

4

Modelo de Otimização da Quantidade, Localização, Tipo e Geometria de Poços de Petróleo incluindo Poços Multilaterais

4.1. Introdução

Diversas pesquisas vêm sendo desenvolvidas com o intuito de se otimizar a produção de hidrocarbonetos visando melhorar o fator de recuperação (FR) dos reservatórios e buscando viabilizar comercialmente reservas de hidrocarboneto menores ou de mais difícil drenagem (TÚPAC 2005), (ALMEIDA 2003), (NAKAJIMA 2003), (DOLLE 2002), (GUYAGULER 2000a) e (GUYAGULER 2000b). O plano de desenvolvimento de um campo é extremamente complexo. É necessário se analisar todo o sistema de produção e distribuição, fazer análises econômicas, previsões de produção e mercado e outras tarefas descritas no capítulo 2. Todas as etapas do plano de desenvolvimento contribuem para o retorno do investimento e na decisão de se declarar a comercialidade de um campo.

Não é possível se trabalhar com todas as etapas do plano de desenvolvimento simultaneamente. É necessário o conhecimento em diversas áreas distintas e o número de variáveis é proibitivo para qualquer tentativa. O que é feito então é uma divisão das etapas do plano de desenvolvimento. Neste trabalho procura-se otimizar o plano de desenvolvimento manipulando as variáveis da malha de drenagem e considera-se os outros componentes do plano de desenvolvimento como constantes ou restrições.

Mesmo focado somente na malha de drenagem, o problema continua muito complexo e não foi desenvolvido, até o momento, nenhum sistema capaz de realizar otimizações considerando todos os parâmetros. Esse trabalho também não se propõe a considerar todas as variáveis existentes e irá se utilizar de simplificações para conseguir lidar com o problema. Esse trabalho visa a construção de um modelo que consiga um avanço quanto a capacidade dos

sistemas de otimização de serem aplicados na indústria. Outros trabalhos na área não são capazes de lidar com algumas variáveis que esse trabalho propõe e se propõem a lidar com outras variáveis a mais. As principais diferenças entre esse trabalho e alguns já publicados são: (YETEN 2003) é capaz de lidar com incerteza geológica e posicionamento quanto ao risco, assim como faz uso de proxies de reservatórios e poços inteligentes. No entanto, apresenta problemas de escalabilidade de número de variáveis (número de poços e de células do reservatório) e tratamento de restrições; (NAKAJIMA 2003) utiliza um número muito pequeno de simulações, uma vantagem, e considera o cronograma dos poços. No entanto, não garante a convergência e não trabalha com poços multilaterais; (EMERICK 2009), (TÚPAC 2005) e (ALMEIDA 2003) não consideram poços multilaterais e tratam restrições de planejamento por penalização.

Esse trabalho de pesquisa se propõe a lidar com modelos de reservatórios reais, sendo capaz de lidar com as restrições existentes e permitir o uso de poços verticais, horizontais, direcionais e multilaterais, se aproximando mais da realidade da indústria de petróleo através de uma metodologia de otimização que visa atender melhor a necessidade dos engenheiros de reservatórios. A busca desse aperfeiçoamento no modelo de otimização leva a um aumento do custo computacional, que tenta ser minimizado com o uso de computação paralela.

Assim, esse trabalho visa a criação de um modelo que seja capaz de otimizar o VPL de alternativas de produção de modo que se possa trabalhar com reservatórios reais, com centenas de milhares de células heterogêneas e permitir o maior controle dos parâmetros para adequar a solução proposta às necessidades da indústria. É esperado que outras funções possam ser incorporadas a este modelo (como tratamento de incerteza geológica e econômica, consideração de riscos de perfuração, cronograma de abertura dos poços, controle inteligente das taxas de injeção e produção de cada setor dos poços e instalações de superfície) em trabalhos futuros que venham a fazer com que soluções sejam propostas de modo mais preciso, confiável e completo.

Como descrito em trabalhos anteriores (EMERICK 2009), (TÚPAC 2005), (YETEN 2003) e (ALMEIDA 2003) a utilização de algoritmos genéticos se mostra adequada com as necessidades de se otimizar malhas de drenagem. Dentre as principais características que adéquam o AG para a solução do problema deste

trabalho incluem: a capacidade de lidar com problemas com elevado número de variáveis, desconhecimento do modelo analítico do problema, facilidade de incorporação de heurísticas, tratamento de restrições não lineares e possibilidade de paralelismo de avaliações.

Este trabalho não se dispõe a lidar com incertezas geológicas e/ou financeiras diretamente. Uma análise do preço do óleo e do gás pode ser conduzida previamente e os valores mais prováveis encontrados seriam utilizados como certos para a evolução. Uma vez concluída a evolução, pode-se refazer o cálculo do VPL e verificar um novo valor considerando as incertezas. Como característica do AG, mais de uma solução é gerada e pode-se refazer o cálculo do VPL para outras soluções encontradas além da de maior VPL sob certeza econômica.

O objetivo, do ponto de vista da modelagem, desse trabalho é utilizar uma representação capaz de tratar as restrições, propiciar a evolução do AG e minimizar o número de simulações utilizadas.

A estrutura do AG utilizado, com os componentes que serão detalhados nas seções subsequentes deste capítulo, está ilustrada na Figura 27.

Os passos do sistema são: geração de duas populações iniciais (busca e referência), composição da população Z por GACOM com Restrições, decodificação, simulação, cálculo do VPL, seleção e aplicação dos operadores até o término das gerações.

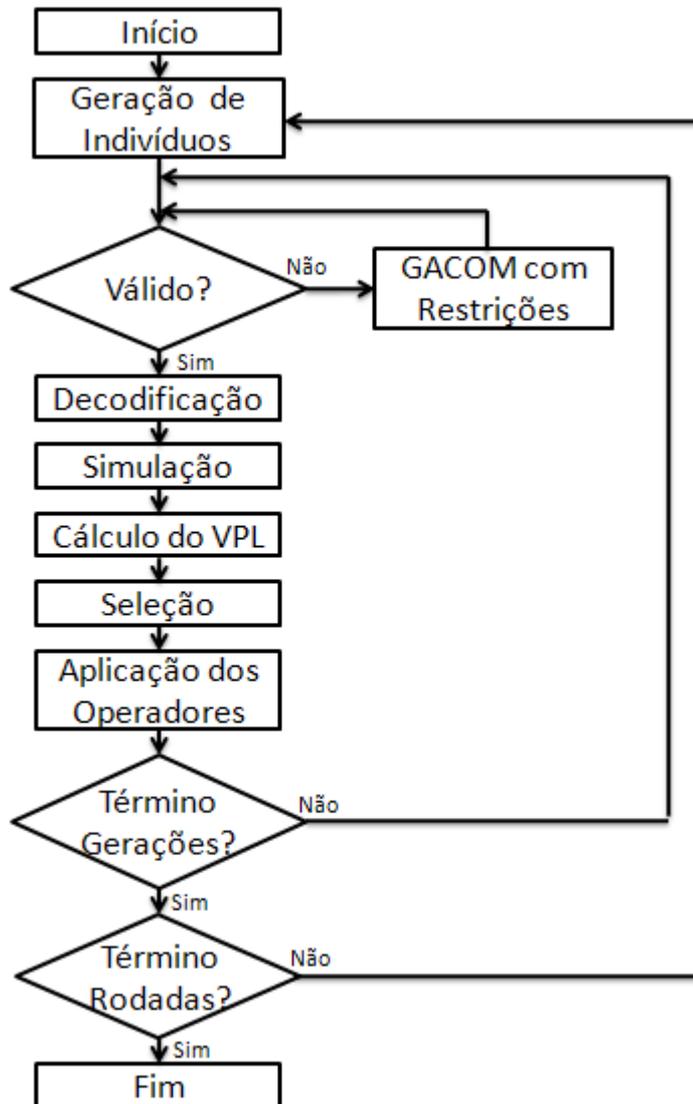


Figura 27. Diagrama do modelo evolucionário

4.2. Representação do Cromossomo

O objetivo da modelagem do cromossomo é encontrar uma forma de representar o sistema real matematicamente. O modelo deve representar o sistema real da forma mais simplificada possível considerando as necessidades para se resolver o problema em questão. Os parâmetros para otimização incluem: o número, os tipos e as configurações dos poços em um reservatório de petróleo. A avaliação do processo de otimização é baseada na resposta do simulador IMEX, sendo assim, serão utilizados diretamente no modelo de otimização somente as informações consideradas pelo simulador.

Como o simulador interpreta o poço como um conjunto de blocos onde um poço possui contato com o reservatório, o modelo proposto nesse trabalho deve

ser capaz de otimizar, da maneira mais eficiente possível, a posição das completções dos poços e o tipo de cada poço. A modelagem para otimizar a posição das completções dos poços não deve ser composta de muitas variáveis, caso contrário, pode inviabilizar a otimização de todas as variáveis em tempo hábil.

Inspirado no tratamento à completção dado pelo simulador e com base em trabalhos passados (EMERICK 2009), (TÚPAC 2005) e (YETEN 2003), todos os blocos do *grid* pertencentes à trajetória do poço são modelados como possuindo contato com os fluidos do reservatório.

Para modelagem da trajetória de um poço é considerada apenas o trecho do poço dentro do reservatório e onde existe trecho aberto ao fluxo. Mesmo esse trecho pode desenvolver trajetórias complexas, no entanto, optou-se por modelar a trajetória como sendo um segmento de reta. Tanto os poços principais como as laterais são limitados a segmentos de retas com origem no ponto da primeira completção até o ponto da última completção.

Para ser capaz de representar os tipos de poços multilaterais apresentados anteriormente nesse trabalho é necessário ser capaz de considerar a região curva entre o poço principal e a porção canhoneada da lateral. Devido aos diferentes tipos de regiões curvas, o tratamento da curvatura das laterais é feito de modo a permitir três opções de lateral: que a curvatura seja tal que a lateral seja paralela ao poço principal (Figura 28 (a)), que a curvatura seja tal que a lateral seja perpendicular ao poço principal (Figura 28 (b)) e o uso de trajetórias que não necessitam que haja curvatura e a lateral seja diagonal ao poço principal com o ponto inicial diretamente sobre o poço principal (Figura 28 (c)). Os trechos curvos são calculados para permitir maior flexibilidade no posicionamento das laterais, no entanto, esses trechos não são considerados como canhoneados para a simulação.

Existem configurações de poços multilaterais em que o poço principal não é aberto ao reservatório e, como a modelagem utilizada considera todos os pontos da trajetória entre o primeiro e o último ponto canhoneado como em contato com o reservatório, é necessário um indicador para classificar o poço principal como aberto ao fluxo ou não aberto ao fluxo em todos os blocos do poço.

Com essas considerações e o uso de laterais é possível que o sistema represente um poço curvo, mesmo modelando os poços como um segmento de

reta. Uma lateral selecionada para ser alocada no final do poço principal é interpretada como parte do poço principal e considera-se apenas a mudança na trajetória do poço, sem se utilizar do custo de uma junta como ilustrado na Figura 28 (d).

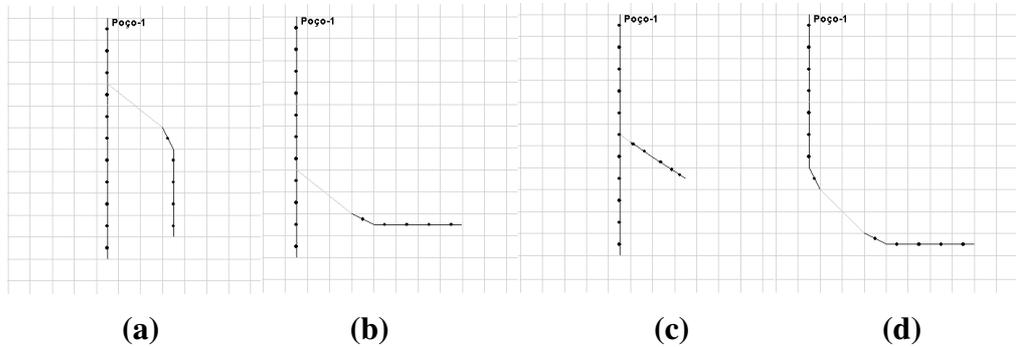


Figura 28. Poços no *grid*. (a) Poço com lateral do tipo paralela. (b) Poço com lateral do tipo perpendicular. (c) Poço com lateral do tipo diagonal. (d) Poço com lateral formando poço curvo.

