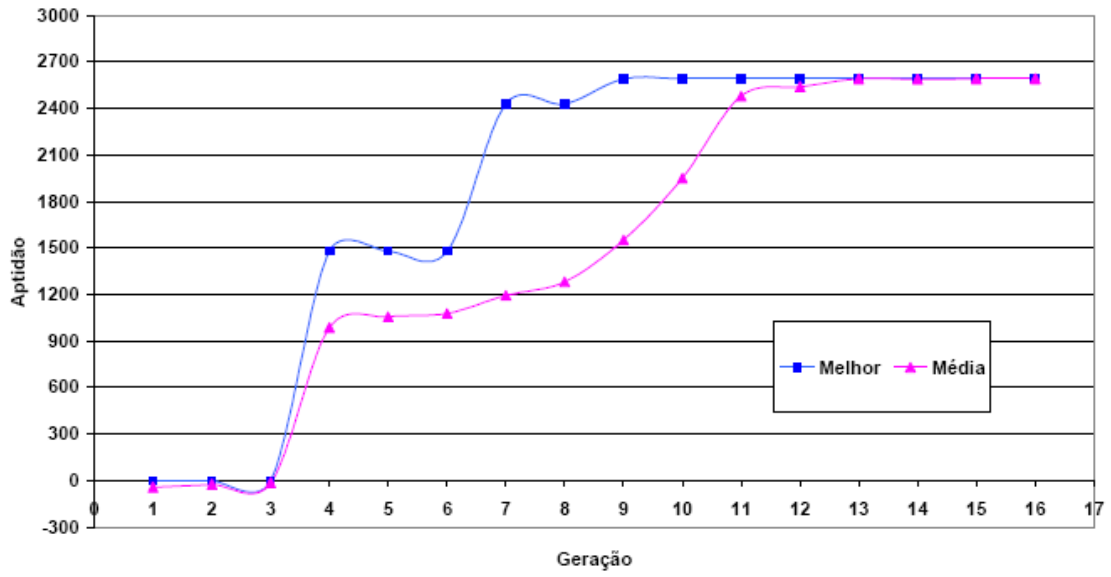


Figura 25 - Evolução do algoritmo de MATTA, 2007. (Fonte: MATTA, 2007)

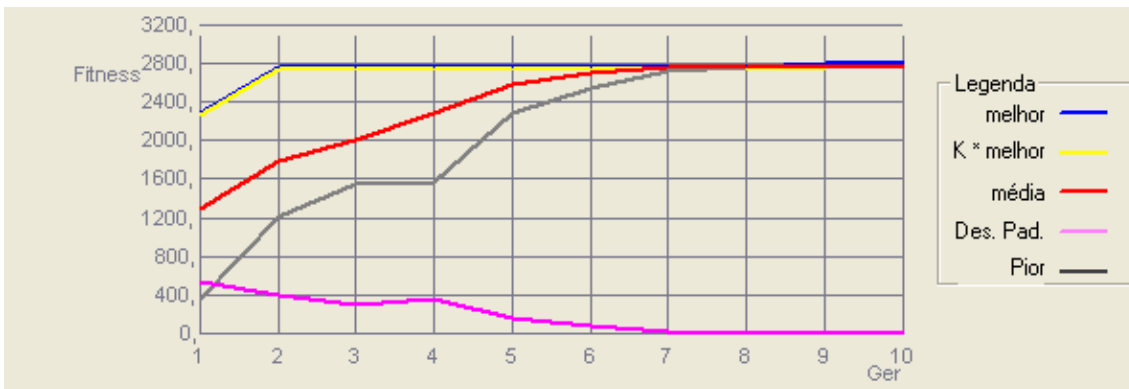


Figura 26 – Evolução do algoritmo do caso 2.

9 - CONCLUSÃO

A partir do que foi exposto anteriormente, pode-se inferir algumas conclusões sobre os resultados dos estudos paramétricos e sobre o comportamento dos Algoritmos Genéticos no canhoneio, utilizando a função de avaliação implementada no presente trabalho.

Os estudos paramétricos são de extrema importância para avaliar os parâmetros envolvidos no processo de canhoneio, e observar quais deles influenciam mais significativamente no fluxo e na produtividade do poço. Informações relacionadas ao comportamento dos parâmetros que regem as operações de canhoneio podem contribuir significativamente para alcançar uma maior produtividade na exploração de óleo ou gás.

Observando-se os resultados apresentados, relacionados aos parâmetros de diâmetro de entrada do túnel e comprimento do canhoneado, confirma-se a importância da escolha do tipo de carga moldada a ser utilizada no projeto do poço. Os resultados tornam possível afirmar que as cargas do tipo *deep penetration* são mais eficientes em termos de produtividade do que as cargas do tipo *big hole* e, por conseguinte, conferem maior produtividade ao poço.

A ferramenta de otimização é um artifício importante na tomada de decisão de operações na indústria de petróleo, sendo no procedimento de canhoneio, válida para a escolha da melhor configuração do processo.

A partir da delimitação das variáveis de projeto, através dos estudos paramétricos, outro fator importante é determinar a função de avaliação e as restrições do processo. Assim, foi formulada uma função analítica, a qual calcula a vazão em um poço canhoneado, comparando com os resultados obtidos pelo solver de elementos finitos para o cálculo da função de avaliação, a fim de validar o modelo analítico. Pode-se observar que a função analítica é de grande valia, já que através da corroboração, pode-se perceber que segue a mesma tendência dos resultados obtidos pelo solver e possui a vantagem de exigir menos tempo computacional.

10 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSAH, J. *et al.*, *Advances in Well Completion Design: A New 3D Finite-Element Wellbore Inflow Model for Optimizing Performance of Perforated Completions*. In: SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control, SPE 73760, Lafayette, Louisiana, 2002.

FREITAS, S. M. S. *et al.*, *Análise Numérica 3D de Canhoneio pelo Método dos Elementos Finitos*. Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Curitiba, PR, Brasil, 2006.

HOLLAND, J. H., *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975.

INCROPERA, F. P., DEWITT, D. P., *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa*. 4ª Edição. Editora LTC, Rio de Janeiro, 1998.

JACOB, B. P., SILVESTRE, J. R., *Modelagem e Simulação Numérica de Procedimentos de Canhoneio em Poços de Petróleo*. COPPETEC PEC-4905, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.

