

O Problema do Sequenciamento Online da Lavra de Minério de Ferro

RODRIGO JEFERSON DAMASCENO¹

ANDRÉ VITAL SAÚDE²

UFLA – Universidade Federal de Lavras
DCC – Departamento de Ciências da Computação
Cx Postal 37 – CEP 37200-000 Lavras (MG)

¹rodjefdam@gmail.com

²andresaude@gmail.com

Resumo: Este trabalho propõe um modelo relevante de representação do sequenciamento *online* de uma mina de ferro. Este modelo é fruto de um árduo estudo sobre o caso, leva em consideração todos os fatores que caracterizam este problema como *online* e que o torna muito complexo como a necessidade de parada dos equipamentos. É também modelado, mas não implementado, um algoritmo genético coerente com o modelo o que ajudou na avaliação do mesmo.

Palavra-chave: Otimização, Sequenciamento, Roteamento, Online, Mineração, Modelo.

1 Introdução

Na mineração, assim como em qualquer outra área, é essencial que se faça um planejamento de todas as suas atividades a fim de se minimizar problemas que possam acarretar em perdas não só de dinheiro, como também de tempo, e de credibilidade diante de seus clientes. Uma das atividades principais da mineração que deve ser muito bem planejada é o sequenciamento da lavra.

No sequenciamento de lavra de uma mina, já são conhecidas as áreas a serem exploradas, mas é necessário decidir quantos caminhões serão usados e principalmente como será a agenda de deslocamentos desses caminhões, isso incluindo as paradas necessárias para manutenção e abastecimento, qual escavadeira esta disponível para carregar o caminhão, e principalmente que as agendas de todos os caminhões e das escavadeiras combinadas façam com que se cumpram às especificações do cliente quanto à qualidade química do minério extraído.

Este é o principal motivo pelo qual os sistemas tradicionais de otimização não possam ser usados para resolver este problema, pois estes mesmo sistemas lidam com conhecimento de todas as informações relevantes *a priori* e todos os recursos disponíveis durante toda a simulação.

Para isso foi desenvolvido um modelo de representação de uma mina considerando as variáveis mais relevantes do problema. Foi proposto também a idéia de um algoritmo genético baseado no modelo

para otimizar este sequenciamento sendo o que ajudou na sua avaliação.

2 Sequenciamento da Lavra de Minério de Ferro

O fluxo operacional de mineração de ferro é iniciado com a especificação do cliente (manual de qualidade). É na especificação do cliente que consta a quantidade de minério a ser extraído, qualidade física deste minério (granulometria) e qualidade química do minério (teor de porcentagem de ferro e outros minerais) para cada um dos seus produtos. É também estipulado um prazo de entrega ou cronograma de atendimento.

Para operacionalizar a extração, atendendo ao cliente, as minerações têm seus planejamentos, geralmente agrupados em níveis temporais, que embora varie entre uma mineração e outra, tem a seguinte divisão básica (ALVARENGA, 1997).

Primeiro é realizado o sequenciamento ou planejamento de longo prazo. Neste planejamento é definido o *pit* final ou cava final da mina, essa cava lembra geralmente um cone constituído em sua grande parte de minério (parte extraída a ser lavrada e comercializada), mas contendo também uma boa quantidade de estéril (parte extraída que na mineração de ferro pode ou não ser lavrada). A cava final da mina é determinada através de pesquisas geológicas e técnicas matemáticas de tratamento de dados com o objetivo de se conhecer ao máximo o corpo de minério em estudo e para se ter previsões tanto da massa total de minério como da porcentagem de minério de ferro

e outros minerais importantes para a especificação do cliente, determinar formas seguras de extração, inclinação da parede da cava final, etc. Conforme vai se avançando na exploração da mina e com isso tendo um maior conhecimento do minério e também devido a alterações das especificações do cliente, este planejamento é reavaliado. Neste nível é realizado apenas o dimensionamento da frota e capacidade de carga dos equipamentos, não sendo realizado qualquer tipo de escalonamento (Figura 1).