Como descrito no capítulo 2, existem restrições para as configurações de poços que devem ser consideradas pelo modelo para que uma solução proposta possa auxiliar na elaboração de uma malha de drenagem para exploração de um reservatório real.

As restrições que serão consideradas neste trabalho são:

- Início de perfuração ou final em um bloco considerado como região nula;
- Poço sem completação em bloco válido;
- Bloco com duas completações;
- Poço ascendente;
- Comprimento máximo de poço e de lateral;
- Distância mínima entre poços;
- Distância mínima entre laterais de um mesmo poço;
- Lateral com ângulo de saída maior que 90° ;
- Ângulo de saída mínimo;
- Região no reservatório onde não se pode perfurar;
- Tipos de poços aceitáveis no reservatório.

Existem outras restrições observadas que não serão utilizadas nesse trabalho. A restrição de junta de lateral posicionada sobre rocha não própria não

está sendo considerada, pois a posição exata da conexão da lateral no poço principal não modifica o resultado da simulação, estando a junta posicionada em local inválido esta pode ser reposicionada em local adequado e manter as zonas produtoras nos mesmos blocos do *grid*. As restrições econômicas de valor máximo a ser investido, valor mínimo a ser investido e custo máximo de manutenção do projeto por ano não são consideradas diretamente, pois este trabalho faz um cálculo aproximado do VPL e dos investimentos, pois essas restrições podem prejudicar bons resultados. As restrições econômicas, embora não tratadas de forma direta, são tratadas de forma indireta. Uma vez que se limita o número máximo de poços, o investimento máximo também é limitado, e um custo fixo de instalações força um investimento mínimo.

É considerado importante que o modelo de evolução das laterais possa ser aplicado em projetos de expansão ou adensamento de malha de drenagem, sendo interessante ser capaz de evoluir laterais em poços já perfurados ou modelar uma possível expansão com laterais durante o projeto. Para isso o sistema deve ser capaz de evoluir com poços laterais de modo desacoplado à evolução dos poços principais.

Abaixo estão citados, de forma resumida, todos os parâmetros do plano de desenvolvimento utilizados ou afetados pelo sistema, com as variáveis que devem ser incluídas no cromossomo para serem otimizadas e as variáveis não otimizadas.

Variáveis manipuladas (devem ser modeladas nos cromossomos):

- Posição inicial do poço: início no trecho canhoneado;
- Posição final do poço: final do trecho canhoneado;
- Posição de saída da lateral: ponto onde a junta deve ser instalada;
- Posição final da lateral: final do trecho canhoneado da lateral;
- Tipo do poço: se produtor ou injetor;
- Completação do poço: o poço principal é canhoneado ou não;
- Tipo da lateral: lateral é paralela, perpendicular ou diagonal;
- Poço da lateral: indicação de qual poço principal pertence cada lateral;
- Existência do poço: indica se um poço proposto será utilizado;
- Existência da lateral: indica se uma lateral proposta será utilizada.

Variáveis dependentes (calculadas a partir das variáveis otimizadas):

- Posição inicial da lateral: início do trecho canhoneado da lateral, calculado a partir da posição final da lateral, ponto da junta e tipo da lateral;
- Trajetória dos poços: trajetória perfurada a partir da cabeça do poço até o *final do poço*, incluindo as laterais, calculada como segmentos de reta entre o *início* e o *final do poço* e entre os pontos iniciais e finais das laterais;
- Posição da cabeça do poço: posição a partir de onde é calculada a distância até a plataforma, considerada exatamente acima da posição inicial do poço;
- Número de poços produtores: número de poços produtores a serem perfurados, obtido através da contagem de poços do cromossomo que indicam o tipo como produtor e que possuem a máscara ativa;
- Número de poços injetores: número de poços injetores a serem perfurados, obtido através da contagem de poços do cromossomo que indicam o tipo como injetor e que possuem a máscara ativa;
- Tecnologias de poço empregadas: poços verticais, poços direcionais e poços multilaterais, indicando ainda se a lateral deve ser de poço aberto (direcional) ou completada (paralela e perpendicular), obtido pela observação dos poços gerados para a solução;
- Investimento do projeto: custos iniciais, instalações de superfície e poços. O investimento é calculado com base em valores de custos informados ao sistema com base na Equação (4.8).

Variáveis de entrada ou constantes:

- Posição da plataforma: posição onde a plataforma se encontra, utilizada para cálculo de distância aos poços;
- Número máximo de poços e de laterais: quantidade máxima de poços e laterais que o modelo pode utilizar;
- Raio da perfuração de laterais: raio de curvatura da trajetória direcional de uma lateral;
- Ângulo mínimo de saída de laterais: menor ângulo, dado o tipo de junta selecionado, que pode ser construído entre uma lateral e seu poço principal;

- Controles de operação de poço: taxas de produção e injeção, pressões a serem mantidas pelos poços e eventos para se fechar um poço. São consideradas constantes durante todo tempo de produção e utilizados os mesmos valores para todos os poços;
- Tempo de entrada de atuação dos poços: data na qual os poços gerados por esse modelo devem entrar em operação. Todos os poços utilizam a mesma data;
- Raio poço: raio interno do poço, necessário para a simulação. Utilizado o mesmo raio para todos os poços;
- Custos de instalações de superfície: custo da plataforma e das linhas de produção. O custo da plataforma é mantido constante, independente da vazão produzida ou número de poços. O custo das linhas de produção é dado por metro, seu valor absoluto varia de acordo com a distância dos poços e a lâmina d'água;
- Preço do óleo e do gás: valor esperado do preço do óleo e do gás durante o período de produção. Não é possível incluir uma distribuição de probabilidade, mas o valor pode ser diferente para cada tempo.

Variáveis de saída (obtidas com o resultado da simulação da resposta do sistema):

- Óleo recuperado: total de óleo produzido;
- Gás recuperado: total de gás produzido;
- Água injetada: total de água injetada;
- Água produzida: total de água produzida;
- FR: fator de recuperação alcançado;
- Vazão máxima de produção e tempo de produção máxima: momento de máxima produção de óleo e sua vazão. Como todos os poços são considerados como abertos ao mesmo tempo, esse indicador pode não estar de acordo com o que será obtido no reservatório;
- Tempo de duração do empreendimento: tempo no qual todos os poços produtores são fechados. Como todos os poços são considerados como abertos ao mesmo tempo, esse indicador pode não estar de acordo com o que será obtido no reservatório;

- *Break Even* (tempo de retorno): tempo no qual o investimento inicial é recuperado (VPL passa a ser positivo). Como todos os poços são considerados como abertos ao mesmo tempo, esse indicador pode não estar de acordo com o que será obtido no reservatório;
- Taxa interna de retorno: indicador de atratividade do projeto. Taxa de desconto que faz o projeto ter VPL igual a zero.

4.2.1. Representação 1

O primeiro modelo implementado utiliza uma população, onde cada indivíduo representa os poços principais e suas respectivas laterais. Cada poço principal é especificado por suas posições, inicial e final, em IJK e cada uma de suas laterais é descrita por sua posição da junta, como uma porcentagem do comprimento do poço principal, e sua posição final em IJK como pode ser observado na Figura 29. O cálculo do ponto da junta da lateral é de acordo com a Equação (4.1).

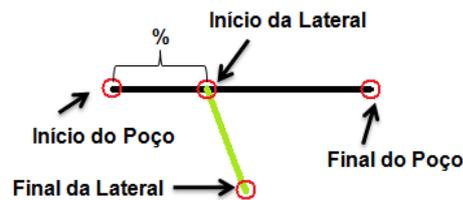


Figura 29. Pontos utilizados na representação 1.

$$\vec{P}_j = \frac{(\vec{P}_1 - \vec{P}_0) * \%c}{100} + \vec{P}_0 \quad (4.1)$$

Onde :

\vec{P}_j é o ponto da junta no poço principal;

\vec{P}_1 é o ponto final do poço principal;

\vec{P}_0 é o ponto inicial do poço principal;

$\%c$ é um valor de 0 a 100;

A estrutura do cromossomo é formada por dois segmentos, um inteiro e um binário. O cromossomo inteiro possui sete variáveis para cada poço principal e cinco variáveis por lateral associada a um poço principal. A construção do primeiro segmento se dá na forma de um poço principal, seguido por m laterais a ele associada, onde m é o número máximo de laterais por poço, seguido de um novo poço principal, até n poços principais e sua m -ésima lateral, onde n é o

número máximo de poços. O segundo segmento consiste em uma série de máscaras. Cada gene representa uma máscara que indica se um poço principal, ou uma de suas laterais, devem ser perfurados. No caso de um gene zero ser associado à máscara de um poço, esse poço não irá pertencer à alternativa e o número de poços para este indivíduo será menor que o número máximo de poços. O mesmo ocorre com a máscara das laterais. A Figura 30 mostra a estrutura do cromossomo para esse modelo.

O tratamento das restrições de número máximo de poços é dado pela própria construção do cromossomo, as demais restrições são tratadas pelo algoritmo do GACOM com Restrições.

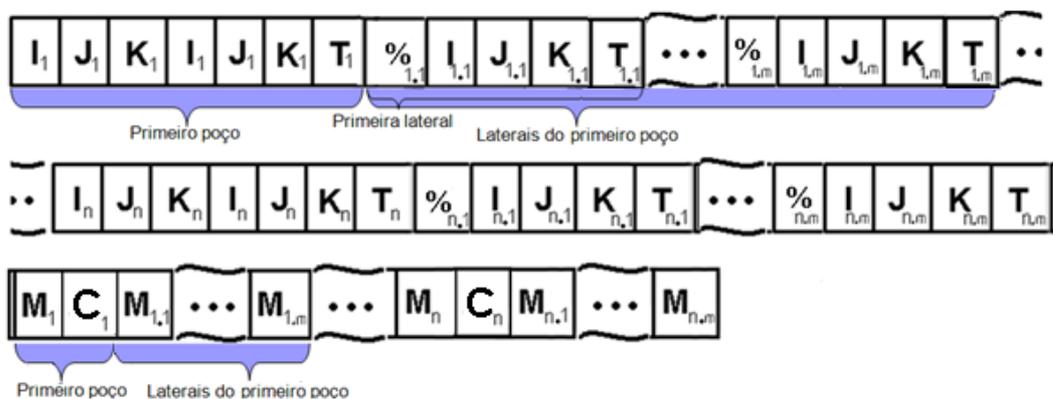


Figura 30. Cromossomo da representação 1.

Essa representação é uma expansão da idéia de otimização de poços sem laterais utilizada em (EMERICK 2009).

4.2.2. Representação 2

O segundo modelo é semelhante ao primeiro, no entanto, este se utiliza de duas populações distintas para representar uma solução (POTTER 2000), (DURHAM 1994). Na primeira população, um indivíduo representa os poços principais, contendo as posições iniciais e finais em IJK. Na segunda população, um indivíduo representa as laterais, contendo a posição inicial, como porcentagem do comprimento do poço principal, e a posição final em IJK. A estrutura do arranjo dos poços principais e das laterais é semelhante a da representação 1, no caso, cada população possui dois segmentos, um inteiro e um binário. As laterais são associadas aos poços de acordo com a sua ordem no cromossomo e a utilização ou não do poço ou da lateral é dada pela máscara. A Figura 31 ilustra a estrutura dos cromossomos para esse modelo.

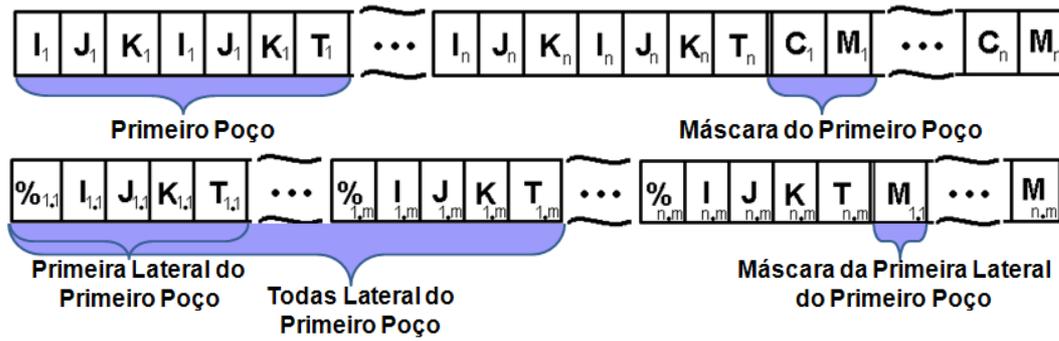


Figura 31. Cromossomo da representação 2.