JACOB, B. P., SILVESTRE, J. R., MATTA, P. S., *Simulação Numérica pelo Método dos Elementos Finitos de Procedimentos de Canhoneio em Poços de Petróleo*. COPPETEC PEC-6119, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.

LIMA, B. S. L. P., *Notas de Aula de Algoritmos Genéticos*. COC 769, Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.

MATTA, P. S., *Aplicação de Algoritmos Genéticos para a Otimização da Produção em Poços de Petróleo Canhoneados*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.

OTT, W. K., WOODS, J. D., *Modern Sandface Completion Practices Handbook*. HALLIBURTON, Gulf Publishing Company, Houston, Texas, 2003.

ROSA, A. J. *et al.*, *Engenharia de Reservatórios de Petróleo*. Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2006.

SILVA, K. F., *Simulação Numérica pelo Método dos Elementos Finitos de Procedimentos de Canhoneio em Poços de Petróleo*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.

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

ANEXOS

Anexo A

Parâmetros do Algoritmo Genético

Número de Parâmetros = 19

Tamanho do cromossomo = 117

Param	Mínimo	Máximo	Precisão	Tam. Alelo
01	500,000	1000,000	1,000	9
02	11,050	18,530	1,000	3
03	7,000	9,500	1,000	2
04	1,000	3,000	1,000	2
05	1,000	6,000	1,000	3
06	0,500	1,000	0,010	6
07	0,700	1,000	0,010	5
08	0,100	0,700	0,010	6
09	0,100	0,700	0,010	6
10	0,100	0,500	0,010	6
11	0,100	0,500	0,010	6
12	3,000	65,000	1,000	6
13	0,100	0,700	0,010	6
14	0,100	0,500	0,010	6
15	0,010	0,300	0,010	5

16 0,001 0,100 0,001 7
 17 10000,000 100000,000 1,000 17
 18 300,000 500,000 1,000 8
 19 600,000 800,000 1,000 8

Tam. População = 100 Máx. Geração = 200

Critério de parada: Média x Melhor. K= 0,99 N= 5

Utilizando Algoritmo Genético Clássico

Utilizando Algoritmo Genético Clássico

+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+

| Ger |Melhor | Pior | Média |Des.Pad|Var.Gen| Aval | Conv | Penal. | Dist. |

+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+

| 1|994,446|39,193|314,597|212,709| 47,26| 100| 100| 0| 40,312| f = 994,445521181122 X1 = 818,982 X2 = 16,393 X3 = 7,833 X4 = 3,000 X5 = 3,000 X6 = 0,619 X7 = 0,719 X8 = 0,157 X9 = 0,110 X10 = 0,221 X11 = 0,348 X12 = 54,175 X13 = 0,643 X14 = 0,500 X15 = 0,085 X16 = 0,094 X17 = 37489,376 X18 = 434,118 X19 = 771,765

| 2|1335,80|108,702|493,519|231,538| 45,12| 98| 100| 0| 37,864| f = 1335,805353311330 X1 = 863,992 X2 = 16,393 X3 = 8,667 X4 = 3,000 X5 = 6,000 X6 = 0,524 X7 = 0,710 X8 = 0,462 X9 = 0,281 X10 = 0,411 X11 = 0,367 X12 = 60,079 X13 = 0,586 X14 = 0,500 X15 = 0,244 X16 = 0,080 X17 = 74973,640 X18 = 371,373 X19 = 788,235

| 3|1335,80|262,332|634,290|215,010| 44,04| 92| 100| 0| 36,619| f = 1335,805353311330 X1 = 863,992 X2 = 16,393 X3 = 8,667 X4 = 3,000 X5 = 6,000 X6 = 0,524 X7 = 0,710 X8 = 0,462 X9 = 0,281 X10 = 0,411 X11 = 0,367 X12 = 60,079 X13 = 0,586 X14 = 0,500 X15 = 0,244 X16 = 0,080 X17 = 74973,640 X18 = 371,373 X19 = 788,235

| 4|1590,33|492,847|804,967|223,339| 40,40| 90| 100| 0| 36,069| f = 1590,331208757540 X1 = 551,859 X2 = 13,187 X3 = 7,000 X4 = 3,000 X5 = 5,000 X6 = 0,515 X7 = 0,710 X8 = 0,462 X9 = 0,281 X10 = 0,411 X11 = 0,367 X12 = 60,079 X13 = 0,586 X14 = 0,500 X15 = 0,244 X16 = 0,080 X17 = 74973,640 X18 = 371,373 X19 = 788,235

| 5|1824,89|522,543|953,116|220,173| 41,39| 94| 100| 0| 34,275| f = 1824,898676900290 X1 = 551,859 X2 = 13,187 X3 = 7,000 X4 = 3,000 X5 = 5,000 X6 = 0,738 X7 = 0,806 X8 = 0,700 X9 = 0,300 X10 = 0,163 X11 = 0,348 X12 = 63,032 X13 = 0,262 X14 = 0,500 X15 = 0,188 X16 = 0,088 X17 = 75930,145 X18 = 329,804 X19 = 780,392

| 6|1824,89|697,002|1089,80|233,163| 40,05| 87| 100| 0| 32,857| f = 1824,898676900290 X1 = 551,859 X2 = 13,187 X3 = 7,000 X4 = 3,000 X5 = 5,000 X6 = 0,738 X7 = 0,806 X8 = 0,700 X9 = 0,300 X10 = 0,163 X11 = 0,348 X12 = 63,032 X13 = 0,262 X14 = 0,500 X15 = 0,188 X16 = 0,088 X17 = 75930,145 X18 = 329,804 X19 = 780,392

| 7|1838,16|673,907|1233,64|251,905| 26,96| 93| 100| 0| 30,655| f = 1838,166853820730 X1 = 551,859 X2 = 13,187 X3 = 7,000 X4 = 3,000 X5 = 6,000 X6 = 0,524 X7 = 0,719 X8 = 0,157 X9 = 0,110 X10 = 0,221 X11 = 0,367 X12 = 60,079 X13 = 0,586 X14 = 0,500 X15 = 0,244 X16 = 0,077 X17 = 74973,640 X18 = 371,373 X19 = 788,235