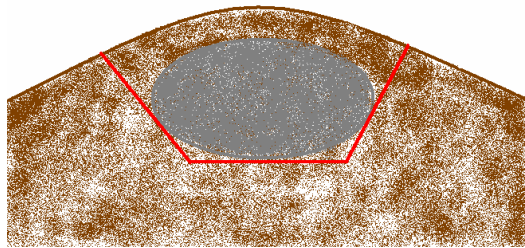


Figura 1: Desenho representando o corte de perfil de um terreno, mostrando o corpo de minério e as linhas da cava final.

Os sequenciamentos ou planejamentos de médio e curto prazo se referem a quantidades bem menores com localização e quantidades bem definidas. Deve se ter um bom conhecimento das áreas das minas, pois é nesses locais que serão extraídos o minério a ser beneficiado. O critério de divisão varia entre as mineradoras podendo ser anual, semestral, trimestral, mensal, semanal e até diário. Cada plano é constituído por um conjunto de áreas de escavação, com quantidades de minério e estéril a ser extraídas. Cada plano deve respeitar o plano imediatamente superior para garantir desta forma a longevidade da mina (Figura 2).

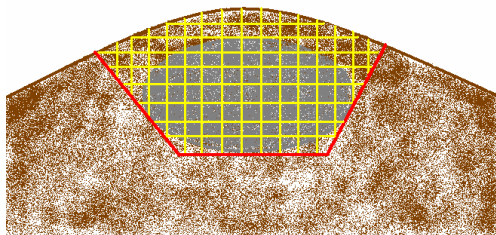


Figura 2: Desenho representando o corte de perfil de um terreno, mostrando o corpo de minério e as linhas da cava final divididas em áreas.

O plano operacional de curto prazo entregue aos supervisores mostra apenas informações referentes às frentes de lavra que serão lavradas, a qualidade requerida pelo cliente bem como a massa total que deve ser extraída no plano. É de responsabilidade dos supervisores programarem quais escavadeiras e/ou carregadeiras serão alocadas em cada frente e o

número de caminhões necessários para concluir o plano.

Seria então muito difícil para esses supervisores criar um escalonamento que garanta a qualidade e a produtividade durante todo o decorrer do turno, o que tornaria possível que os últimos turnos não consigam cumprir as metas de qualidade principalmente se as melhores partes das áreas (as partes que possuem os melhores teores de minério) tenham sido exploradas nos primeiros turnos.

O problema abordado consiste em construir um sequenciamento das operações de lavra que visa o cumprimento das especificações de qualidade e produtividade durante todos os turnos da mina, minimizando o tempo gasto em deslocamentos, filas e o tempo em que a escavadeira fica parada respeitando a agenda de paradas para manutenção dos equipamentos.

3 O Modelo de Representação da Mina Proposto

O modelo adotado segue o sistema de máquina de estados para melhor representar as diversas ações realizadas pelas escavadeiras e pelos caminhões, isto torna o modelo bastante prático e fácil de ser compreendido.

Abaixo, é apresentado a máquina de estados da escavadeira (Figura 3).

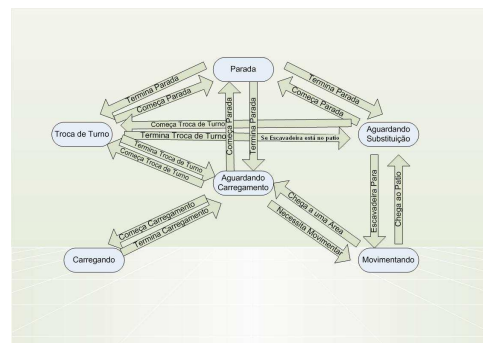


Figura 3: Máquina de Estados das escavadeiras

- **Aguardando Carregamento:** A escavadeira se encontra em uma área e não está desempenhando nenhuma função específica, apenas aguardando algum caminhão chegar para iniciar o carregamento. É neste estado que é contabilizado o tempo ocioso da escavadeira. Deste estado a escavadeira pode ir para os estados *carregando* (quando chega um caminhão na área onde a escavadeira se encontra), *movimentando* (quando for necessário que a escavadeira se desloque para outro local), *parada* (quando for o momento da escavadeira realizar uma parada agendada), *troca de turno* (quando estiver perto do fim do turno).
- **Carregando:** Neste estado a escavadeira carrega um caminhão que esteja na mesma área em que ela se encontra, neste estado se for hora da escavadeira parar, movimentar ou trocar de turno, esta ação é

