

Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação
Departamento de Engenharia de Computação e Automação Industrial



**Métodos Heurísticos em Programação de Atividades em Pátios
de Estocagem**

Paulo Henrique Rodrigues Molck

Orientador: Prof. Dr. Fernando Antonio Campos Gomide

Co-orientador: Dr. Rodrigo Almeida Gonçalves

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Fernando Antonio Campos Gomide
Unicamp

Prof. Dr. Rafael Santos Mendes
Unicamp

Prof. Dr. Wagner Caradori do Amaral
Unicamp

Prof. Dr. Pyramo Pires da Costa Junior
PUC/MG

Dissertação de Mestrado
Campinas – SP – Brasil
Setembro de 2002

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

M731m	Molck, Paulo Henrique Rodrigues Métodos heurísticos em programação de atividades em pátios de estocagem / Paulo Henrique Rodrigues Molck.--Campinas, SP: [s.n.], 2002. Orientadores: Fernando Antonio Campos Gomide e Rodrigo Almeida Gonçalves. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. 1. Planejamento da produção. 2. Programação heurística. 3. Inteligência artificial. I. Gomide, Fernando Antonio Campos. II. Gonçalves, Rodrigo Almeida. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. IV. Título.
-------	---

AGRADECIMENTOS

Ao professor Fernando Gomide e ao Rodrigo Gonçalves, meus orientadores e companheiros durante todo o trabalho.

Ao professor Rafael Mendes pela colaboração durante as etapas iniciais do trabalho.

Ao CNPq pelo suporte financeiro parcial.

A Torquato Caldas, José Valentim, Leôncio Lima, Eduardo Newton, Mauro França e à Companhia Vale do Rio Doce pela disponibilização dos dados e conhecimento especialista sem os quais o trabalho seria impossível.

RESUMO

São várias as etapas envolvidas nos processos de exploração, processamento, transporte e exportação de minérios por companhias mineradoras, sendo que cada uma destas etapas apresenta problemas e dificuldades específicos e exige, portanto, soluções diferentes. Este trabalho apresenta um sistema de suporte a tomada de decisão para o seqüenciamento das operações no pátio de estocagem de minério no porto. O algoritmo do sistema apresentado é baseado no modelo de busca em espaço de estado e inclui algumas heurísticas baseadas em técnicas de inteligência artificial. São apresentados também uma implementação computacional do algoritmo, discussões sobre os resultados obtidos e exemplos de aplicação do sistema a situações reais.

ABSTRACT

This work introduces a decision support system for intelligent management of iron ore shipping yard operations. The system uses a discrete event approach to model yard operations such as car dumping, iron ore transportation and pile formation, stacker and reclaimer assignment and ship loading. The decision-making strategy is based on heuristic search techniques and fuzzy evaluation functions to choose appropriate origin and destination stockpiles for train dumping and ship loading, respectively. Experience with the system in actual decision-making instances is also reported. The results show that the system does suggest effective and realistic solutions for decision-makers.

Conteúdo

1 – Introdução	1
2 - Descrição do Problema	3
2.1 - Introdução	3
2.2 - Descrição dos elementos do pátio	3
2.3 - Fluxo no pátio de minérios	7
2.4 - Objetivos de decisão	10
2.5 - Resumo	15
3 – Metodologias e Algoritmos de Solução de Problemas	16
3.1 – Introdução	16
3.2 - Estado e busca em espaço de estado	16
3.3 – Algoritmos de busca	18
3.4 - Algoritmos de busca não-informada	19
3.5- Algoritmos de busca informados	22
3.6 - Resumo	25
4 - Algoritmo de programação de atividades em pátio de minério	26
4.1 – Introdução	26
4.2 – Definição do estado	26
4.3 – Definição e caracterização dos operadores	31
4.4 – Funções de avaliação de estado	40
4.5 – Funções de avaliação dos operadores	46
4.6 – Algoritmo de busca	50
4.7 – Análise de complexidade do algoritmo	52
4.8 – Resumo	53
5 – Sistema computacional de suporte à programação	54
5.1 – Introdução	54
5.2 – Arquitetura funcional e interfaces	54
5.3 – Modelagem orientada a objetos	65
5.4 – Resumo	69
6 – Resultados de simulação	70
6.1 – Introdução	70

6.2 – Descrição dos cenários	70
6.3 – Programação de atividades pelo especialista	71
6.4 – Programação de atividades com o auxílio do sistema desenvolvido	72
6.5 – Exemplo de simulação	74
6.6 – Análise de desempenho computacional	78
6.5 – Resumo	79
7 - Conclusão	80
<i>Referências bibliográficas</i>	82