Na primeira população é utilizado o algoritmo GACOM com Restrições para tratar as restrições que afetam o poço principal. Para tratar as restrições que se aplicam às laterais foi estabelecido um critério de montagem do poço principal com as laterais que consiste em adicionar as laterais uma a uma aos seus respectivos poços principais. Ao se inserir uma lateral, verifica-se se a solução permanece válida. Caso afirmativo, a lateral é mantida no poço; caso contrário, retira-se a lateral do poço como ilustrado no diagrama da Figura 32.

Como pode ser observado, a representação 2 é muito semelhante à representação 1. A modificação realizada é a transformação de uma única população em duas.

As vantagens desta representação incluem a possibilidade de se evoluir separadamente os poços principais e as laterais, diminuindo o número de variáveis em cada indivíduo, transformando, assim, o problema a ser resolvido em dois problemas mais simples, que devem ser resolvidos em menos gerações.

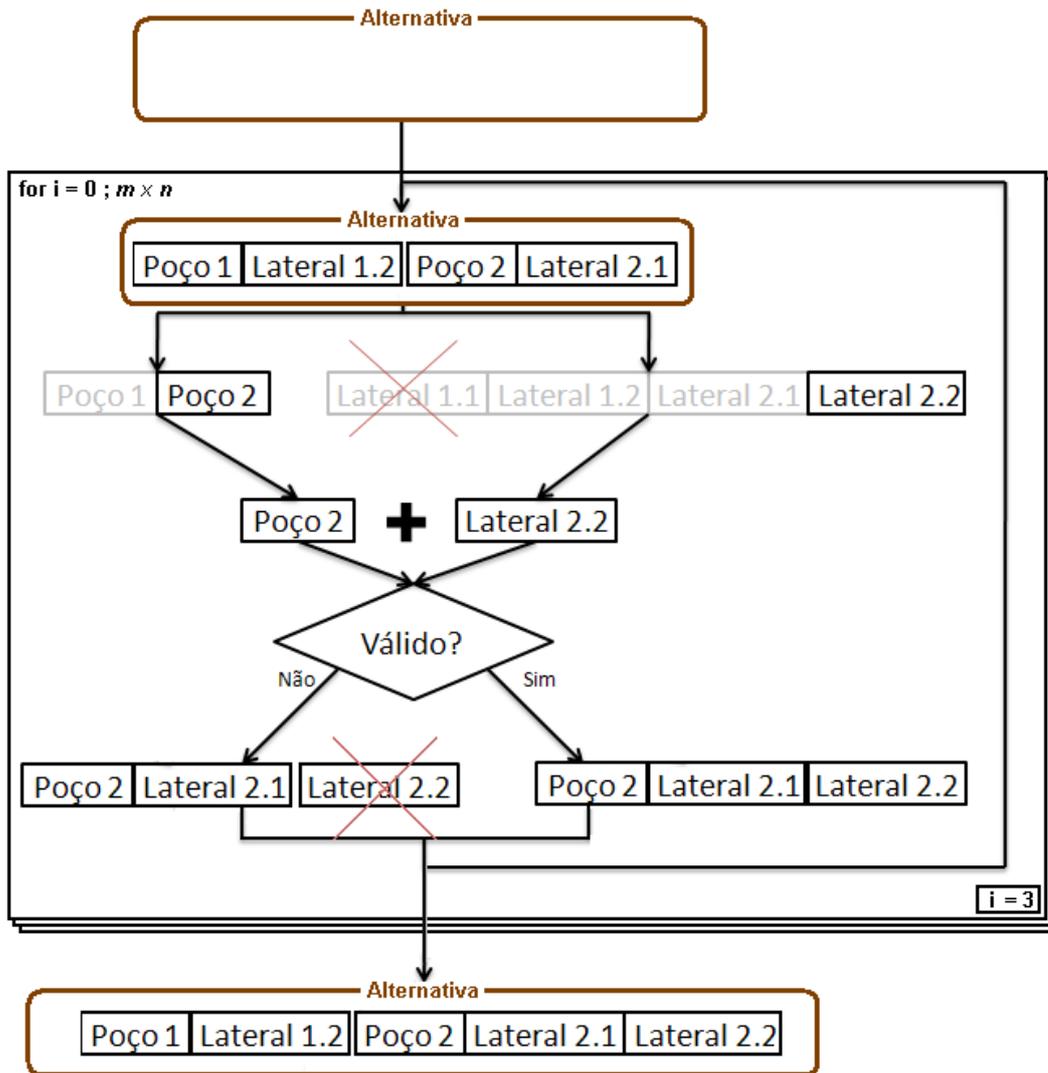


Figura 32. Validação de laterais.

As desvantagens desta representação incluem a impossibilidade de se aplicar o GACOM com Restrições na solução completa e o aumento do número de simulações por geração. O GACOM com Restrições não pode ser aplicado de forma completa, pois não é possível se construir uma população de referência garantidamente válida quando os poços principais e as laterais se modificam independentemente. Por isso foi utilizada a opção de se corrigir as soluções inválidas removendo-se a lateral que a torna inválida. Para isso foi adotada uma ordem de prioridade o que torna as primeiras laterais do cromossomo mais prováveis de serem válidas do que as laterais do final do cromossomo, atribuindo, assim, uma prioridade entre os poços principais de receberem laterais e entre as próprias laterais de um dado poço de serem aplicadas. O uso da co-evolução é feito simulando toda uma população com o melhor indivíduo da outra população.

Como estão sendo utilizadas duas populações, faz-se o dobro do número de simulações que um algoritmo com apenas uma população a cada geração.

4.2.3. Representação 3

O terceiro modelo implementado também utiliza duas populações distintas para representar os poços principais e as laterais. Como no segundo modelo, na primeira população, o indivíduo representa os poços principais, contendo as posições iniciais e finais em IJK. Na segunda população, o indivíduo representa as laterais, com números reais, contendo a posição inicial, como porcentagem do comprimento do poço principal (ρ), e a posição final, relativa à posição da junta com as variáveis de distância (ou comprimento L), ângulo de saída em relação ao poço principal (θ) e ângulo em torno da lateral (φ). A Figura 34 mostra a estrutura dos cromossomos para esse modelo e a Figura 33 ilustra os pontos utilizados nessa representação. A associação dos poços principais às laterais e o uso de máscaras em um segundo segmento são análogos aos da representação 2.

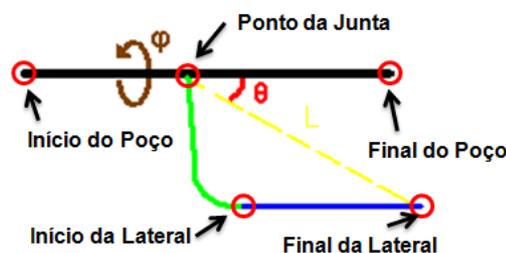


Figura 33. Pontos utilizados na representação 3.

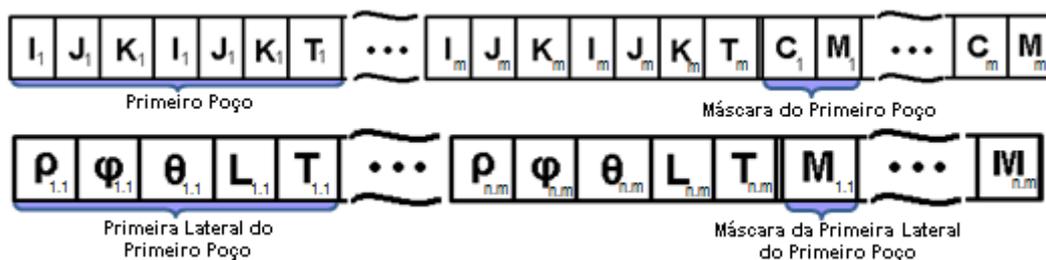


Figura 34. Cromossomo da representação 3.

O tratamento das restrições é conduzido do mesmo modo que na representação 2. Nesse caso, algumas restrições não poderão ser violadas devido à representação das laterais considerando o comprimento e o ângulo entre a lateral e o poço principal, essa representação garante que estes dois valores sempre estarão dentro dos valores válidos.

A principal variação da representação 3 é o uso de coordenadas relativas ao poço principal para cálculo do ponto final das laterais. Essa modificação é vantajosa quando se assume que uma lateral pode estar conectada a qualquer poço, e se assume também que uma boa configuração de laterais em um poço pode ser uma configuração boa para outros, por exemplo, uma das formas padrões apresentadas no capítulo 2. A utilização de uma coordenada fixa para o ponto final de uma lateral torna a maioria das laterais inválidas quando o poço principal tem sua posição modificada. Outra vantagem é que a representação adotada garante a restrição de comprimento máximo e ângulo de saída menor que 90° , sendo esses limites utilizados como limites dos genes.

A desvantagem de representar o ponto final de forma relativa é que mesmo encontrando a posição ótima das laterais de um poço, uma vez que a posição do poço principal seja modificada, a lateral, que se encontrava na posição ótima, muda de posição, deixando de estar na posição ótima.

4.2.4. Representação 4

O quarto modelo implementado utiliza uma única população para representar os poços principais e as laterais. Essa representação utiliza três segmentos: um inteiro, um real e um binário. O primeiro segmento representa os poços principais, contendo as posições iniciais e finais em IJK. O segundo segmento representa as laterais, com números reais, contendo a posição inicial, como porcentagem do comprimento do poço principal (ρ), e a posição final, relativa à posição da junta com as variáveis de distância (ou comprimento L), ângulo de saída em relação ao poço principal (θ), ângulo em torno da lateral (φ), o tipo da lateral e um índice indicando a qual poço principal a lateral pertence. O terceiro segmento é composto pelas máscaras dos poços e um indicador se o poço principal é canhoneado. A Figura 35 mostra a estrutura dos cromossomos para esse modelo e a Figura 33 ilustra os pontos utilizados nessa representação.

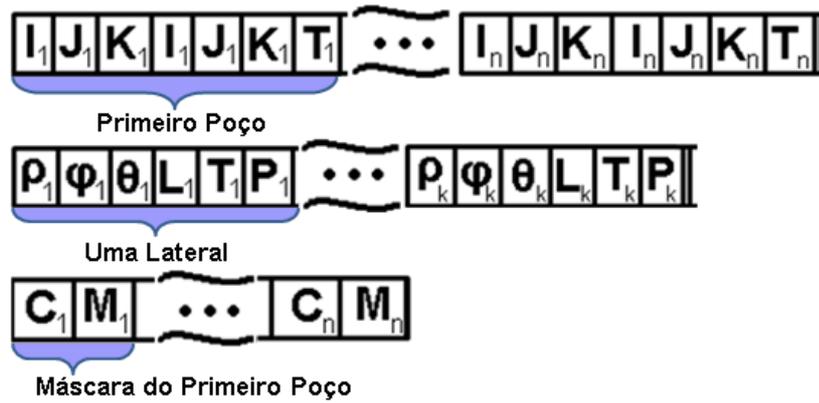


Figura 35. Cromossomo da representação 4.

O diagrama na Figura 36 ilustra a associação de laterais aos poços utilizando índices. Nesse caso dois valores são utilizados como entrada: o número máximo de laterais por poço, que é adicionado à lista de restrições tratadas pelo algoritmo descrito na Figura 36, e um número máximo total de laterais (k), que é utilizado para determinar o tamanho do segundo segmento. Essa combinação de variáveis pode diminuir significativamente o tamanho do cromossomo, já que o número máximo de laterais deixa de ser a multiplicação do número máximo de laterais por poço pelo número máximo de poços, e passa ser um valor estipulado pelo usuário (k), fazendo com que sejam necessários menos que n vezes m laterais para descrever uma solução que seja capaz de representar um poço com m laterais.

Quando se utiliza a associação das laterais aos poços pela ordem do cromossomo utiliza-se uma máscara indicando se a lateral deveria ser associada ao poço. Nesse caso tanto o poço que possui a lateral como a máscara da lateral são expressos pelo índice, o índice para um poço existente representa a associação da lateral a esse poço, o índice a um poço inexistente representa a não associação dessa lateral a nenhum poço. Como ocorre com a lateral em azul na Figura 36 que está com índice 3, onde existem apenas dois poços principais, sendo, assim, descartada.