adiada até o término do carregamento. Ela só sai deste estado se ao terminar o carregamento e liberar o caminhão não houver nenhum caminhão em fila para a escavadeira carregar e obrigatoriamente se a escavadeira sai deste estado, o caminhão que ela carrega também sai de seu estado *carregando*.

- **Movimentando:** Quando necessário a escavadeira realizará deslocamentos, seja para outra área ou para o pátio da mina onde realizara manutenções ou aguardara a quebra de uma escavadeira para realizar a substituição.

- **Parada:** Quando for necessário realizar alguma manutenção na escavadeira, ela entra neste estado e fica praticamente “fora” da simulação pelo tempo necessário. Embora existam vários tipos de motivos que obriguem a escavadeira a parar e que poderia gerar diversos tipos de paradas, foi decidido adotar um único estado de parada, pois independente do motivo que levou a escavadeira a parar o que realmente interessa é que durante este tempo a escavadeira não será alocada para qualquer outra ação e permanecerá assim até que retorne da parada. Deste estado a escavadeira pode ir para os estados *troca de turno* (se for o momento para tal), *aguardando carregamento* ou *aguardando substituição* dependendo do estado em que ela se encontrava antes da parada.

- **Aguardando Substituição:** Este estado foi especialmente criado para representar uma escavadeira sobressalente que permanece no pátio até que alguma escavadeira pare por algum motivo, quando isso ocorre, ela se desloca até a área onde a escavadeira parada se encontra e a substitui, passando assim a exercer todas as suas funções. A escavadeira também pode realizar uma parada enquanto se encontra neste estado.

- **Troca de Turno:** A escavadeira entra neste estado quando se aproxima no final do turno, este estado foi criado para simular a troca de turno dos funcionários da mina sendo tratado como um evento a parte. Foi decidido que a troca de turno de todas as máquinas é realizada ao mesmo tempo, pois como será visto mais adiante facilitaria a coerência dos indivíduos do algoritmo genético. A troca de turno ocorre em um intervalo de tempo grande o suficiente para possibilitar que os caminhões realizem a troca no momento oportuno. Deste estado a escavadeira pode ir parar caso seja necessário ou ir para os estados *aguardando carregamento* caso esteja em uma área e *aguardando substituição* caso esteja no pátio.

A seguir segue o esquema da máquina de estados do caminhão (Figura 4) que também pertence ao modelo proposto e logo em seguida uma descrição detalhada de cada estado.

- **Movimentando Vazio:** Neste estado o caminhão está deslocando de um ponto a outro sem levar qualquer tipo de carga, geralmente este

deslocamento se dá do britador ou da pilha de estéril para uma área qualquer. Neste estado o caminhão pode realizar uma parada se for o momento apropriado, ao termino do movimento ele pode começar a ser carregado por uma escavadeira ou entrar em fila de carregamento até chegar a sua vez.

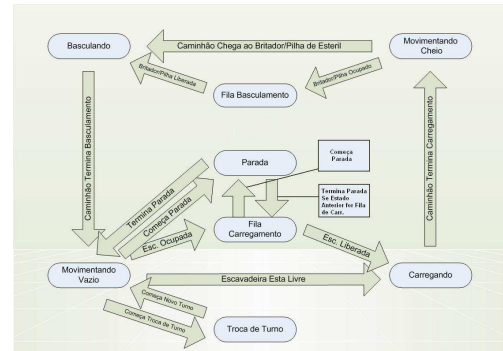


Figura 4: Máquina de Estados do caminhão.