| 8|1853,48|1043,87|1436,57|197,013| 32,69| 82| 100| 0| 28,007| f = 1853,487167922230 X1 = 551,859 X2 = 13,187 X3 = 7,000 X4 = 3,000 X5 = 5,000 X6 = 0,738 X7 = 0,806 X8 = 0,700 X9 = 0,300 X10 = 0,163 X11 = 0,348 X12 = 63,032 X13 = 0,262 X14 = 0,500 X15 = 0,188 X16 = 0,088 X17 = 75930,145 X18 = 330,588 X19 = 788,235

| 9|1877,20|1264,12|1607,32|160,563| 29,52| 90| 100| 0| 24,635| f = 1877,200824064790 X1 = 551,859 X2 = 13,187 X3 = 7,000 X4 = 3,000 X5 = 5,000 X6 = 0,738 X7 = 0,806 X8 = 0,690 X9 = 0,110 X10 = 0,221 X11 = 0,348 X12 = 52,206 X13 = 0,586 X14 = 0,500 X15 = 0,169 X16 = 0,073 X17 = 59092,782 X18 = 323,529 X19 = 791,373

| 10|1940,67|1463,99|1741,86| 94,367| 31,10| 89| 100| 0| 30,958| f = 1940,670106426850 X1 = 535,225 X2 = 16,393 X3 = 8,667 X4 = 3,000 X5 = 6,000 X6 = 0,524 X7 = 0,719 X8 = 0,157 X9 = 0,110 X10 = 0,221 X11 = 0,348 X12 = 54,175 X13 = 0,643 X14 = 0,500 X15 = 0,085 X16 = 0,088 X17 = 25060,311 X18 = 333,725 X19 = 788,235

| 11|2101,10|1584,96|1818,86| 87,417| 21,40| 86| 100| 0| 18,469| f = 2101,102671674290 X1 = 551,859 X2 = 13,187 X3 = 7,000 X4 = 3,000 X5 = 5,000 X6 = 0,738 X7 = 0,806 X8 = 0,462 X9 = 0,110 X10 = 0,221 X11 = 0,367 X12 = 60,079 X13 = 0,586 X14 = 0,500 X15 = 0,244 X16 = 0,080 X17 = 75685,010 X18 = 311,765 X19 = 788,235

| 12|2152,86|1607,49|1884,33| 87,894| 18,92| 88| 100| 0| 19,431| f = 2152,867581351080 X1 = 551,859 X2 = 13,187 X3 = 7,000 X4 = 3,000 X5 = 5,000 X6 = 0,738 X7 = 0,806 X8 = 0,690 X9 = 0,110 X10 = 0,221 X11 = 0,348 X12 = 63,032 X13 = 0,157 X14 = 0,500 X15 = 0,244 X16 = 0,080 X17 = 75930,145 X18 = 327,451 X19 = 796,863

| 13|2281,60|1607,49|1933,77|132,791| 19,88| 90| 100| 0| 17,257| f = 2281,600819651780 X1 = 551,859 X2 = 13,187 X3 = 7,000 X4 = 3,000 X5 = 5,000 X6 = 0,738 X7 = 0,806 X8 = 0,462 X9 = 0,110 X10 = 0,221 X11 = 0,348 X12 = 63,032 X13 = 0,262 X14 = 0,500 X15 = 0,188 X16 = 0,092 X17 = 76036,576 X18 = 302,353 X19 = 796,863

| 14|2300,71|1703,84|2033,66|114,495| 18,16| 80| 100| 0| 17,400| f = 2300,710837551270 X1 = 551,859 X2 = 13,187 X3 = 7,000 X4 = 3,000 X5 = 5,000 X6 = 0,738 X7 = 0,806 X8 = 0,690 X9 = 0,110 X10 = 0,221 X11 = 0,348 X12 = 63,032 X13 = 0,262 X14 = 0,500 X15 = 0,188 X16 = 0,092 X17 = 76036,576 X18 = 302,353 X19 = 796,863

| 15|2334,66|1875,15|2135,67| 87,275| 16,45| 77| 100| 0| 16,531| f = 2334,662881692500 X1 = 551,859 X2 = 13,187 X3 = 7,000 X4 = 3,000 X5 = 6,000 X6 = 0,516 X7 = 0,806 X8 = 0,462 X9 = 0,110 X10 = 0,221 X11 = 0,348 X12 = 63,032 X13 = 0,262 X14 = 0,500 X15 = 0,188 X16 = 0,092 X17 = 76036,576 X18 = 302,353 X19 = 796,863

| 16|2342,14|2108,95|2211,20| 65,144| 19,68| 70| 100| 0| 25,056| f = 2342,143351469520 X1 = 535,225 X2 = 16,393 X3 = 8,667 X4 = 3,000 X5 = 6,000 X6 = 0,524 X7 = 0,719 X8 = 0,157 X9 = 0,110 X10 = 0,221 X11 = 0,348 X12 = 63,032 X13 = 0,262 X14 = 0,500 X15 = 0,188 X16 = 0,088 X17 = 70059,967 X18 = 302,353 X19 = 796,863

| 17|2389,68|2119,07|2261,28| 61,178| 15,07| 69| 100| 0| 20,191| f = 2389,685748598720 X1 = 535,225 X2 = 16,393 X3 = 8,667 X4 = 3,000 X5 = 6,000 X6 = 0,524 X7 = 0,710 X8 = 0,462 X9 = 0,110 X10 = 0,221 X11 = 0,367 X12 = 63,032 X13 = 0,262 X14 = 0,500 X15 = 0,188 X16 = 0,092 X17 = 76036,576 X18 = 302,353 X19 = 796,863

| 18|2398,95|2237,84|2307,93| 36,048| 11,97| 55| 100| 0| 21,560| f = 2398,952688055880 X1 = 535,225 X2 = 16,393 X3 = 8,667 X4 = 3,000 X5 = 6,000 X6 = 0,524 X7 = 0,719 X8 = 0,700 X9 = 0,110 X10 = 0,221 X11 = 0,348 X12 = 63,032 X13 = 0,262 X14 = 0,500 X15 = 0,188 X16 = 0,092 X17 = 76036,576 X18 = 302,353 X19 = 796,863