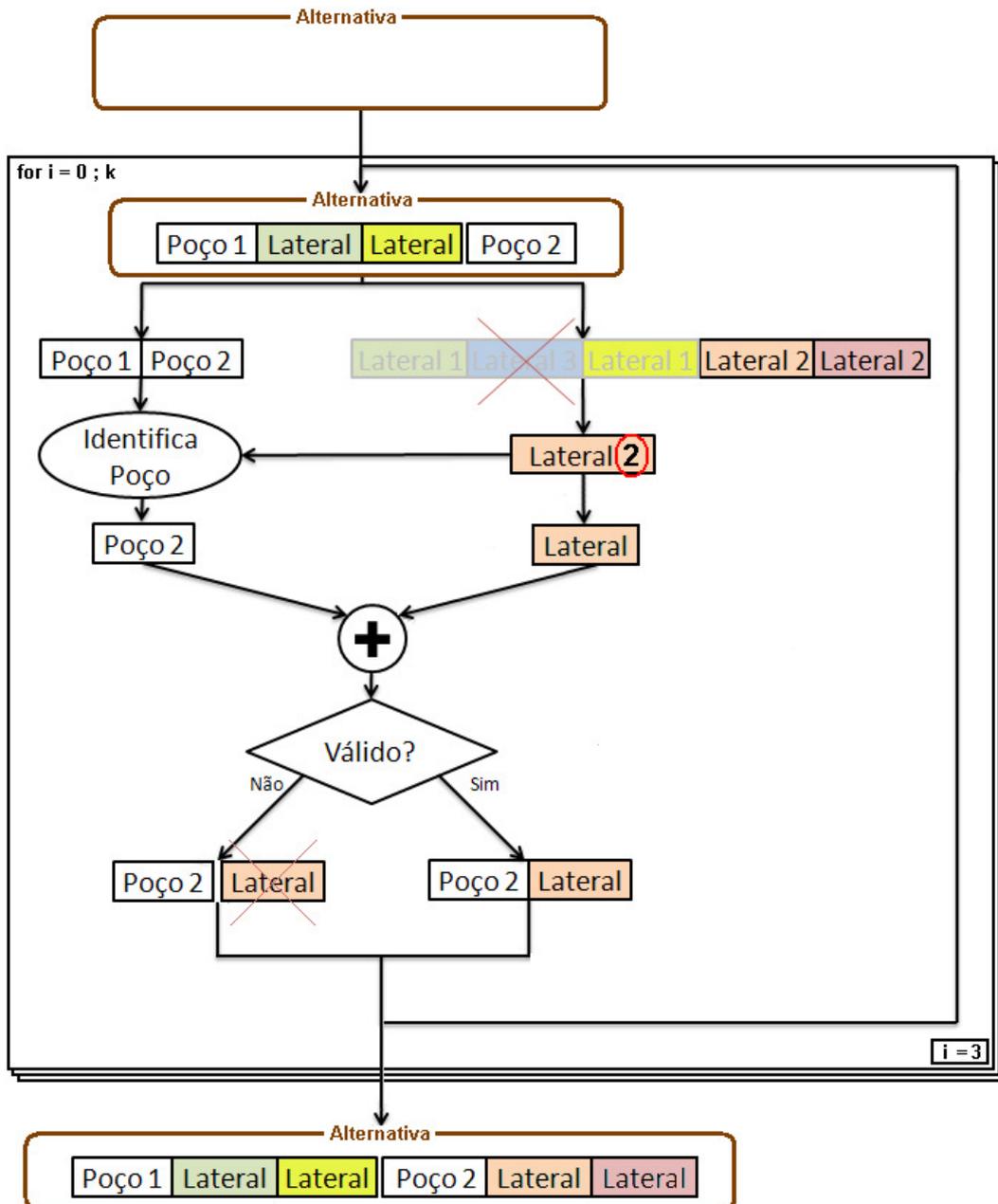


Figura 36. Tratamento de número de laterais por índice.

O tratamento das restrições é conduzido do mesmo modo que na representação 3.

A principal diferença entre esta representação (representação 4) e a representação 3 é o uso de apenas uma população por essa representação. Como as duas populações da representação 3 estão separadas em segmentos diferentes, nesta representação estes continuam possuindo um certo grau de dissociação, embora suas avaliações sejam a mesma. Para manter a liberdade entre os poços e as laterais e diminuir o número de genes de um indivíduo, o método de associação de laterais foi modificado.

A principal vantagem dessa representação é não estar sujeita a um problema de Equilíbrio de Nash (NASH 1950) detectado nas representações com coevolução. Aplicando a coevolução ao problema de otimização de poços multilaterais, como modelado na representação 2 e 3, caso a população de laterais encontre a configuração ótima para uma dada configuração de poços principais e, dado essa configuração ótima de laterais, a configuração de poços principais atual seja a ótima, nenhuma das populações seria capaz de evoluir a partir desse ponto, independente do uso de mutação ou qualquer outro operador genético. Como a representação 4 utiliza uma única população, é possível modificar os poços principais e as laterais simultaneamente, além de se simular todas as configurações, não somente o melhor poço principal ou a melhor configuração de laterais.

4.3. Geração da População Inicial

A geração da população inicial de um Algoritmo Genético é fundamental para a eficiência do processo de otimização. Uma boa população inicial é aquela formada por indivíduos com boa avaliação e com ampla diversidade genética. Partindo-se de uma população inicial de indivíduos mais promissores, há uma chance maior de se encontrar soluções melhores em um período de tempo mais curto. Porém, nem sempre é fácil obter indivíduos aleatórios válidos para compor uma população inicial de indivíduos, o que é característico dos problemas tratados por este trabalho. Dependendo da complexidade do modelo de reservatório, cuja malha de drenagem se pretende otimizar, a obtenção de uma configuração de poços (alternativa) válida é uma tarefa extremamente difícil, devido às restrições impostas pelo problema.

Devido à técnica de tratamento de restrições utilizada, o GACOM com Restrições, é necessário criar duas populações, uma respeitando todas as restrições do problema (população de referência) e outra respeitando pelo menos as restrições de domínio (população de busca). Cada população é composta de a alternativas com p poços cada. Dentre as a alternativas que compõem a população inicial de referência, uma ou mais podem ser informadas pelo usuário, são as chamadas sementes iniciais. As sementes iniciais são uma forma de incorporar o conhecimento de especialistas no processo de otimização. Um especialista pode sugerir algumas configurações de poços sabidamente promissoras e estas

colaboram para conduzir o processo de evolução do Algoritmo Genético na busca de alternativas ainda melhores e em menos tempo, como constatado em (EMERICK 2009).

Como mencionado anteriormente, uma população inicial com alternativas promissoras tende a melhorar o desempenho e a eficiência do algoritmo. Para se obter a diversidade da população, sempre são incorporados indivíduos aleatórios, independentemente de ter sido ou não informada alguma semente inicial. Para a criação de um poço aleatório, que tenha maior probabilidade de ser um poço válido, é criada uma lista de blocos válidos da malha do reservatório considerando todas as restrições do problema. Desta lista é selecionado um bloco para ser o ponto inicial do poço e o ponto final é determinado pelo sorteio aleatório de três valores, um ângulo em relação ao plano XY θ , um fator normalizado indicando a profundidade z , que juntos determinam a direção do poço no espaço da malha e o terceiro valor corresponde ao comprimento l , como ilustrado na Figura 37.

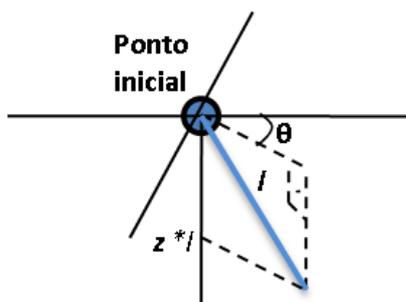


Figura 37. Variáveis sorteadas no poço principal

Para a criação da população inicial de busca utiliza-se o método descrito acima para gerar os poços com maior probabilidade de serem válidos. Na população de referência, para que uma alternativa seja gerada aleatoriamente e ainda seja válida, tenta-se por n vezes (onde n é o número máximo de tentativas) criar um poço válido que possa ser adicionado à alternativa, de modo que esta permaneça válida. Esse procedimento é repetido até que sejam adicionados p poços à alternativa ou até que o limite de n tentativas seja alcançado. Caso não se consiga adicionar p poços à alternativa, em n tentativas, removem-se os poços já adicionados e se reinicia o processo por até n vezes.

No caso de modelos muito restritos, pode-se não conseguir gerar uma alternativa com p poços. Assim, reduz-se, de um em um, o número de poços a serem gerados aleatoriamente pelo procedimento acima. Os poços que não são gerados pelo procedimento acima são gerados como poços pontuais, onde um

poço pontual é aquele cujos valores de I , J e K iniciais são iguais aos I , J e K finais, e este é interpretado como um poço vertical no centro do bloco. Essa abordagem se mostrou funcional ao conseguir encontrar indivíduos válidos para todos os modelos testados. Existe um balanço entre buscar poços da maneira mais rápida possível e buscar poços com melhor informação genética possível. Por esse motivo, tenta-se evitar a criação de poços pontuais, mais rápidos de serem criados, porém, com menos informação genética para a otimização. Os algoritmos ilustrados na Figura 38 e na Figura 39 apresentam as funções utilizadas para a construção da população inicial de um problema de otimização tratado pelo GACOM com Restrições.

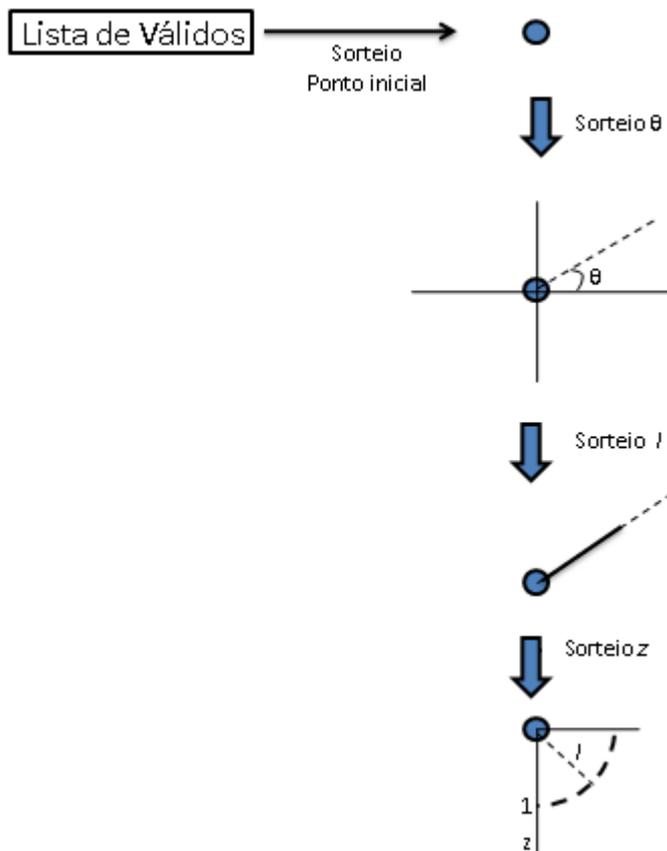


Figura 38. Criação de poço válido

```

função gerar_indivíduo_aleatório_referência()
início
  para (número de poços = p) até (número de poços = 0)
    enquanto (tentativas para alternativa válida < n)
      enquanto (tentativas para poço válido < n e
                número de poços da alternativa < número de
                poços)
        gerar um poço aleatório
        adicionar o poço à alternativa
      se (alternativa não é válida)
        retirar o poço da alternativa
      fim se

```

```

        incrementar de 1 o número de tentativas para poço
válido
    fim enquanto
    enquanto (número de poços < n e número de poços da
alternativa < p)
        gerar um poço pontual
        adicionar o poço pontual à alternativa
        se (alternativa não é válida)
            retirar poço pontual
        fim se
    incrementar de 1 o número de tentativas para poço
válido
    fim enquanto
    se (número de poços da alternativa == p)
        retorna alternativa
    fim se
    incrementar de 1 o número de tentativas para alternativa
válida
    fim enquanto
    fim para
    retorna não encontrado
    fim

```

Figura 39. Geração de alternativa válida

Este método de criação de população inicial é aplicado no segmento que utiliza o GACOM com Restrições, no entanto, os outros segmentos devem ser gerados duas vezes para preencher as populações de busca e de referência. A geração dos dois segmentos restantes (laterais e máscaras) é feita aleatoriamente, pois o método de tratamento de restrições aplicado a esses segmentos não exige que todos seus componentes gerados sejam válidos.