- **Movimentando Cheio:** Neste estado o caminhão está deslocando de um ponto a outro carregando minério ou estéril, geralmente este deslocamento se dá das áreas para o britador se o caminhão estiver carregando minério ou pilha de estéril se o caminhão estiver carregando estéril. O caminhão permanece neste estado até concluir o movimento, podendo começar a bascular caso seu destino (britador ou pilha de estéril) esteja disponível, caso contrario ele entra em fila para bascular.

- **Carregando:** Neste estado o caminhão está sendo carregado por uma escavadeira podendo ser a carga minério ou estéril, se houver alguma parada agendada ou for hora do início da troca de turno o caminhão adia estes eventos até o término do carregamento. Ele só sai deste estado ao término do carregamento quando a escavadeira o libera.

- **Basculando:** Neste estado o caminhão está despejando sua carga no britador ou na pilha de estéril dependendo do que for sua carga. Permanecendo neste estado até o término da operação.

- **Fila Para Carregamento:** O caminhão entra neste estado quando ele chega a uma área para carregar e a escavadeira já está carregando outro caminhão, onde o primeiro caminhão a entrar na fila é o primeiro a ser atendido quando a escavadeira for liberada. Neste estado é contabilizado o tempo de fila gasto pelos caminhões. Em caso da escavadeira parar, o caminhão poderá se deslocar para outra área, evitando com isso, ficar parado em fila sem necessidade.

- **Fila Para Basculamento:** Quando não há mais vagas para que o caminhão despeje o seu conteúdo no britador ou na pilha de estéril o caminhão entra

neste estado, Neste estado também é contabilizado o tempo de fila gasto pelos caminhões. Em caso do britador ou da pilha de estéril parar, o caminhão poderá se deslocar para outro britador ou pilha evitando assim ficar parado em fila sem necessidade.

- **Parado:** Da mesma forma que ocorre na escavadeira, quando for hora do caminhão parar e ele estiver em um status que lhe propicie isto, ele realizara sua parada não podendo ser escalado para qualquer outra função até que retorne deste estado. Foi determinado que o caminhão só realizará paradas quando vazio pois não faria sentido realizar as tarefas de manutenção em um caminhão carregado. Os caminhões retornam da parada assumindo o status em que estavam antes de parar.
- **Troca de Turno:** Da mesma forma como ocorre com a escavadeira, próximo ao término do turno os caminhões, caso estejam no status propicio, realizaram a troca de turno. A única diferença com relação à escavadeira é que todos os caminhões devem se deslocar para o pátio para somente neste local realizarem a troca de turno.

Além da escavadeira e do caminhão, o modelo proposto para representar a mina conta com algumas outras entidades descritas a seguir.

- **Britador:** O britador é onde se deposita o minério extraído nas áreas, portanto ele não só armazena a quantidade como também o fator de qualidade de cada mineral contido no minério a fim de cumprir as especificações do cliente. Ele é um dos destinos do caminhão quando este se encontra carregado. Sua máquina de estados consiste apenas de dois status já que sua interação com o caminhão não se da de forma um para um, podendo haver mais de um caminhão despejando material nele ao mesmo tempo (Figura 5). O britador só para quando não há nenhum caminhão interagindo com ele.

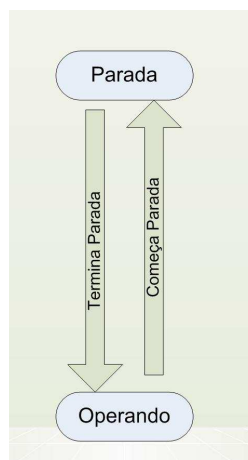


Figura 5: Máquina de Estados do Britador e da Pilha de Estéril.

- **Pilha de Estéril:** É para onde vai o material extraído das áreas que não é classificado como

minério, a pilha de estéril se preocupa apenas com a quantidade do material já que este material é descartado. Assim como no britador sua máquina contem apenas dois status já que sua interação com o caminhão não se da de forma um para um, podendo haver mais de um caminhão despejando material nele ao mesmo tempo (Figura 5). O britador só para quando não há nenhum caminhão interagindo com ele.