| 19|2399,07|2256,17|2336,80| 34,097| 10,05| 64| 100| 0| 19,152| f = 2399,074737646530 X1 = 535,225 X2 = 16,393 X3 = 8,667 X4 = 3,000 X5 = 6,000 X6 = 0,611 X7 = 0,806 X8 = 0,690 X9 = 0,110 X10 = 0,221 X11 = 0,335 X12 = 63,032 X13 = 0,262 X14 = 0,500 X15 = 0,188 X16 = 0,092 X17 = 76036,576 X18 = 302,353 X19 = 796,863

| 20|2407,31|2305,21|2360,45| 26,381| 07,94| 63| 100| 0| 19,033| f = 2407,313093581030 X1 = 535,225 X2 = 16,393 X3 = 8,667 X4 = 3,000 X5 = 6,000 X6 = 0,524 X7 = 0,719 X8 = 0,700 X9 = 0,110 X10 = 0,221 X11 = 0,348 X12 = 63,032 X13 = 0,567 X14 = 0,500 X15 = 0,188 X16 = 0,092 X17 = 76036,576 X18 = 302,353 X19 = 796,863

| 21|2407,31|2337,78|2380,87| 19,156| 05,17| 45| 100| 0| 15,136| f = 2407,313093581030 X1 = 535,225 X2 = 16,393 X3 = 8,667 X4 = 3,000 X5 = 6,000 X6 = 0,524 X7 = 0,719 X8 = 0,700 X9 = 0,110 X10 = 0,221 X11 = 0,348 X12 = 63,032 X13 = 0,567 X14 = 0,500 X15 = 0,188 X16 = 0,092 X17 = 76036,576 X18 = 302,353 X19 = 796,863

| 22|2418,02|2378,52|*2396,8| 7,508| 04,42| 39| 100| 0| 10,698| f = 2418,023640530090 X1 = 531,311 X2 = 16,393 X3 = 8,667 X4 = 3,000 X5 = 6,000 X6 = 0,524 X7 = 0,719 X8 = 0,690 X9 = 0,110 X10 = 0,221 X11 = 0,348 X12 = 63,032 X13 = 0,567 X14 = 0,500 X15 = 0,188 X16 = 0,092 X17 = 76036,576 X18 = 302,353 X19 = 796,863

| 23|2418,02|2058,96|*2398,8| 34,486| 02,64| 26| 100| 0| 7,795| f = 2418,023640530090 X1 = 531,311 X2 = 16,393 X3 = 8,667 X4 = 3,000 X5 = 6,000 X6 = 0,524 X7 = 0,719 X8 = 0,690 X9 = 0,110 X10 = 0,221 X11 = 0,348 X12 = 63,032 X13 = 0,567 X14 = 0,500 X15 = 0,188 X16 = 0,092 X17 = 76036,576 X18 = 302,353 X19 = 796,863

| 24|2425,55|2398,95|*2405,8| 4,994| 02,95| 24| 100| 0| 5,295| f = 2425,550398244910 X1 = 535,225 X2 = 16,393 X3 = 8,667 X4 = 3,000 X5 = 6,000 X6 = 0,524 X7 = 0,719 X8 = 0,624 X9 = 0,100 X10 = 0,221 X11 = 0,348 X12 = 63,032 X13 = 0,567 X14 = 0,500 X15 = 0,188 X16 = 0,092 X17 = 76036,576 X18 = 302,353 X19 = 796,863

| 25|2425,55|2254,94|*2407,1| 16,264| 02,24| 16| 100| 0| 2,770| f = 2425,550398244910 X1 = 535,225 X2 = 16,393 X3 = 8,667 X4 = 3,000 X5 = 6,000 X6 = 0,524 X7 = 0,719 X8 = 0,624 X9 = 0,100 X10 = 0,221 X11 = 0,348 X12 = 63,032 X13 = 0,567 X14 = 0,500 X15 = 0,188 X16 = 0,092 X17 = 76036,576 X18 = 302,353 X19 = 796,863

| 26|2425,55|2386,61|*2410,7| 6,210| 02,26| 11| 100| 0| 2,789| f= 2425,550398244910 X1 = 535,225 X2 = 16,393 X3 = 8,667 X4 = 3,000 X5 = 6,000 X6 = 0,524 X7 = 0,719 X8 = 0,624 X9 = 0,100 X10 = 0,221 X11 = 0,348 X12 = 63,032 X13 = 0,567 X14 = 0,500 X15 = 0,188 X16 = 0,092 X17 = 76036,576 X18 = 302,353 X19 = 796,863

Dados da Evolução da População:

Tempo total de simulação : 00:00:59

Número total de avaliações da função: 1818

Número total de indivíduos penalizados: 0

Número total de indivíduos não penalizados: 1818

Número total de indivíduos com falha de convergência: 0

```

+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
| Ger | Melhor| Pior | Média |DesvPad|NumAval|NaoConv|Ind_Pen| D.E.N |
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
| 1|994,446| 39,193|*2410,7|212,709| 100| 0| 0| 40,312|
| 2|1335,80|108,702|*2410,7|231,538| 98| 0| 0| 37,864|
| 3|1335,80|262,332|*2410,7|215,010| 92| 0| 0| 36,619|
| 4|1590,33|492,847|*2410,7|223,339| 90| 0| 0| 36,069|
| 5|1824,89|522,543|*2410,7|220,173| 94| 0| 0| 34,275|
| 6|1824,89|697,002|*2410,7|233,163| 87| 0| 0| 32,857|
| 7|1838,16|673,907|*2410,7|251,905| 93| 0| 0| 30,655|
| 8|1853,48|1043,87|*2410,7|197,013| 82| 0| 0| 28,007|
| 9|1877,20|1264,12|*2410,7|160,563| 90| 0| 0| 24,635|

```

10	1940,67	1463,99	*2410,7	94,367	89	0	0	30,958
11	2101,10	1584,96	*2410,7	87,417	86	0	0	18,469
12	2152,86	1607,49	*2410,7	87,894	88	0	0	19,431
13	2281,60	1607,49	*2410,7	132,791	90	0	0	17,257
14	2300,71	1703,84	*2410,7	114,495	80	0	0	17,400
15	2334,66	1875,15	*2410,7	87,275	77	0	0	16,531
16	2342,14	2108,95	*2410,7	65,144	70	0	0	25,056
17	2389,68	2119,07	*2410,7	61,178	69	0	0	20,191
18	2398,95	2237,84	*2410,7	36,048	55	0	0	21,560
19	2399,07	2256,17	*2410,7	34,097	64	0	0	19,152
20	2407,31	2305,21	*2410,7	26,381	63	0	0	19,033
21	2407,31	2337,78	*2410,7	19,156	45	0	0	15,136
22	2418,02	2378,52	*2410,7	7,508	39	0	0	10,698
23	2418,02	2058,96	*2410,7	34,486	26	0	0	7,795
24	2425,55	2398,95	*2410,7	4,994	24	0	0	5,295
25	2425,55	2254,94	*2410,7	16,264	16	0	0	2,770
26	2425,55	2386,61	*2410,7	6,210	11	0	0	2,789