Os segmentos de laterais e máscaras criados para a população de referência são utilizados apenas uma vez por rodada do algoritmo genético, durante a primeira simulação da população de referência. Após esse momento o GACOM com Restrições não utiliza mais esses segmentos, os indivíduos criados a partir da combinação da população de busca com a população de referência carregam o segundo e o terceiro segmento da população de busca, sem causar modificações a eles, descartando esses segmentos do indivíduo da referência.

Os poços principais da população de busca são criados utilizando o método de criação de poços válidos, mas, sem removê-los caso tornem a alternativa inválida. Isso é feito para aumentar a velocidade de evolução do algoritmo, com a criação de poços próximos aos poços válidos as modificações no indivíduo para torná-lo válido são menores, fazendo com que as características dos indivíduos de busca possuam maior relação com a avaliação obtida.

Para o tratamento de restrições de tecnologias aplicadas à solução (por exemplo, não utilizar tecnologia direcional ou multilateral) ou de proporção entre o número de poços produtores e injetores, a população inicial deve ser criada respeitando essas restrições. Por exemplo, para geração de poços somente horizontais ou somente verticais faz-se o z fixo em zero ou em um durante a geração do poço aleatório. Caso se tentasse tratar essas restrições simplesmente rejeitando os poços inválidos, isso tornaria computacionalmente inviável a tarefa de encontrar alternativas válidas para os reservatórios mais restritos.

4.4. Operadores Genéticos

Os operadores genéticos utilizados nesse trabalho são baseados em operações com números reais, inteiros e binários. Abaixo são descritos as operações utilizadas, os objetivos de cada operação e quando podem ou não ser aplicadas. Essas operações ocorrem somente na população de busca, onde não é necessário que o resultado de uma operação seja válido, no entanto, é recomendado manter os indivíduos com suas características as mais válidas possíveis, para melhor desempenho da evolução.

Uma característica utilizada nesse trabalho é a aplicação de operadores no fenótipo do indivíduo ao invés de se operar o genótipo. O genótipo é o valor numérico associado a cada variável (gene) de um indivíduo, e modificações nesses valores numéricos causarão modificações nas propriedades do poço. O fenótipo é a interpretação dos genes para formar um poço, uma modificação nas características do poço acarreta na modificação de uma ou mais variáveis do cromossomo.

As coordenadas I, J, e K do ponto inicial e final dos poços principais estão sendo consideradas como os genes do cromossomo, genótipo. É interessante se utilizar de operações que não sejam limitadas a modificações diretas nas coordenadas dos pontos iniciais e finais dos poços principais. Foi considerado um espaço de variáveis diferentes para representar um poço principal que utilize características físicas do poço ao invés de somente coordenadas geométricas, fenótipo. O fenótipo de um poço seria constituído da sua posição inicial em coordenadas de reservatório X, Y e Z, e não em sua coordenada no *grid* I, J e K, e de três outros parâmetros indicando sua posição final: o comprimento do poço (l), o ângulo da sua projeção no plano XY a partir do eixo X (θ) e um fator

normalizado de verticalidade (z), que seria o deslocamento do poço no eixo Z divididos pelo comprimento do poço. A equação (4.2) descreve a transformação do genótipo de um poço principal em seu fenótipo.

$$\begin{aligned}
 l &= \left| \vec{P}_f - \vec{P}_i \right| \\
 z &= \frac{P_{fz} - P_{iz}}{l} \\
 \theta &= \tan^{-1} \left(\frac{P_{fy} - P_{iy}}{P_{fx} - P_{ix}} \right)
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

Onde:

\vec{P}_i representa um vetor das coordenadas do ponto inicial do poço em X, Y, Z;

\vec{P}_f representa um vetor das coordenadas do ponto final do poço em X, Y, Z.

As representações criadas possuem um setor do cromossomo dedicado para os poços principais, um setor dedicado para as laterais e um setor dedicado para as máscaras. De acordo com a representação, os poços principais podem estar na mesma população que as laterais ou em populações distintas, mas para as representações 2, 3 e 4 cada um possui seu segmento. Os operadores são aplicados por segmentos, de forma independente, operações em um segmento não consideram os outros segmentos de um indivíduo nem os modifica.

Para o segmento de poços principais foram estabelecidos os seguintes operadores:

Cruzamento de um ponto: consiste em selecionar dois elementos da população do Algoritmo Genético, determinar um ponto de corte para os dois e efetuar a troca da informação genética dos dois elementos a partir deste ponto. Uma vez que o segmento que define os poços principais não deve ser cortado no meio de uma definição de poço, os pontos de corte foram definidos de forma que este corte ocorra sempre após o gene que define o tipo do poço, conforme ilustrado na Figura 40.



Figura 40. Cruzamento de um ponto.

Cruzamento de dois pontos: é semelhante ao cruzamento de um ponto e respeita os pontos de corte, no entanto, são determinados dois pontos e a troca de genes ocorre somente entre esses dois pontos, como ilustrado na Figura 41.



Figura 41. Cruzamento de dois pontos.

Cruzamento aritmético: consiste na escolha de dois elementos da população do Algoritmo Genético sobre os quais se aplica uma média ponderada através de um fator de ponderação $\lambda \in [0,1]$, conforme ilustra a Equação(4.3).

$$\begin{aligned} x'_1 &= \lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2 \\ x'_2 &= \lambda x_2 + (1 - \lambda)x_1 \end{aligned} \quad (4.3)$$

Onde:

x_i é o valor dos genes para o genitor i .

x'_i é o valor dos genes para o descendente i .

Dado que os cromossomos x_i contêm valores de tipo inteiro, o resultado da operação de média ponderada é arredondado para o inteiro mais próximo. Uma característica desse operador é que ele atua sobre o cromossomo inteiro, isto é, sobre todos os poços das duas alternativas escolhidas, porém o tipo do poço não é modificado.

Cruzamento do ponto inicial: de forma semelhante ao cruzamento de um ponto, consiste em determinar um ponto de corte e efetuar a troca da informação

genética a partir deste ponto. Nesse caso a troca dos genes é feita apenas na parte do cromossomo que representa a posição inicial do poço e a posição dos pontos finais é recalculada de modo a manter o fenótipo do ponto final.

Na Figura 42 (a), tem-se o resultado de um dos descendentes do cruzamento de ponto inicial onde o ponto final é recalculado, operação por fenótipo. Na Figura 42 (b), tem-se o resultado de um dos descendentes do cruzamento de ponto inicial onde o ponto final não é recalculado, operação por genótipo.

Na Figura 42 os poços de um genitor estão representados em azul e os poços do outro genitor estão representados em vermelho. Pode-se observar que os poços resultantes em amarelo, operação por fenótipo, mantêm as características de um dos poços genitores e assume a posição inicial do outro poço genitor. Analisando os poços verdes, resultantes de operação por genótipo, observa-se que estes não representam uma solução com informações intermediárias entre os genitores. Como o princípio de um cruzamento é combinar dois indivíduos de boa avaliação com o objetivo de se gerar descendentes com as características positivas de ambos os genitores e com maior aptidão, justifica-se, nesse caso, o uso do fenótipo para operações genéticas. Outra vantagem é a menor probabilidade de se gerar indivíduos inválidos, como pode ser observado abaixo, um dos poços verdes pode estar violando a restrição de comprimento máximo de poço.

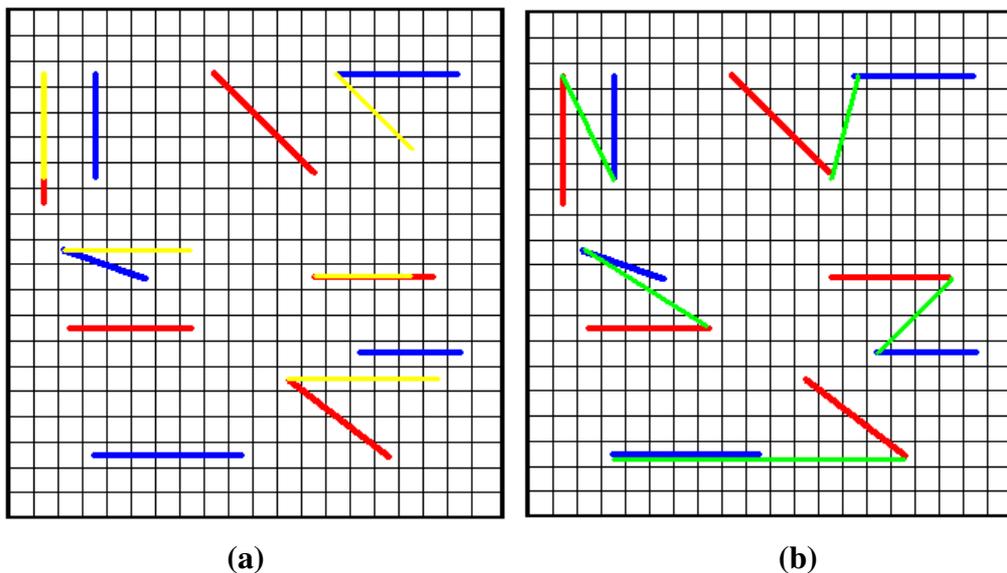


Figura 42. Cruzamento de ponto inicial por fenótipo (a) e por genótipo

(b)

Cruzamento do ponto final: de forma semelhante ao cruzamento de ponto inicial, consiste em determinar um ponto de corte para dois indivíduos selecionados e efetuar a troca da informação genética, dos fenótipos, dos pontos finais.

Cruzamento aritmético do ponto inicial: consiste em determinar um ponto de corte para dois indivíduos selecionados e efetuar uma média ponderada da informação genética dos pontos iniciais dos dois elementos, a partir deste ponto. Recalcula-se a posição dos pontos finais mantendo o fenótipo.

Cruzamento aritmético do ponto final: consiste em determinar um ponto de corte para dois indivíduos selecionados e efetuar uma média ponderada da informação genética, dos fenótipos, dos pontos finais dos dois elementos a partir deste ponto.

Mutação de tipo de poço: consiste na seleção de um único indivíduo e a modificação dos genes correspondentes ao tipo do poço.

Mutação de comprimento: consiste na seleção de um único indivíduo e a modificação dos genes referentes aos pontos finais dos poços principais modificando somente o fenótipo de comprimento.

Mutação uniforme: consiste na seleção de um único indivíduo e a modificação de um ou mais valores de seu fenótipo, sem modificar o tipo de poço.

A Figura 43 ilustra a diferença entre se fazer uma mutação utilizando o fenótipo, Figura 43 (a), e genótipo, Figura 43 (b). Ao sortear um ou mais valores aleatórios para variáveis de um poço tem-se por objetivo incluir nova informação genética à população, isso não significa criar um indivíduo completamente diferente do seu genitor. Os indivíduos mais aptos possuem maior probabilidade de serem selecionados para a aplicação de operadores, caso a mutação modifique demasiadamente um indivíduo, este pode não representar mais uma boa solução e a nova informação genética, que deveria ser incorporada à população, será descartada. O uso de fenótipo para a mutação minimiza a mudança da solução, como observado nos poços amarelos, enquanto incorporam nova informação genética à população. Outro motivo para se utilizar operadores de mutação baseados no fenótipo é a grande probabilidade de se gerar indivíduos inválidos por comprimento máximo, ao se modificar uma coordenada para um valor distante ao da outra extremidade do poço, como podem ser observados nos poços em verde, Figura 43 (b).

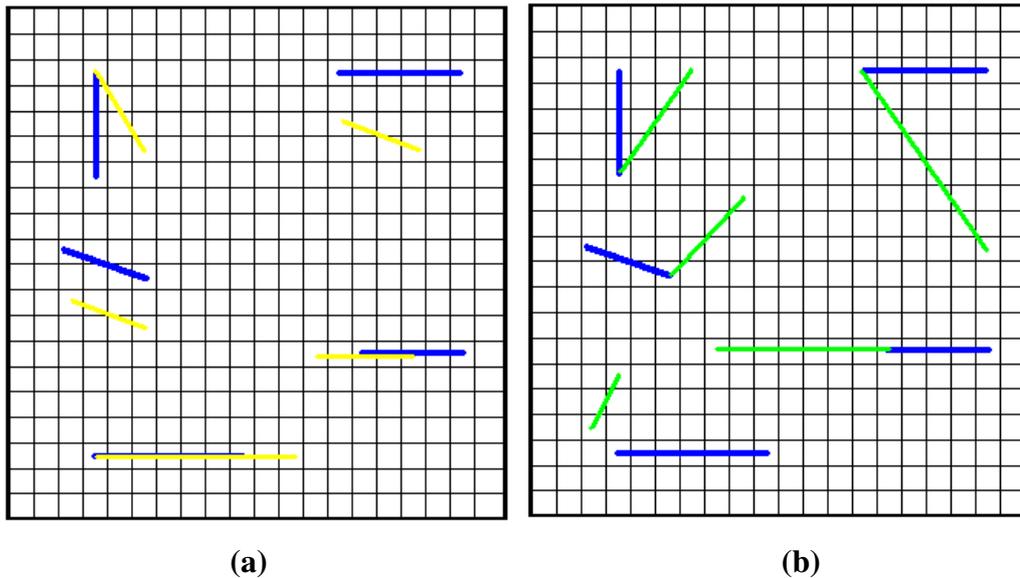


Figura 43. Mutação uniforme por fenótipo (a) e por genótipo (b)

Para o segmento de laterais foram estabelecidos os seguintes operadores:

Cruzamento aritmético para laterais: consiste na escolha de dois elementos da população do Algoritmo Genético sobre os quais se aplica uma média ponderada através de um fator de ponderação de acordo com a Equação (4.3), sem modificar o gene indicativo de poço (no caso da representação 4).