- **Pátio:** O pátio é apenas uma destinação criada para ser o local onde será realizada a troca de turno dos caminhões e onde fica a escavadeira reserva que substitui qualquer outra que venha a ter um problema, não lida com qualquer valor e nem é representada por uma classe no algoritmo genético (que será visto mais adiante).
- **Fluxos:** Fluxos é todo caminho que pode ser percorrido por um caminhão e/ou escavadeira, é determinado por dois pontos que podem ser áreas, britadores, pilhas de estéril e o pátio. Os fluxos guardam quanto tempo os caminhões e escavadeiras levam para percorrê-lo o que é de grande relevância no problema.
- **Áreas:** As áreas são os locais onde são extraídos o minério e o estéril, as escavadeiras geralmente são alocadas nas áreas com exceção da escavadeira reserva. As áreas guardam não só as porcentagens de cada elemento contido no minério como a quantidade em toneladas do minério e do estéril que também se encontra lá, uma área pode ter uma ou mais faixas de minério/estéril onde o teor de cada elemento difere de uma faixa para outra, é plenamente possível que uma área tenha uma faixa contendo minério e outra estéril. As áreas não têm máquina de estados, pois seu funcionamento depende diretamente da escavadeira.

4 O Algoritmo Genético Proposto

Após o modelo que representava a mina ter sido elaborado, era preciso criar um algoritmo genético em que o indivíduo representasse o escalonamento das atividades dos caminhões e escavadeiras através do tempo, abaixo segue um modelo de como seria este algoritmo genético.

Foi decidido que o indivíduo do algoritmo genético seria uma matriz tridimensional (Figura 6) onde uma dimensão da matriz seriam os equipamentos da mina que neste caso são os caminhões e escavadeiras. A segunda dimensão seria o tempo que iria do início ao término de um turno de trabalho onde o tempo de duração do turno é definido pelo usuário e a última dimensão é representada pela quantidade de turnos que serão simulados, isto dá a liberdade de se otimizar qualquer quantidade de turnos que o caso venha a abordar. Cada campo desta matriz representava a passagem de tempo de 30 segundos a qual chamaremos de *slot*. Foi decidido usar este

sistema, pois a atividade que consome o menor tempo em uma mina é o basculamento dos caminhões que não passa de 30 segundos.

Cada gene do indivíduo do algoritmo genético é um turno e isso explica a necessidade de se fazer a troca de turno de todos os equipamentos ao mesmo tempo, pois dessa forma se consegue uma coerência entre as ações dos equipamentos ao final de um turno e início do turno seguinte em todos os indivíduos, o que facilita na realização da operação de *crossover* e das mutações recorrentes no algoritmo genético.

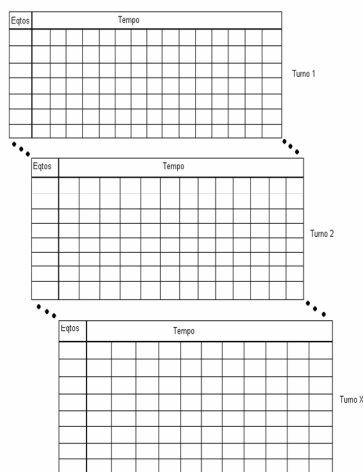


Figura 6: Representação de um indivíduo do algoritmo genético.

A geração da população inicial é realizada tendo como base o modelo de representação da mina, através dele seria determinado o estado atual do equipamento, e o próximo estado que ele assumirá, preenchendo assim o indivíduo com os estados assumidos pelos equipamentos em cada *slot* de tempo.

Exemplo: considerando os pseudocódigos abaixo (Figura 7 e 8) que mostram as verificações a serem realizadas quando a escavadeira e o caminhão estão carregando, seria possível preencher o indivíduo como mostrado em seguida (Figura 9).

```

Para i = 1 ; nslots
  Para j = 0 ; nequipamentos
    se equipamento j for escavadeira.
      se status no slot i - 1 da escavadeira j é carregando
      se carregamento não terminou
        insira no slot i da escavadeira j status carregando;
      senão
        libere caminhão x;
        chame próximo caminhão na fila da escavadeira j para
        carregar;
      se houver caminhão para carregar
        insira no slot i da escavadeira j status carregando;
      senão
        insira no slot i da escavadeira j status aguardando
        carregamento;
    end
  end
end
  
```

Figura 7: Pseudocódigo da população inicial do algoritmo genético referente ao status carregando da escavadeira.