+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+

Historico do Melhor Indivduo :

Param01 Param02 Param03 Param04 Param05 Param06 Param07 Param08 Param09 Param10 Param11 Param12 Param13 Param14 Param15
Param16 Param17 Param18 Param19 Fitness

01 818,98 16,39 7,83 3,00 3,00 0,62 0,72 0,16 0,11 0,22 0,35 54,17 0,64 0,50 0,08 0,09 37489,38 434,12
771,76 994,446 f= 994,445521181122 X1 = 818,982 X2 = 16,393 X3 = 7,833 X4 = 3,000 X5 = 3,000 X6 = 0,619 X7 = 0,719 X8 = 0,157 X9 = 0,110 X10 = 0,221
X11 = 0,348 X12 = 54,175 X13 = 0,643 X14 = 0,500 X15 = 0,085 X16 = 0,094 X17 = 37489,376 X18 = 434,118 X19 = 771,765

02 863,99 16,39 8,67 3,00 6,00 0,52 0,71 0,46 0,28 0,41 0,37 60,08 0,59 0,50 0,24 0,08 74973,64 371,37
788,24 1335,805 f= 1335,805353311330 X1 = 863,992 X2 = 16,393 X3 = 8,667 X4 = 3,000 X5 = 6,000 X6 = 0,524 X7 = 0,710 X8 = 0,462 X9 = 0,281 X10 = 0,411
X11 = 0,367 X12 = 60,079 X13 = 0,586 X14 = 0,500 X15 = 0,244 X16 = 0,080 X17 = 74973,640 X18 = 371,373 X19 = 788,235

03 863,99 16,39 8,67 3,00 6,00 0,52 0,71 0,46 0,28 0,41 0,37 60,08 0,59 0,50 0,24 0,08 74973,64 371,37
788,24 1335,805 f= 1335,805353311330 X1 = 863,992 X2 = 16,393 X3 = 8,667 X4 = 3,000 X5 = 6,000 X6 = 0,524 X7 = 0,710 X8 = 0,462 X9 = 0,281 X10 = 0,411
X11 = 0,367 X12 = 60,079 X13 = 0,586 X14 = 0,500 X15 = 0,244 X16 = 0,080 X17 = 74973,640 X18 = 371,373 X19 = 788,235

04 551,86 13,19 7,00 3,00 5,00 0,51 0,71 0,46 0,28 0,41 0,37 60,08 0,59 0,50 0,24 0,08 74973,64 371,37
788,24 1590,331 f= 1590,331208757540 X1 = 551,859 X2 = 13,187 X3 = 7,000 X4 = 3,000 X5 = 5,000 X6 = 0,515 X7 = 0,710 X8 = 0,462 X9 = 0,281 X10 = 0,411
X11 = 0,367 X12 = 60,079 X13 = 0,586 X14 = 0,500 X15 = 0,244 X16 = 0,080 X17 = 74973,640 X18 = 371,373 X19 = 788,235

05 551,86 13,19 7,00 3,00 5,00 0,74 0,81 0,70 0,30 0,16 0,35 63,03 0,26 0,50 0,19 0,09 75930,14 329,80
780,39 1824,899 f= 1824,898676900290 X1 = 551,859 X2 = 13,187 X3 = 7,000 X4 = 3,000 X5 = 5,000 X6 = 0,738 X7 = 0,806 X8 = 0,700 X9 = 0,300 X10 = 0,163
X11 = 0,348 X12 = 63,032 X13 = 0,262 X14 = 0,500 X15 = 0,188 X16 = 0,088 X17 = 75930,145 X18 = 329,804 X19 = 780,392

06 551,86 13,19 7,00 3,00 5,00 0,74 0,81 0,70 0,30 0,16 0,35 63,03 0,26 0,50 0,19 0,09 75930,14 329,80
780,39 1824,899 f= 1824,898676900290 X1 = 551,859 X2 = 13,187 X3 = 7,000 X4 = 3,000 X5 = 5,000 X6 = 0,738 X7 = 0,806 X8 = 0,700 X9 = 0,300 X10 = 0,163
X11 = 0,348 X12 = 63,032 X13 = 0,262 X14 = 0,500 X15 = 0,188 X16 = 0,088 X17 = 75930,145 X18 = 329,804 X19 = 780,392

07 551,86 13,19 7,00 3,00 6,00 0,52 0,72 0,16 0,11 0,22 0,37 60,08 0,59 0,50 0,24 0,08 74973,64 371,37
788,24 1838,167 f= 1838,166853820730 X1 = 551,859 X2 = 13,187 X3 = 7,000 X4 = 3,000 X5 = 6,000 X6 = 0,524 X7 = 0,719 X8 = 0,157 X9 = 0,110 X10 = 0,221
X11 = 0,367 X12 = 60,079 X13 = 0,586 X14 = 0,500 X15 = 0,244 X16 = 0,077 X17 = 74973,640 X18 = 371,373 X19 = 788,235

08 551,86 13,19 7,00 3,00 5,00 0,74 0,81 0,70 0,30 0,16 0,35 63,03 0,26 0,50 0,19 0,09 75930,14 330,59
788,24 1853,487 f= 1853,487167922230 X1 = 551,859 X2 = 13,187 X3 = 7,000 X4 = 3,000 X5 = 5,000 X6 = 0,738 X7 = 0,806 X8 = 0,700 X9 = 0,300 X10 = 0,163
X11 = 0,348 X12 = 63,032 X13 = 0,262 X14 = 0,500 X15 = 0,188 X16 = 0,088 X17 = 75930,145 X18 = 330,588 X19 = 788,235