Cruzamento de um ponto para laterais: consiste em selecionar dois elementos da população do Algoritmo Genético, determinar um ponto de corte para os dois e efetuar a troca da informação genética dos dois elementos a partir deste ponto. Uma vez que os trechos que definem uma lateral não devem ser cortados, os pontos de corte foram definidos de forma que este corte ocorra sempre entre as laterais.

Mutação uniforme para laterais: consiste na seleção de um único indivíduo e a modificação de um ou mais genes para um valor aleatório dentro dos limites de cada gene.

Mutação controlada para laterais: consiste na seleção de um único indivíduo e a modificação de um ou mais genes para um valor próximo ao valor atual do gene. A operação consiste em somar ou subtrair 10% do valor máximo do gene ao seu valor atual.

Mutação de comprimento para laterais: consiste na seleção de um único indivíduo e a modificação dos genes referentes aos comprimentos.

Mutação de poços para laterais: aplicado somente na representação 4, consiste na seleção de um único indivíduo e a modificação dos genes referentes aos índices de poço das laterais, modificando a qual poço a lateral pertence ou se esta não deve ser utilizada.

Para o segmento das máscaras dos poços e das laterais (quando existente) foram estabelecidos os seguintes operadores:

Cruzamento de um ponto: consiste em selecionar dois elementos da população do Algoritmo Genético, determinar um ponto de corte para os dois e efetuar a troca da informação genética dos dois elementos a partir deste ponto. Esse cruzamento não possui pontos de corte determinados.

Mutação uniforme: consiste na seleção de um único indivíduo e a modificação dos genes aleatoriamente.

Para o algoritmo do GACOM com Restrições um indivíduo da população de busca é combinado com um indivíduo da população de referência gerando um indivíduo válido para se poder avaliar o indivíduo da população de busca. Essa combinação é obtida aplicando-se um operador de cruzamento aritmético. No entanto, combinar diretamente esses indivíduos pode não ser a melhor maneira de se gerar o indivíduo válido. Isso porque esse indivíduo deve ser capaz de representar a aptidão do indivíduo da população de busca e, caso esse novo indivíduo válido seja muito diferente do indivíduo inicial, sua aptidão pode não representar corretamente a aptidão do indivíduo da população de busca.

A técnica empregada para a combinação dos indivíduos de busca e de referência consiste em agrupar os poços que estejam mais próximos e, assim, fazer o cruzamento aritmético. A Figura 44 (a) mostra quais poços seriam combinados utilizando a técnica de agrupamento e a Figura 44 (b) ilustra os poços que seriam combinados sem o agrupamento, onde as linhas azuis representam os poços do primeiro segmento da população de busca e as linhas vermelhas representam os poços principais do indivíduo da população de referência.

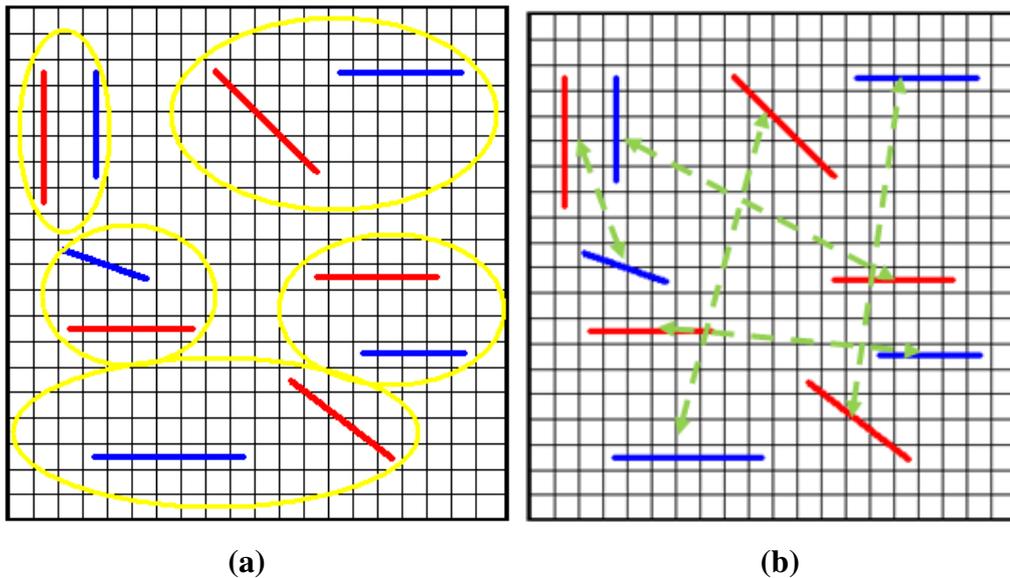


Figura 44. Cruzamento entre população de busca e referência por fenótipo (a) e por genótipo (b).

Uma vez agrupados os poços são combinados utilizando o operador de cruzamento aritmético descrito para os poços principais acima.

4.5. Função de Avaliação

A função de avaliação é a função pela qual os indivíduos serão avaliados. A avaliação de um indivíduo atribui a este um valor de aptidão, e essa aptidão é o objetivo pelo qual o algoritmo genético evolui a população. No caso de desejar otimizar mais de um parâmetro, problema multi-objetivo, deve-se combinar os parâmetros em um único valor quantitativo.

A função de avaliação utilizada para otimização neste trabalho é multi-objetivo. Os objetivos que serão considerados para otimizar o plano de desenvolvimento atuando na malha de drenagem incluem: a maximização da receita por óleo produzido e gás produzido, a minimização das despesas com poços, despesas com *liners*, despesas com injeção de água, despesas com tratamento de água produzida e o desconto dessas receitas e despesas no tempo.

Para formulação de uma função que possa comparar a aptidão dos indivíduos de uma população e considere todos os objetivos citados, é utilizada uma aproximação do VPL. Um cálculo de VPL simplificado é uma forma de se ponderar as variáveis de interesse de modo que a aptidão de um indivíduo seja sua atratividade comercial. No entanto, caso exista alguma prioridade com relação aos

objetivos desejados pode-se modificar os pesos das ponderações e fazer com que o algoritmo otimize uma propriedade que não seja a pura eficiência econômica.

A função de avaliação pode incluir um custo maior na perfuração de poços direcionais caso se deseje penalizar essas configurações, ou pode-se super valorar o preço do óleo e favorecer as soluções com maior produção. Este trabalho utilizará além da maximização de VPL, como função de avaliação, a maximização da quantidade de óleo produzida descontada no tempo.

Para o cálculo do VPL simplificado e para o cálculo do óleo produzido descontado no tempo é necessário se obter as curvas de produção dos indivíduos avaliados. Para se gerar as curvas de produção é necessário se simular o indivíduo em forma de alternativa de produção utilizando um simulador de reservatórios. Sendo assim deve-se ser capaz de transformar um indivíduo em um sistema de dados interpretável pelo simulador e recuperar as curvas de produção resultantes.

O processo de avaliação consiste em transformar um indivíduo em uma alternativa de produção, garantir a validade dessa alternativa, simular a alternativa e, em seguida, calcular o valor da avaliação.

4.5.1. Decodificação e Validação do Cromossomo

A decodificação do indivíduo consiste em interpretar os segmentos do cromossomo e obter a alternativa de produção que é representada pelo indivíduo. As técnicas de representação de cromossomo utilizadas neste trabalho requerem que durante a decodificação a alternativa seja validada, ou seja, as restrições do problema modificam a alternativa durante a sua decodificação. Decodificar um indivíduo para uma alternativa consiste em determinar os pontos do início e término das zonas canhoneadas de todos os poços em coordenadas do *grid* (IJK) ou em coordenadas do reservatório (XYZ).

O segmento dos poços principais é sempre válido em todas as representações, pois é utilizado o método GACOM com Restrições nesse segmento. A decodificação desse segmento é direta, pois cada gene representa uma coordenada em IJK da posição inicial e final do poço principal. A interpretação dos poços principais é conduzida de modo que apenas os poços principais cujas máscaras associadas estejam ativadas são adicionados à alternativa, a máscara de canhoneamento e o tipo são lidos e as propriedades são aplicadas ao poço.

A decodificação das laterais das representações 1 e 2, é feita de modo que o ponto final da lateral é obtido diretamente pelos genes que representam suas coordenadas em IJK e a posição da junta da lateral é dada pela Equação (4.1) em função do gene que contém o valor da porcentagem. A máscara de lateral é utilizada para determinar se a lateral será inserida no poço principal ou não. O tipo da lateral é lido e, em função dos pontos já decodificados, é calculada a posição do início da lateral. Uma vez determinado todos os pontos da lateral é necessário, mesmo que inserida a lateral, que a alternativa continue válida; caso contrário, a lateral é removida.

A decodificação das laterais da representação 3 é conduzida inicialmente identificando quais laterais devem ser atribuídas aos poços. As laterais cujas máscaras associadas estejam indicando a não construção da lateral, não são associadas aos poços.

A decodificação das laterais da representação 4 é conduzida inicialmente identificando-se a qual poço a lateral pertence através do gene que indica o índice do poço; caso o índice seja maior que o número de poços, a lateral não está associada a nenhum poço e não será construída.

Para as representações 3 e 4, como próximo passo, se obtém a posição da junta pela Equação (4.4) utilizando o gene que representa ρ . O ponto final da lateral é obtido interpretando os valores dos genes de comprimento (l), ângulo a partir do poço principal (θ) e ângulo em torno do poço (φ) (Figura 45) através da Equação (4.5). Com base no gene que representa o tipo da lateral determina-se seu tipo de acordo com a Tabela 2. Com base nos pontos calculados e o tipo da lateral calcula-se a posição inicial da lateral (L_i) através da Equação (4.6). Uma vez estabelecidos todos os pontos, testa-se a alternativa. Na representação 4 inclui-se a esse teste uma verificação do número máximo de laterais por poço.