Observando a figura 7.7 podemos notar como a geração da população inicial é feita. Como explicado

anteriormente em cada *slot* do indivíduo é inserido um símbolo que representa o status do equipamento no momento. As escavadeiras são representadas por Esc seguido de um número para identificação. Cam representa os caminhões, também seguidos de um número para identificá-los. O status *aguardando carregamento* é representado por AC. CC seguido de um número significa *carregando* caminhão onde o número indica que caminhão esta sendo carregado por esta escavadeira. O status *carregando* dos caminhões é representado por CE seguido de um número que representa que escavadeira esta carregando este caminhão. O status *fila de carregamento* é indicado pelo símbolo FE seguido de um número que indica para qual escavadeira é a fila onde o caminhão se encontra. O status *movimentando cheio* é representado pelo símbolo MC seguido por um número que indica qual fluxo ele esta percorrendo. O status *movimentando vazio* é representado por MV seguido de um número que assim como em *movimentando cheio* indica o fluxo que o caminhão esta percorrendo.

```

Para i = 1 ; nslots
  Para j = 0 ; nequipamentos
    se equipamento j for caminhão
      se status no slot i-1 do caminhão j é carregando
      se caminhão foi liberado
        insira no slot i do caminhão j status movimentando
        cheio;
      senão
        Insira no slot i do caminhão j status carregando;
      end
    end
  end
end
  
```

Figura 8: Pseudocódigo da população inicial do algoritmo genético referente ao status carregando do caminhão.

+30s +30s +30s +30s.....

| Eqtos | Tempo | | | | | | | | | |
|-------|-------|-----|-----|--|--|--|--|--|--|--|
| Esc01 | CC1 | CC2 | CC2 | | | | | | | |
| Esc02 | CC3 | CC3 | AC | | | | | | | |
| Cam01 | CE1 | MC1 | MC1 | | | | | | | |
| Cam02 | FE1 | CE1 | CE1 | | | | | | | |
| Cam03 | CE2 | CE2 | MC2 | | | | | | | |
| Cam04 | MV1 | MV1 | MV1 | | | | | | | |

Figura 9: Exemplo de preenchimento de um turno do indivíduo pelos pseudocódigos geradores da população inicial.

Podemos observar na figura 9 que a escavadeira Esc01 esta com o status CC1 (*carregando* o Cam01), porem no turno seguinte ela passa para o status CC2 (*carregando* o Cam02) já que seu status anterior indicava que este estava na fila desta escavadeira (FE1). Como mostrado pelos pseudocódigos, ao encerrar o carregamento do Cam01 este pode passar para o estado MC1 (*movimentando cheio* pelo fluxo 1). Podemos observar também que a escavadeira Esc02 esteve no status CC3 (*carregando* caminhão 03) por dois turnos mas, no terceiro turno passou para o status AC (*aguardando carregamento*) liberando o

caminhão Cam03 para movimentar cheio pelo fluxo 2 (MC2).

Os pseudocódigos mostrados acima (Figura 7 e 8) mostram apenas um dos casos da máquina de estados de cada equipamento, o algoritmo de geração da população inicial terá que analisar todos os status que cada equipamento pode assumir e testar para qual status ele irá no *slot* seguinte.

Por isso foi imposto que a troca de turno de todos os equipamentos sejam feitas ao mesmo tempo, desta forma não seria preciso analisar como o um turno terminou para começar a preencher o próximo, facilitando assim os processos de *crossover* e mutação (Figura 10).