09 551,86 13,19 7,00 3,00 5,00 0,74 0,81 0,69 0,11 0,22 0,35 52,21 0,59 0,50 0,17 0,07 59092,78 323,53
791,37 1877,201 f= 1877,200824064790 X1 = 551,859 X2 = 13,187 X3 = 7,000 X4 = 3,000 X5 = 5,000 X6 = 0,738 X7 = 0,806 X8 = 0,690 X9 = 0,110 X10 = 0,221
X11 = 0,348 X12 = 52,206 X13 = 0,586 X14 = 0,500 X15 = 0,169 X16 = 0,073 X17 = 59092,782 X18 = 323,529 X19 = 791,373

10 535,23 16,39 8,67 3,00 6,00 0,52 0,72 0,16 0,11 0,22 0,35 54,17 0,64 0,50 0,08 0,09 25060,31 333,73
788,24 1940,670 f= 1940,670106426850 X1 = 535,225 X2 = 16,393 X3 = 8,667 X4 = 3,000 X5 = 6,000 X6 = 0,524 X7 = 0,719 X8 = 0,157 X9 = 0,110 X10 = 0,221
X11 = 0,348 X12 = 54,175 X13 = 0,643 X14 = 0,500 X15 = 0,085 X16 = 0,088 X17 = 25060,311 X18 = 333,725 X19 = 788,235

11 551,86 13,19 7,00 3,00 5,00 0,74 0,81 0,46 0,11 0,22 0,37 60,08 0,59 0,50 0,24 0,08 75685,01 311,76
788,24 2101,103 f= 2101,102671674290 X1 = 551,859 X2 = 13,187 X3 = 7,000 X4 = 3,000 X5 = 5,000 X6 = 0,738 X7 = 0,806 X8 = 0,462 X9 = 0,110 X10 = 0,221
X11 = 0,367 X12 = 60,079 X13 = 0,586 X14 = 0,500 X15 = 0,244 X16 = 0,080 X17 = 75685,010 X18 = 311,765 X19 = 788,235

12 551,86 13,19 7,00 3,00 5,00 0,74 0,81 0,69 0,11 0,22 0,35 63,03 0,16 0,50 0,24 0,08 75930,14 327,45
796,86 2152,868 f= 2152,867581351080 X1 = 551,859 X2 = 13,187 X3 = 7,000 X4 = 3,000 X5 = 5,000 X6 = 0,738 X7 = 0,806 X8 = 0,690 X9 = 0,110 X10 = 0,221
X11 = 0,348 X12 = 63,032 X13 = 0,157 X14 = 0,500 X15 = 0,244 X16 = 0,080 X17 = 75930,145 X18 = 327,451 X19 = 796,863

13 551,86 13,19 7,00 3,00 5,00 0,74 0,81 0,46 0,11 0,22 0,35 63,03 0,26 0,50 0,19 0,09 76036,58 302,35
796,86 2281,601 f= 2281,600819651780 X1 = 551,859 X2 = 13,187 X3 = 7,000 X4 = 3,000 X5 = 5,000 X6 = 0,738 X7 = 0,806 X8 = 0,462 X9 = 0,110 X10 = 0,221
X11 = 0,348 X12 = 63,032 X13 = 0,262 X14 = 0,500 X15 = 0,188 X16 = 0,092 X17 = 76036,576 X18 = 302,353 X19 = 796,863

14 551,86 13,19 7,00 3,00 5,00 0,74 0,81 0,69 0,11 0,22 0,35 63,03 0,26 0,50 0,19 0,09 76036,58 302,35
796,86 2300,711 f= 2300,710837551270 X1 = 551,859 X2 = 13,187 X3 = 7,000 X4 = 3,000 X5 = 5,000 X6 = 0,738 X7 = 0,806 X8 = 0,690 X9 = 0,110 X10 = 0,221
X11 = 0,348 X12 = 63,032 X13 = 0,262 X14 = 0,500 X15 = 0,188 X16 = 0,092 X17 = 76036,576 X18 = 302,353 X19 = 796,863

15 551,86 13,19 7,00 3,00 6,00 0,52 0,81 0,46 0,11 0,22 0,35 63,03 0,26 0,50 0,19 0,09 76036,58 302,35
796,86 2334,663 f= 2334,662881692500 X1 = 551,859 X2 = 13,187 X3 = 7,000 X4 = 3,000 X5 = 6,000 X6 = 0,516 X7 = 0,806 X8 = 0,462 X9 = 0,110 X10 = 0,221
X11 = 0,348 X12 = 63,032 X13 = 0,262 X14 = 0,500 X15 = 0,188 X16 = 0,092 X17 = 76036,576 X18 = 302,353 X19 = 796,863

16 535,23 16,39 8,67 3,00 6,00 0,52 0,72 0,16 0,11 0,22 0,35 63,03 0,26 0,50 0,19 0,09 70059,97 302,35
796,86 2342,143 f= 2342,143351469520 X1 = 535,225 X2 = 16,393 X3 = 8,667 X4 = 3,000 X5 = 6,000 X6 = 0,524 X7 = 0,719 X8 = 0,157 X9 = 0,110 X10 = 0,221
X11 = 0,348 X12 = 63,032 X13 = 0,262 X14 = 0,500 X15 = 0,188 X16 = 0,088 X17 = 70059,967 X18 = 302,353 X19 = 796,863

17 535,23 16,39 8,67 3,00 6,00 0,52 0,71 0,46 0,11 0,22 0,37 63,03 0,26 0,50 0,19 0,09 76036,58 302,35
796,86 2389,686 f= 2389,685748598720 X1 = 535,225 X2 = 16,393 X3 = 8,667 X4 = 3,000 X5 = 6,000 X6 = 0,524 X7 = 0,710 X8 = 0,462 X9 = 0,110 X10 = 0,221
X11 = 0,367 X12 = 63,032 X13 = 0,262 X14 = 0,500 X15 = 0,188 X16 = 0,092 X17 = 76036,576 X18 = 302,353 X19 = 796,863

18 535,23 16,39 8,67 3,00 6,00 0,52 0,72 0,70 0,11 0,22 0,35 63,03 0,26 0,50 0,19 0,09 76036,58 302,35
796,86 2398,953 f= 2398,952688055880 X1 = 535,225 X2 = 16,393 X3 = 8,667 X4 = 3,000 X5 = 6,000 X6 = 0,524 X7 = 0,719 X8 = 0,700 X9 = 0,110 X10 = 0,221
X11 = 0,348 X12 = 63,032 X13 = 0,262 X14 = 0,500 X15 = 0,188 X16 = 0,092 X17 = 76036,576 X18 = 302,353 X19 = 796,863