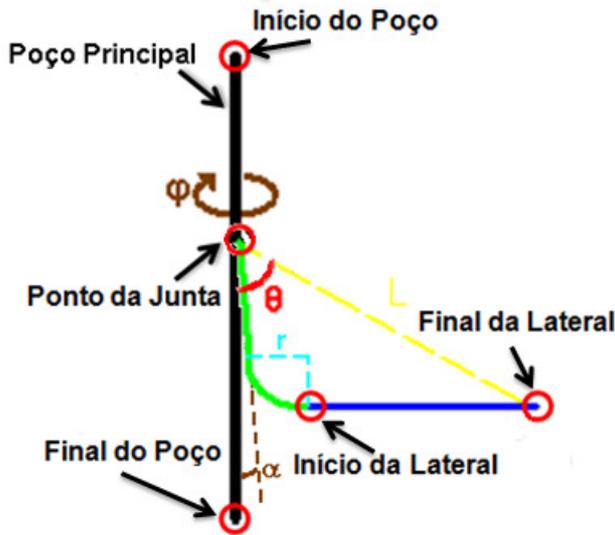


Figura 45. Decodificação de poços multilaterais

$$\vec{P}_j = (\vec{P}_1 - \vec{P}_0) * \rho + \vec{P}_0 \quad (4.4)$$

Onde:

\vec{P} é um vetor no formato (x, y, z) representando um ponto no reservatório;

\vec{P}_j é o ponto de instalação da junta para a saída da lateral no poço principal;

\vec{P}_0 é o ponto inicial do poço principal;

\vec{P}_1 é o ponto final do poço principal;

ρ é o fator que indica a posição da junta;

$$\vec{P}_f = (\vec{P}_w \cos(\theta) + \vec{P}_p \text{sen}(\theta)) * l + \vec{P}_j \quad (4.5)$$

Onde:

\vec{P}_j é o ponto de instalação da junta para a saída da lateral no poço principal;

\vec{P}_w é um vetor unitário na direção do poço principal;

\vec{P}_p é um vetor unitário perpendicular ao poço principal com ângulo φ ;

l é o comprimento da lateral;

θ é o ângulo entre o poço principal e o ponto final da lateral;

$$\vec{P}_i = \begin{cases} se\ T = -1 \rightarrow \vec{P}_p [\tan(\alpha)(l * \cos(\theta) - r + r * \text{sen}(\alpha)) + r * \cos(\alpha)] + \\ \vec{P}_w * l * \cos(\theta) + \vec{P}_j \\ se\ T = 0 \rightarrow \vec{P}_j \\ se\ T = 1 \rightarrow \vec{P}_p * l * \text{sen}(\theta) + \vec{P}_j + \\ \vec{P}_w [\tan(\alpha)(l * \text{sen}(\theta) - r + r * \text{sen}(\alpha)) + r * \cos(\alpha)] \end{cases} \quad (4.6)$$

Onde:

\vec{P}_i é o ponto onde se inicia a zona produtora da lateral;

\vec{P}_j é o ponto de instalação da junta para a saída da lateral no poço principal;

\vec{P}_w é um vetor unitário na direção do poço principal;

\vec{P}_p é um vetor unitário perpendicular ao poço principal com ângulo φ ;

l é o comprimento da lateral;

θ é o ângulo entre o poço principal e o ponto final da lateral;

r é o raio de curvatura de perfuração das laterais;

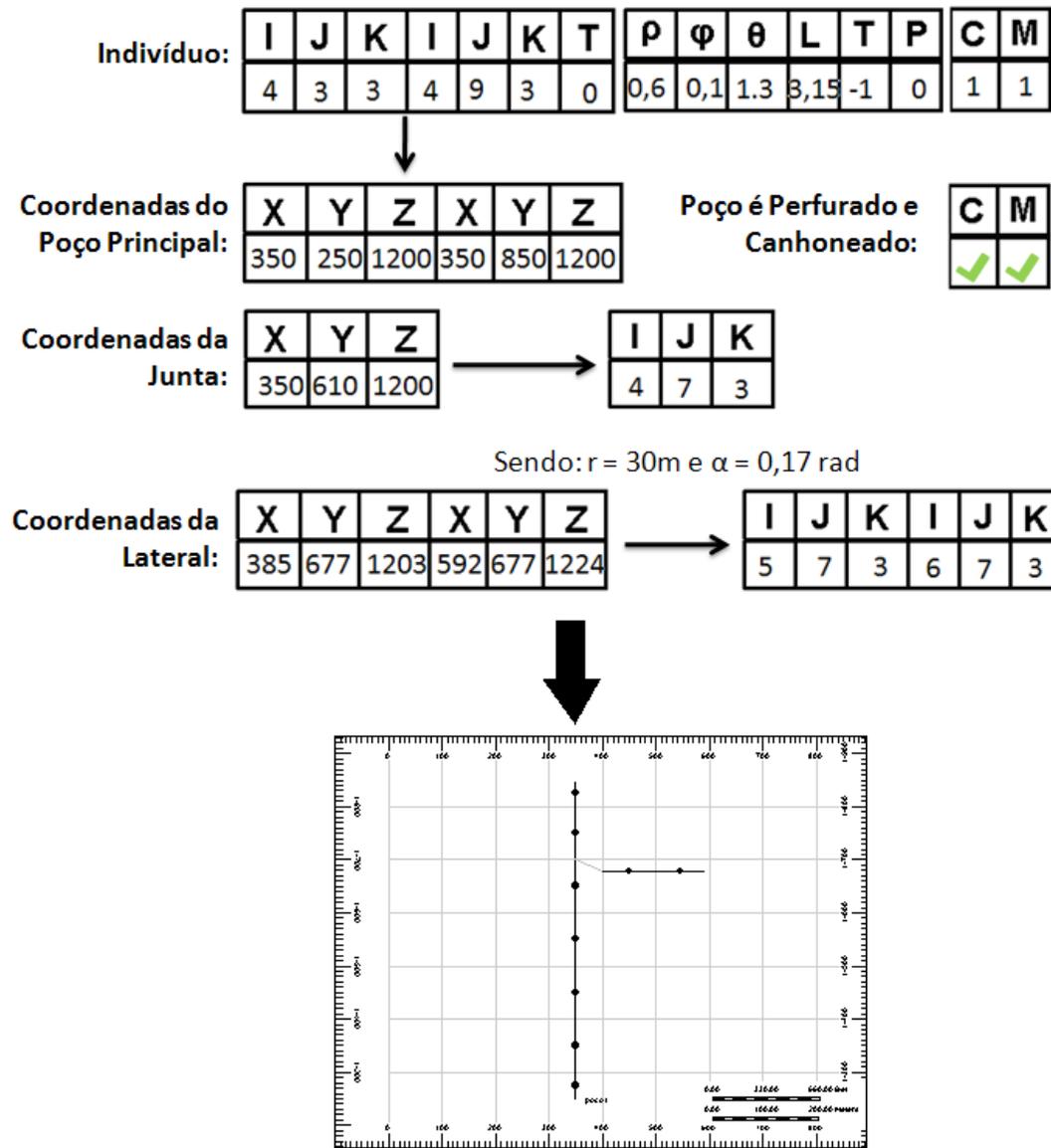
α é ângulo mínimo de saída;

T é o tipo da lateral;

Índice T	Descrição do Tipo de Lateral
$-1 \leq T < -0,5$	Lateral perpendicular ao poço principal
$-0,5 \leq T < 0,5$	Lateral direcional
$0,5 \leq T \leq 1$	Lateral paralela ao poço principal

Tabela 2. Interpretação dos Tipos de Lateral.

Um exemplo de um indivíduo com um poço e uma lateral com a representação 4 e sua decodificação pode ser observado na Figura 46.



acordo com a sintaxe do simulador IMEX, cada poço contém um cabeçalho com o seu nome, tipo, os controles de produção e os parâmetros físicos. Após o cabeçalho são representados todos os blocos do *grid* percorridos pelo poço e a ordem em que o poço passa nos blocos. Por fim, é descrito o ponto de entrada e de saída em cada bloco.

Para representar as laterais dos poços foi utilizado o cartão FLOWTO e FLOWFROM indicando o ponto em que a lateral é conectada ao poço principal. Para determinar corretamente e de forma precisa as trajetórias direcionais é utilizado o cartão LAYERXYZ, fazendo com que o simulador calcule corretamente a produção de um poço por bloco considerando a trajetória do poço em seu interior (CMG 2008).

A Figura 47 apresenta uma alternativa e o código que a descreve. São identificados os valores das variáveis e das constantes.

```

WELL 1 'poco1'
*PRODUCER 'poco1'
OPERATE MAX STL 2000 CONT
*GEOMETRY *K 0.0762 0.37 1.0 0
*PERF *GEO 'poco1'
4 3 3 1.0 *OPEN FLOW-TO 'SURFACE' REFLAYER
4 4 3 1.0 *OPEN FLOW-TO 1
4 5 3 1.0 *OPEN FLOW-TO 2
4 6 3 1.0 *OPEN FLOW-TO 3
4 7 3 1.0 *OPEN FLOW-TO 4
4 8 3 1.0 *OPEN FLOW-TO 5
4 9 3 1.0 *OPEN FLOW-TO 6
5 7 3 1.0 *OPEN FLOW-TO 5
6 7 3 1.0 *OPEN FLOW-TO 8
*LAYERXYZ 'poco1'
4 3 3 350.000000 250.000000 1200.000000 350.000000 300.000000 1200.000000 50.000000
4 4 3 350.000000 300.000000 1200.000000 350.000000 400.000000 1200.000000 100.000000
4 5 3 350.000000 400.000000 1200.000000 350.000000 500.000000 1200.000000 100.000000
4 6 3 350.000000 500.000000 1200.000000 350.000000 600.000000 1200.000000 100.000000
4 7 3 350.000000 600.000000 1200.000000 350.000000 700.000000 1200.000000 100.000000
4 8 3 350.000000 700.000000 1200.000000 350.000000 800.000000 1200.000000 100.000000
4 9 3 350.000000 800.000000 1200.000000 350.000000 850.000000 1200.000000 50.000000
5 7 3 400.000000 677.409705 1205.016734 500.000000 677.409705 1215.050201 100.502092
6 7 3 500.000000 677.409705 1215.050201 591.603591 677.409705 1224.241217 92.063525

```

Figura 47. Codificação de poços no formato IMEX

Uma vez simulado, o simulador retorna arquivos com diversas informações sobre o reservatório durante o período simulado. Para obter as tabelas das variáveis utilizadas neste sistema é utilizado outro programa do mesmo fabricante (CMG) chamado Results Report. Esse programa recebe um arquivo de entrada apontando para o arquivo que contém o resultado da simulação do reservatório e as variáveis para comporem a tabela de resultados.

As variáveis de interesse de acordo com a modelagem utilizadas são a taxa de produção de óleo, a taxa de produção de gás, a taxa de produção de água e a taxa de injeção de água a cada intervalo de simulação.

A simulação de uma alternativa, de acordo com o processo descrito acima, é independente da simulação das demais alternativas de uma mesma população. Sendo assim, é possível distribuir as simulações de modo que estas sejam realizadas em paralelo. Com o uso de clusters, é possível simular uma grande quantidade de alternativas simultaneamente, diminuindo o tempo necessário para a evolução. As simulações foram distribuídas por um sistema de distribuição desenvolvido na PUC-Rio chamado StarWeb, que permite distribuir as simulações de reservatório e a criação das tabelas de resultados, para diversos computadores da rede.

4.5.3. Cálculo da Função de Avaliação

A função de avaliação, ou função objetivo, é responsável por fornecer o valor da avaliação de cada solução proposta pelo Algoritmo Genético. O valor de avaliação de uma solução, ou seja, de uma alternativa de poços, é dado pelo seu Valor Presente Líquido (VPL). O VPL é calculado a partir do perfil de produção da alternativa, que por sua vez é gerado por um simulador de reservatório e por parâmetros econômicos informados ao modelo. A Figura 48 ilustra os parâmetros de reservatório envolvidos no cálculo do VPL.

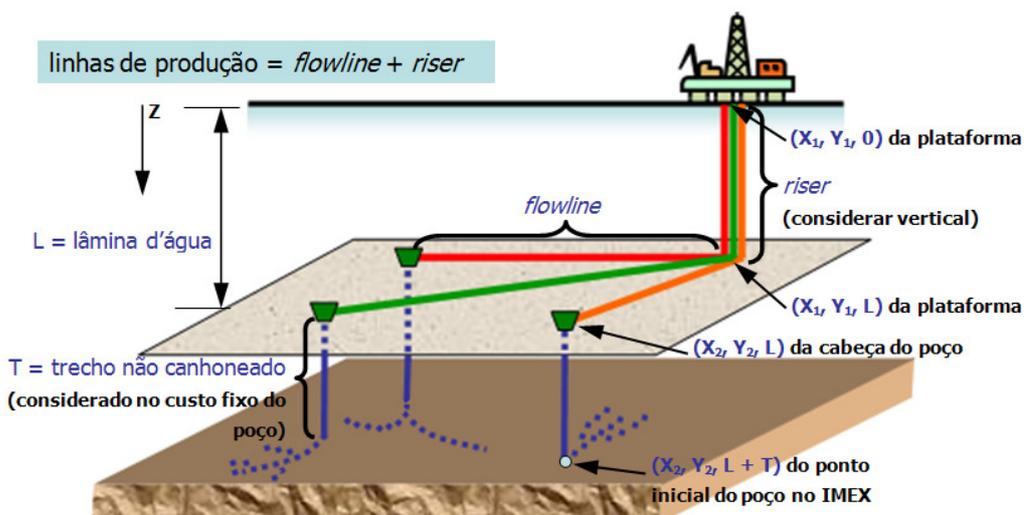


Figura 48. Diagrama de pontos para cálculo do VPL

O Valor Presente Líquido é calculado a partir da diferença do valor presente do projeto e do seu custo de desenvolvimento, conforme a Equação(4.7).

$$VPL = VP - D \quad (4.7)$$

Onde:

VP representa o valor presente dos fluxos de caixa do projeto;

D representa o custo de desenvolvimento do projeto.