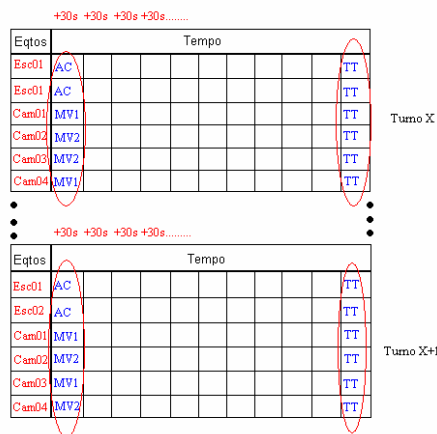


Figura 10: Exemplo de dois turnos subsequentes mostrando coerência entre fim de um turno e início do próximo.

Onde AC é o status *aguardando carregamento*, *movimentando vazio* é representando por MV seguido de um número que indica que fluxo esta sendo percorrido e TT é o status *troca de turno*.

Podemos observar na figura 10 que todos os equipamentos terminam o turno realizando a troca de turno (TT). Como explicado anteriormente os caminhões se deslocam para o pátio para realizar esta operação, desta forma no início do próximo turno todos os caminhões iniciam suas atividades se deslocando para uma área. Mesmo que o mesmo caminhão se desloque para por fluxos diferentes no início de turnos diferente, a coerência é mantida já que todos terminaram o turno da mesma forma.

O *crossover* é realizado através de um torneio, primeiramente são escolhidos dois grupos de indivíduos de forma aleatória, mas sem que um indivíduo seja escolhido mais de uma vez e que esteja presente nos dois grupos, após os dois grupos estarem completos é selecionado os melhores de cada grupo, eles serão os pais dos dois novos indivíduos gerados no *crossover* que será realizado de forma que os indivíduos troquem turnos entre si já que cada turno simulado é um gene do algoritmo genético (Figura 11). A principio o *crossover* realizado será de um ponto, podendo ser analisado uma técnica mais eficiente em trabalhos futuros.

Na mutação, é usado o mesmo algoritmo da geração da população inicial para se gerar um turno que será inserido no gene do indivíduo filho que sofrera a mutação. A mutação poderá ocorrer com somente um ou com os dois indivíduos filhos (Figura 12). Será trabalho também da mutação corrigir qualquer incoerência que ocorra devido ao processo de *crossover*, como o fato de uma área ser extinguida (totalmente explorada) antes do previsto e houver caminhos designados para esta área.

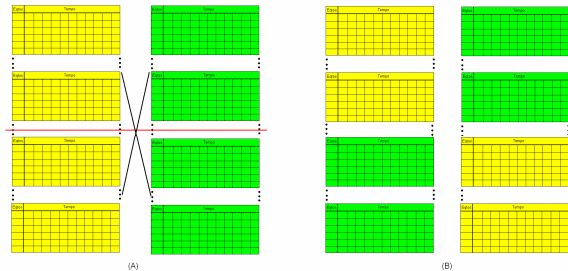


Figura 11: *Crossover* do algoritmo genético proposto. (A) dois indivíduos escolhidos com ponto de *crossover* (3) escolhido. (B) as características são recombinadas gerando 2 novos indivíduos.

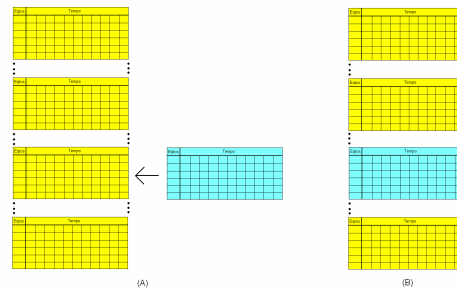


Figura 12: Exemplo de mutação. (A) o turno é gerado e é escolhido qual turno será substituído (3). (B) novo indivíduo gerado.

Como visto neste problema, busca-se otimizar a operação da mina maximizando a quantidade de minério e estéril extraído e minimizando o tempo de fila gasto pelos caminhões e o tempo ocioso desperdiçado pela escavadeira. Como são valores de grandeza diferentes, sendo impossível uma conversão direta (através de soma, subtração), a função que avaliaria a adaptabilidade do indivíduo deveria levar em consideração esses quatro valores. Para isso foi especificado que seria dado como valor de entrada um patamar e um peso para cada valor. O patamar funcionará como um objetivo a ser alcançado. O peso indicará a importância deste patamar comparado aos patamares de outros valores, isto possibilitará dizer qual patamar dependendo da simulação é mais importante.