19 535,23 16,39 8,67 3,00 6,00 0,61 0,81 0,69 0,11 0,22 0,33 63,03 0,26 0,50 0,19 0,09 76036,58 302,35
796,86 2399,075 f= 2399,074737646530 X1 = 535,225 X2 = 16,393 X3 = 8,667 X4 = 3,000 X5 = 6,000 X6 = 0,611 X7 = 0,806 X8 = 0,690 X9 = 0,110 X10 = 0,221
X11 = 0,335 X12 = 63,032 X13 = 0,262 X14 = 0,500 X15 = 0,188 X16 = 0,092 X17 = 76036,576 X18 = 302,353 X19 = 796,863

20 535,23 16,39 8,67 3,00 6,00 0,52 0,72 0,70 0,11 0,22 0,35 63,03 0,57 0,50 0,19 0,09 76036,58 302,35
796,86 2407,313 f= 2407,313093581030 X1 = 535,225 X2 = 16,393 X3 = 8,667 X4 = 3,000 X5 = 6,000 X6 = 0,524 X7 = 0,719 X8 = 0,700 X9 = 0,110 X10 = 0,221
X11 = 0,348 X12 = 63,032 X13 = 0,567 X14 = 0,500 X15 = 0,188 X16 = 0,092 X17 = 76036,576 X18 = 302,353 X19 = 796,863

21 535,23 16,39 8,67 3,00 6,00 0,52 0,72 0,70 0,11 0,22 0,35 63,03 0,57 0,50 0,19 0,09 76036,58 302,35
796,86 2407,313 f= 2407,313093581030 X1 = 535,225 X2 = 16,393 X3 = 8,667 X4 = 3,000 X5 = 6,000 X6 = 0,524 X7 = 0,719 X8 = 0,700 X9 = 0,110 X10 = 0,221
X11 = 0,348 X12 = 63,032 X13 = 0,567 X14 = 0,500 X15 = 0,188 X16 = 0,092 X17 = 76036,576 X18 = 302,353 X19 = 796,863

22 531,31 16,39 8,67 3,00 6,00 0,52 0,72 0,69 0,11 0,22 0,35 63,03 0,57 0,50 0,19 0,09 76036,58 302,35
796,86 2418,024 f= 2418,023640530090 X1 = 531,311 X2 = 16,393 X3 = 8,667 X4 = 3,000 X5 = 6,000 X6 = 0,524 X7 = 0,719 X8 = 0,690 X9 = 0,110 X10 = 0,221
X11 = 0,348 X12 = 63,032 X13 = 0,567 X14 = 0,500 X15 = 0,188 X16 = 0,092 X17 = 76036,576 X18 = 302,353 X19 = 796,863

23 531,31 16,39 8,67 3,00 6,00 0,52 0,72 0,69 0,11 0,22 0,35 63,03 0,57 0,50 0,19 0,09 76036,58 302,35
796,86 2418,024 f= 2418,023640530090 X1 = 531,311 X2 = 16,393 X3 = 8,667 X4 = 3,000 X5 = 6,000 X6 = 0,524 X7 = 0,719 X8 = 0,690 X9 = 0,110 X10 = 0,221
X11 = 0,348 X12 = 63,032 X13 = 0,567 X14 = 0,500 X15 = 0,188 X16 = 0,092 X17 = 76036,576 X18 = 302,353 X19 = 796,863

24 535,23 16,39 8,67 3,00 6,00 0,52 0,72 0,62 0,10 0,22 0,35 63,03 0,57 0,50 0,19 0,09 76036,58 302,35
796,86 2425,550 f= 2425,550398244910 X1 = 535,225 X2 = 16,393 X3 = 8,667 X4 = 3,000 X5 = 6,000 X6 = 0,524 X7 = 0,719 X8 = 0,624 X9 = 0,100 X10 = 0,221
X11 = 0,348 X12 = 63,032 X13 = 0,567 X14 = 0,500 X15 = 0,188 X16 = 0,092 X17 = 76036,576 X18 = 302,353 X19 = 796,863

25 535,23 16,39 8,67 3,00 6,00 0,52 0,72 0,62 0,10 0,22 0,35 63,03 0,57 0,50 0,19 0,09 76036,58 302,35
796,86 2425,550 f= 2425,550398244910 X1 = 535,225 X2 = 16,393 X3 = 8,667 X4 = 3,000 X5 = 6,000 X6 = 0,524 X7 = 0,719 X8 = 0,624 X9 = 0,100 X10 = 0,221
X11 = 0,348 X12 = 63,032 X13 = 0,567 X14 = 0,500 X15 = 0,188 X16 = 0,092 X17 = 76036,576 X18 = 302,353 X19 = 796,863

26 535,23 16,39 8,67 3,00 6,00 0,52 0,72 0,62 0,10 0,22 0,35 63,03 0,57 0,50 0,19 0,09 76036,58 302,35
796,86 2425,550 f= 2425,550398244910 X1 = 535,225 X2 = 16,393 X3 = 8,667 X4 = 3,000 X5 = 6,000 X6 = 0,524 X7 = 0,719 X8 = 0,624 X9 = 0,100 X10 = 0,221
X11 = 0,348 X12 = 63,032 X13 = 0,567 X14 = 0,500 X15 = 0,188 X16 = 0,092 X17 = 76036,576 X18 = 302,353 X19 = 796,863

Anexo B

Parâmetros do Algoritmo Genético

Número de Parâmetros = 6

Tamanho do cromossomo = 23

Param	Mínimo	Máximo	Precisão	Tam. Alelo
01	2,000	6,000	1,000	3
02	0,100	0,500	0,100	3
03	0,500	1,000	0,100	3
04	0,100	0,500	0,100	3
05	0,100	1,000	0,100	4
06	3,000	80,000	1,000	7