O valor dos custos de desenvolvimento D é calculado como a soma do custo fixo de perfuração dos poços, do custo de perfuração por metro dos poços (comprimento descrito entre o início e o final do poço incluindo o comprimento das laterais), do custo de instalação de junta de lateral, do custo das linhas de produção e o do custo da plataforma; como mostra a Equação (4.8).

$$D = \begin{pmatrix} a_{is\Delta\theta_1} * n_{is\Delta\theta_1} + m_{is\Delta\theta_1} * c_{is\Delta\theta_1} + \\ a_{is\Delta\theta_2} * n_{is\Delta\theta_2} + m_{is\Delta\theta_2} * c_{is\Delta\theta_2} + \\ a_{is\Delta\theta_3} * n_{is\Delta\theta_3} + m_{is\Delta\theta_3} * c_{is\Delta\theta_3} + \\ a_{ps\Delta\theta_1} * n_{ps\Delta\theta_1} + m_{ps\Delta\theta_1} * c_{ps\Delta\theta_1} + \\ a_{ps\Delta\theta_2} * n_{ps\Delta\theta_2} + m_{ps\Delta\theta_2} * c_{ps\Delta\theta_2} + \\ a_{ps\Delta\theta_3} * n_{ps\Delta\theta_3} + m_{ps\Delta\theta_3} * c_{ps\Delta\theta_3} + \\ a_{il\Delta\theta_1} * n_{il\Delta\theta_1} + m_{il\Delta\theta_1} * c_{il\Delta\theta_1} + \\ a_{il\Delta\theta_2} * n_{il\Delta\theta_2} + m_{il\Delta\theta_2} * c_{il\Delta\theta_2} + \\ a_{il\Delta\theta_3} * n_{il\Delta\theta_3} + m_{il\Delta\theta_3} * c_{il\Delta\theta_3} + \\ a_{pl\Delta\theta_1} * n_{pl\Delta\theta_1} + m_{pl\Delta\theta_1} * c_{pl\Delta\theta_1} + \\ a_{pl\Delta\theta_2} * n_{pl\Delta\theta_2} + m_{pl\Delta\theta_2} * c_{pl\Delta\theta_2} + \\ a_{pl\Delta\theta_3} * n_{pl\Delta\theta_3} + m_{pl\Delta\theta_3} * c_{pl\Delta\theta_3} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} al_1 * nl_1 + \\ al_2 * nl_2 + \\ al_3 * nl_3 \end{pmatrix} + b + s_i * l_i + s_p * l_p \quad (4.8)$$

Onde:

$a_{is\Delta\theta_n}$ é o custo fixo de perfuração de poço injetor que não possui laterais e com inclinação no intervalo $\Delta\theta_n$, onde $n \in \{1, 2, 3\}$;

$a_{ps\Delta\theta_n}$ é o custo fixo de perfuração de poço produtor que não possui laterais e com inclinação no intervalo $\Delta\theta_n$, onde $n \in \{1, 2, 3\}$;

$a_{il\Delta\theta_n}$ é o custo fixo de perfuração de poço injetor que possui laterais e com inclinação no intervalo $\Delta\theta_n$, onde $n \in \{1, 2, 3\}$;

$a_{pl\Delta\theta_n}$ é o custo fixo de perfuração de poço produtor que possui laterais e com inclinação no intervalo $\Delta\theta_n$, onde $n \in \{1, 2, 3\}$;

$n_{is\Delta\theta_n}$ é o número de poços injetores que não possuem laterais e com inclinação no intervalo $\Delta\theta_n$, onde $n \in \{1, 2, 3\}$;

$n_{ps\Delta\theta_n}$ é o número de poços produtores que não possuem laterais e com inclinação no intervalo $\Delta\theta_n$, onde $n \in \{1, 2, 3\}$;

$n_{il\Delta\theta_n}$ é o número de poços injetores que possuem laterais e com inclinação no intervalo $\Delta\theta_n$, onde $n \in \{1, 2, 3\}$;

$n_{pl\Delta\theta_n}$ é o número de poços produtores que possuem laterais e com inclinação no intervalo $\Delta\theta_n$, onde $n \in \{1, 2, 3\}$;

$m_{is\Delta\theta_n}$ é o custo de perfuração por metro de poço injetor que não possui laterais e com inclinação no intervalo $\Delta\theta_n$, onde $n \in \{1, 2, 3\}$;

$m_{ps\Delta\theta_n}$ é o custo de perfuração por metro de poço produtor que não possui laterais e com inclinação no intervalo $\Delta\theta_n$, onde $n \in \{1, 2, 3\}$;

$m_{il\Delta\theta_n}$ é o custo de perfuração por metro de poço injetor que possui laterais e com inclinação no intervalo $\Delta\theta_n$, onde $n \in \{1, 2, 3\}$;

$m_{pl\Delta\theta_n}$ é o custo de perfuração por metro de poço produtor que possui laterais e com inclinação no intervalo $\Delta\theta_n$, onde $n \in \{1, 2, 3\}$;

$c_{is\Delta\theta_l}$ é a soma dos comprimentos dos poços injetores que não possuem laterais e com inclinação no intervalo $\Delta\theta_n$, onde $n \in \{1, 2, 3\}$;

$c_{ps\Delta\theta_l}$ é a soma dos comprimentos dos poços produtores que não possuem laterais e com inclinação no intervalo $\Delta\theta_n$, onde $n \in \{1, 2, 3\}$;

$c_{il\Delta\theta_l}$ é a soma dos comprimentos dos poços injetores que possuem laterais e das laterais que tenham inclinação no intervalo $\Delta\theta_n$, onde $n \in \{1, 2, 3\}$;

$c_{pl\Delta\theta_l}$ é a soma dos comprimentos dos poços produtores que possuem laterais e das laterais que tenham inclinação no intervalo $\Delta\theta_n$, onde $n \in \{1, 2, 3\}$;

$\Delta\theta_1$ é o intervalo $[0^\circ, 30^\circ]$;

$\Delta\theta_2$ é o intervalo $(30^\circ, 60^\circ]$;

$\Delta\theta_3$ é o intervalo $(60^\circ, 90^\circ]$;

al_n é o custo fixo por lateral do tipo n , onde $n \in \{1, 2, 3\}$;

nl_n é o número de laterais do tipo n , onde $n \in \{1, 2, 3\}$;

l_1 é a lateral perpendicular ao poço principal;

l_2 é a lateral aberta com ângulo fixo a partir do poço principal;

l_3 é a lateral paralela ao poço principal;

b é o custo da plataforma;

s_i é a soma das distâncias dos poços injetores à plataforma;

s_p é a soma das distâncias dos poços produtores à plataforma;

l_i é o custo de linha para poços injetores por quilômetro;

l_p é o custo de linha para poços produtores por quilômetro;

O valor da distância entre os poços e a plataforma (s) é calculado de modo que a cabeça do poço é considerada imediatamente acima do ponto inicial do poço principal e a trajetória é assumida linear até a posição imediatamente abaixo da plataforma e vertical até a superfície, de acordo com a Figura 48. A fórmula do comprimento total das linhas de produção é expressa na Equação(4.9).

$$s = \sum_{j=1}^{n_p} \left(\sqrt{(c_{xj} - c_{xp})^2 + (c_{yj} - c_{yp})^2} + d \right) \quad (4.9)$$

Onde:

d é o comprimento da lâmina d'água;

c_{nj} é a coordenada n da cabeça do poço j $n \in \{x, y\}$;

c_{np} é a coordenada n da plataforma $n \in \{x, y\}$;

n_p é o número de poços;

O Valor Presente do projeto representa um valor dado hoje para os custos e receitas previstos para o projeto. Assim, o Valor Presente do projeto é composto pela diferença entre o Valor Presente da Receita (VP_R) e o Valor Presente do Custo de Operação (VP_{Cop}), na qual é aplicada a alíquota de imposto I de aproximadamente 34%. O Valor Presente é, assim, dado pela Equação(4.10).

$$VP = (VP_R - VP_{Cop}) * (1 - I) \quad (4.10)$$

Onde:

VP_R é o valor presente da receita;

VP_{Cop} é o valor presente do custo operacional;

I é a alíquota de impostos;

O valor Presente da receita é calculado trazendo o valor das receitas no tempo para valor presente, conforme a Equação(4.11).

$$VP_R = \sum_{t=1}^T \frac{R(t)}{(1 + tma)^{(d(t)/365)}} \quad (4.11)$$

Onde:

$R(t)$ é a receita no tempo t ;

tma é a taxa mínima de atratividade;

$d(t)$ é o número de dias decorridos até o tempo t ;

T é o tempo total de produção;

A receita no tempo t é calculada como a taxa de produção de óleo vezes o preço do óleo no tempo t mais a taxa de produção de gás vezes o preço do gás no

tempo t multiplicado pela duração do intervalo, que é dado pela diferença entre o tempo atual e o tempo anterior, conforme a Equação(4.12).

$$R(t) = [(q_o(t) * p_o(t) * 6,29) + (q_g(t) * p_g(t))] * (d(t) - d(t-1)) \quad (4.12)$$

Onde:

$p_o(t)$ é o preço de venda do óleo no tempo t em US\$/bbl;

$p_g(t)$ é o preço de venda do gás no tempo t em US\$/1000m³;

q_o é a vazão de produção de óleo em m³/d;

q_g é a vazão de produção de gás em 1000m³/d;

$d(t)$ é o número de dias decorridos até o tempo t ;

O valor presente do custo operacional é calculado trazendo para valor presente as despesas de custo operacional conforme a Equação(4.13).

$$VP_{Cop} = \sum_{t=1}^T \frac{Cop(t)}{(1 + tma)^{(d(t)/365)}} + f \quad (4.13)$$

Onde:

$Cop(t)$ é o custo operacional no tempo t ;

tma é a taxa mínima de atratividade;

$d(t)$ é o número de dias decorridos até o tempo t ;

f representa custos fixos do projeto;

O custo operacional no tempo t é calculado pela soma do custo de manutenção anual por poço, custos de manutenção diários, custos de produção e tratamento de óleo e gás, custo de tratamento de água produzida, custo de tratamento de água injetada e despesas com royalties sobre a produção, conforme Equação(4.14).

$$Cop(t) = \left(\begin{array}{l} cp_o * q_o(t) + cp_w * q_w(t) + \\ cp_g * q_g(t) + ci_w * q_{winj}(t) + \\ m * n_p / 365 + v \end{array} \right) * (d(t) - d(t-1)) + R_y * R(t) \quad (4.14)$$

Onde:

m é o custo de manutenção por poço por ano;

v são os custos variáveis de produção de hidrocarbonetos (US\$/dia);

cp_o é o custo de produção de óleo (US\$/m³);

cp_w é o custo de produção de água (US\$/m³);

cp_g é o custo de produção do gás (US\$/1000m³);

ci_w é o custo de injeção de água (US\$/m³);

q_o é a vazão de produção de óleo (m³/d);

q_w é a vazão de produção de água (m^3/d);

q_g é a vazão de produção de gás ($1000m^3/d$);

q_{winj} é a vazão de injeção de água (m^3/d);

R_y é taxa de royalties;

$R(t)$ é a receita no tempo t ;

4.6.Considerações de Implementação

Todos os códigos utilizados para este trabalho foram desenvolvidos na linguagem C# e no MS Framework .net 2.0. Os sistemas auxiliares utilizados foram: o simulador IMEX e gerador de tabelas Results Report da CMG, onde a comunicação entre o programa desenvolvido e esses aplicativos é feita por arquivo de texto e chamada de processo por linha de comando; a biblioteca de algoritmos genéticos GACOM, desenvolvida pela PUC-Rio, onde a interface é feita internamente por criação de classes e chamada de métodos; e o sistema de distribuição de tarefas StarWeb, desenvolvido pela PUC-Rio, onde a comunicação e a configuração das tarefas são feitos através de arquivos XML e a chamada é através de chamada de método por referência web do MS Framework .net 2.0. A base de manipulação de modelos de reservatório, gerência de arquivos e armazenamento de variáveis foi extraída do sistema de otimização de malha de drenagem OCTOPUS (EMERICK 2009), desenvolvido pela PUC-Rio.

A seguir, serão apresentados os resultados alcançados pelo sistema descrito neste capítulo. Foram criados modelos sintéticos de reservatório para testar as representações propostas e um teste com um modelo real foi conduzido com a melhor representação.