Exemplo: vamos supor que o patamar para a quantidade de minério (em toneladas), estéril (em toneladas), tempo de fila dos caminhões e tempo ocioso da escavadeira (os dois em segundos) de uma mina seja respectivamente 40000, 20000, 1800, 2700.

Vamos supor também que o peso de cada valor respectivamente seja: 20, 20, 5, 5. Supondo que dois indivíduos conseguiram os seguintes valores na mesma ordem: indivíduo Ind01 conseguiu 39500, 15000, 2700, 3900 e o indivíduo Ind02 conseguiu 38000, 22000, 2700, 3300. Se o patamar de 40000 tem um peso 20, então um valor conseguido pelo indivíduo Ind01 de 39500 por regra de três simples é de 19.75, desta forma os pesos dos valores dos indivíduos são determinados como se segue: Ind01 tem os pesos de 19.75, 15, 7.5, 7.22 e o Ind02 tem 19, 22, 7.5, 6.1. Após a obtenção desses valores para cada indivíduo, basta aplicar os valores na fórmula (Figura 13) determinando assim o peso do indivíduo, Exemplo: para o indivíduo Ind01 a fórmula fica: $19.75 + 15 - 7.5 - 7.22 = 20.03$ e para o indivíduo Ind02 os pesos são: $19 + 22 - 7.5 - 6.1 = 27.4$. Analisando os pesos dos indivíduos encontrados em nosso exemplo, conclui-se que o indivíduo Ind02 está mais apto que o indivíduo Ind01.

$$P_i = P_m + P_e - P_f - P_o$$

Figura 13: Fórmula para determinar peso do indivíduo.

Onde P_i é o peso do indivíduo, P_m é o peso do minério extraído, P_e é o peso do estéril extraído, P_f é o peso do tempo de fila dos caminhões e P_o é o peso do tempo ocioso das escavadeiras, todos eles extraídos pelo indivíduo.

Além da população de indivíduos, cada entidade do simulador (caminhão, escavadeira, britador, pilha, área e fluxo) é representada por uma classe que guarda todos os valores relevantes dessas entidades, desde identificação de cada equipamento a agenda de paradas do mesmo, para auxiliar o funcionamento do algoritmo genético.

5 Resultados e Discussões

Segundo profissionais da área de mineração, o modelo proposto representa bem as atividades de uma mina de ferro. O modelo não só pode ser facilmente modificado para ser aplicado em outros problemas *online* como é de fácil compreensão podendo ser usado também para fins didáticos.

Foi proposto também um modelo de algoritmo genético que resolve o problema baseando-se no modelo de representação da mina proposto.

Dentre os trabalhos futuros a ser realizado sobre este tema seria a implementação do algoritmo genético proposto o que nos permitirá ter soluções para o problema. Após isso seria interessante implementar melhorias no código desde formas de cruzamento diferentes a uma melhoria na geração da população inicial. Outro trabalho que poderia ser realizado é a paralelização do algoritmo já que os algoritmos genéticos têm a característica de ser facilmente paralelizáveis.

Referências

(ALVARENGA, 1997) ALVARENGA, G. B. *Despacho Ótimo de Caminhões Numa Mineração de Ferro Utilizando Algoritmo Genético com Processamento Paralelo*. 1997. UFMG. Dissertação de mestrado, Belo Horizonte.

(ALVARENGA, 2005) ALVARENGA, G. B. *Um Algoritmo Híbrido para os Problemas de Roteamento de Veículos Estático e Dinâmico com Janela de Tempo*, 2005. 180 p. Tese de doutorado. Departamento de Ciência da computação (DCC) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

(HOLLAND, 1975) HOLLAND, J. H. *Adaptation in Natural and Artificial System*. Universit of Michigan Press, 1975.

(LARSEN, 2000) LARSEN, A. *The Dynamic Vehicle Routing*, 2000. Phd. Thesis. Department of Mathematical Modelling (IMM) at the Technical University of Denmark (DTU).