Tam. População = 20 Máx. Geração = 200

Critério de parada: Média x Melhor. K= 0,99 N= 4

Utilizando Algoritmo Genético Clássico

Utilizando Algoritmo Genético Clássico

Ger	Melhor	Pior	Média	Des.Pad	Var.Gen	Aval	Conv	Penal.	Dist.	
1	2288,99	358,443	1287,47	539,642	47,37	20	20	0	7,277	f = 2288,991859752150 X1 = 3,000 X2 = 0,157 X3 = 0,714 X4 = 0,500 X5 = 0,100 X6 = 48,472
2	2762,72	1217,93	1779,74	400,994	39,82	19	20	0	6,354	f = 2762,722690210100 X1 = 3,000 X2 = 0,157 X3 = 0,714 X4 = 0,500 X5 = 0,100 X6 = 69,087
3	2762,72	1553,19	2003,50	297,194	35,24	14	20	0	6,089	f = 2762,722690210100 X1 = 3,000 X2 = 0,157 X3 = 0,714 X4 = 0,500 X5 = 0,100 X6 = 69,087

4	2762,72	1565,24	2277,51	349,857	27,00	17	20	0	5,045	f = 2762,722690210100	X1 = 3,000	X2 = 0,157	X3 = 0,714	X4 = 0,500	X5 = 0,100	X6 = 69,087
5	2762,72	2283,98	2582,85	160,546	20,59	12	20	0	4,307	f = 2762,722690210100	X1 = 3,000	X2 = 0,157	X3 = 0,714	X4 = 0,500	X5 = 0,100	X6 = 69,087
6	2762,72	2542,95	2703,75	71,243	10,07	5	20	0	1,387	f = 2762,722690210100	X1 = 3,000	X2 = 0,157	X3 = 0,714	X4 = 0,500	X5 = 0,100	X6 = 69,087
7	2762,72	2721,13	*2758,5	12,475	05,72	4	20	0	2,217	f = 2762,727448734630	X1 = 3,000	X2 = 0,271	X3 = 0,714	X4 = 0,500	X5 = 0,100	X6 = 69,087
8	2762,72	2762,72	*2762,7	0,001	04,12	2	20	0	2,100	f = 2762,727448734630	X1 = 3,000	X2 = 0,271	X3 = 0,714	X4 = 0,500	X5 = 0,100	X6 = 69,087
9	2790,47	2762,72	*2764,1	6,048	07,78	3	20	0	1,778	f = 2790,473080751530	X1 = 3,000	X2 = 0,271	X3 = 0,714	X4 = 0,500	X5 = 0,100	X6 = 70,299
10	2790,47	2762,72	*2766,8	9,155	07,32	6	20	0	1,783	f = 2790,473080751530	X1 = 3,000	X2 = 0,271	X3 = 0,714	X4 = 0,500	X5 = 0,100	X6 = 70,299

Dados da Evolução da População:

Tempo total de simulação : 00:00:01

Número total de avaliações da função: 102

Número total de indivíduos penalizados: 0

Número total de indivíduos não penalizados: 102

Número total de indivíduos com falha de convergência: 0

Ger	Melhor	Pior	Média	DesvPad	NumAval	NaoConv	Ind_Pen	D.E.N
1	2288,99	358,443	*2766,8	539,642	20	0	0	7,277
2	2762,72	1217,93	*2766,8	400,994	19	0	0	6,354
3	2762,72	1553,19	*2766,8	297,194	14	0	0	6,089
4	2762,72	1565,24	*2766,8	349,857	17	0	0	5,045

```

| 5|2762,72|2283,98|*2766,8|160,546| 12| 0| 0| 4,307|
| 6|2762,72|2542,95|*2766,8| 71,243| 5| 0| 0| 1,387|
| 7|2762,72|2721,13|*2766,8| 12,475| 4| 0| 0| 2,217|
| 8|2762,72|2762,72|*2766,8| 0,001| 2| 0| 0| 2,100|
| 9|2790,47|2762,72|*2766,8| 6,048| 3| 0| 0| 1,778|
| 10|2790,47|2762,72|*2766,8| 9,155| 6| 0| 0| 1,783|
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+

```

Historico do Melhor Indiviuo :

	Param01	Param02	Param03	Param04	Param05	Param06	Fitness
01	3,00	0,16	0,71	0,50	0,10	48,47	2288,992 f = 2288,991859752150 X1 = 3,000 X2 = 0,157 X3 = 0,714 X4 = 0,500 X5 = 0,100 X6 = 48,472
02	3,00	0,16	0,71	0,50	0,10	69,09	2762,723 f = 2762,722690210100 X1 = 3,000 X2 = 0,157 X3 = 0,714 X4 = 0,500 X5 = 0,100 X6 = 69,087
03	3,00	0,16	0,71	0,50	0,10	69,09	2762,723 f = 2762,722690210100 X1 = 3,000 X2 = 0,157 X3 = 0,714 X4 = 0,500 X5 = 0,100 X6 = 69,087
04	3,00	0,16	0,71	0,50	0,10	69,09	2762,723 f = 2762,722690210100 X1 = 3,000 X2 = 0,157 X3 = 0,714 X4 = 0,500 X5 = 0,100 X6 = 69,087
05	3,00	0,16	0,71	0,50	0,10	69,09	2762,723 f = 2762,722690210100 X1 = 3,000 X2 = 0,157 X3 = 0,714 X4 = 0,500 X5 = 0,100 X6 = 69,087
06	3,00	0,16	0,71	0,50	0,10	69,09	2762,723 f = 2762,722690210100 X1 = 3,000 X2 = 0,157 X3 = 0,714 X4 = 0,500 X5 = 0,100 X6 = 69,087
07	3,00	0,27	0,71	0,50	0,10	69,09	2762,727 f = 2762,727448734630 X1 = 3,000 X2 = 0,271 X3 = 0,714 X4 = 0,500 X5 = 0,100 X6 = 69,087
08	3,00	0,27	0,71	0,50	0,10	69,09	2762,727 f = 2762,727448734630 X1 = 3,000 X2 = 0,271 X3 = 0,714 X4 = 0,500 X5 = 0,100 X6 = 69,087
09	3,00	0,27	0,71	0,50	0,10	70,30	2790,473 f = 2790,473080751530 X1 = 3,000 X2 = 0,271 X3 = 0,714 X4 = 0,500 X5 = 0,100 X6 = 70,299
10	3,00	0,27	0,71	0,50	0,10	70,30	2790,473 f = 2790,473080751530 X1 = 3,000 X2 = 0,271 X3 = 0,714 X4 = 0,500 X5 = 0,100 X6 = 70,299