Lista de Figuras e Tabelas

<i>Figura 2.1 – Layout do pátio</i>	<i>4</i>
<i>Figura 4.1 – Árvore de busca</i>	<i>40</i>
<i>Figura 4.2 – Analogia pátio de minério – setor em disco rígido</i>	<i>42</i>
<i>Tabela 4.1 – Comportamento da medida de balanceamento de massas</i>	<i>43</i>
<i>Figura 4.3 – Vizinhança temporal.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 4.4 – Base de regras para o cálculo de vt</i>	<i>45</i>
<i>Tabela 4.2 – Prioridades dos operadores.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 4.5 – Tempo de residência.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 4.6 – Algoritmo de busca.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 5.1 – Base de dados – Sistema – Usuário.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 5.2 – Interface para a visualização do estado do pátio.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 5.3 – Time</i>	<i>56</i>
<i>Figura 5.4 – Trens</i>	<i>57</i>
<i>Figura 5.5 – Navios</i>	<i>57</i>
<i>Figura 5.6 – Máquinas</i>	<i>58</i>
<i>Figura 5.7 – Pátio.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 5.8 – Janela Pátio – detalhe</i>	<i>59</i>
<i>Figura 5.9 – Visualização dos resultados – Barra de controle de tempo</i>	<i>60</i>
<i>Figura 5.10 – Visualização dos resultados – Barra de controle de tempo</i>	<i>61</i>
<i>Figura 5.11 – Visualização dos resultados – Barra de controle de tempo</i>	<i>62</i>
<i>Figura 5.12 – Configuração dos parâmetros do algoritmo</i>	<i>63</i>
<i>Figura 5.13 – Configuração de operador de descarga</i>	<i>64</i>
<i>Figura 5.14 – Modelo conceitual do package Básico</i>	<i>67</i>
<i>Figura 5.15 – Modelo conceitual do package Algoritmo</i>	<i>68</i>
<i>Figura 6.1 – Estado inicial da busca.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 6.2 – Estado final da busca.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 6.3 – Programação de operações.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 6.4 – Gráfico de ocupação das máquinas</i>	<i>78</i>
<i>Tabela 6.1 – Medidas de tempo de processamento</i>	<i>78</i>
<i>Tabela 6.2 – Tempo total de processamento</i>	<i>79</i>

1 – Introdução

São várias as etapas envolvidas nos processos de exploração, processamento, transporte e exportação de minérios por companhias mineradoras. Estas etapas cobrem desde a extração de minério na mina até seu embarque em navios atracados no porto e, apesar das diversas diferenças em termos de infraestrutura e modos de operação entre diferentes companhias mineradoras, pode-se dizer que algumas das etapas destes processos estão, de alguma forma, presentes em praticamente todos os casos. Cada uma destas etapas apresenta problemas e dificuldades específicos e exige, portanto, soluções diferentes. Apesar disto, todas as etapas estão interligadas e é necessário não perder a visão total do processo ao lidar com cada uma separadamente. Algumas destas principais etapas são citadas abaixo, juntamente com alguns dos principais elementos que devem ser gerenciados para a realização satisfatória de cada uma delas:

- a) extração de minério: na extração do minério da mina várias decisões devem ser tomadas como, por exemplo, quais minérios explorar a cada momento, a escolha do local de onde o minério será retirado, a alocação de equipamento para a extração, etc;
- b) transporte mina-porto: de maneira geral, o transporte entre mina e porto é realizado através de ferrovias e assim, estão envolvidos aqui todos os problemas relacionados ao gerenciamento de linhas ferroviárias como, por exemplo, a ordenação das filas de trens, as estratégias utilizadas no despacho, a escolha da localização dos pontos de cruzamento, etc;
- c) descarga do minério no pátio: devido à diversas restrições presentes no processo como, por exemplo, restrições de transporte e armazenagem, geralmente é impossível descarregar os trens de minério diretamente nos navios que realizam o transporte até o destino final. Torna-se necessária, portanto, a existência de pátios de armazenagem nos portos onde o minério é estocado e, em diversas situações, processado, até que seja embarcado nos navios adequados. Diversas decisões devem ser tomadas no gerenciamento adequado dos elementos presentes no pátio do porto. Dentre elas, destacam-se, por exemplo, a escolha das máquinas utilizadas na descarga do minério que chega pela ferrovia, a escolha das pilhas onde o minério descarregado é armazenado, o gerenciamento dos diversos processos auxiliares na formação dos produtos, etc;
- d) embarque de minério nos navios: além das descargas, o gerenciamento do pátio do porto envolve também as operações de embarque e problemas como alocação de máquinas para a recuperação do minério a ser embarcado ou a escolha das pilhas embarcadas em cada navio, por exemplo, devem ser tratados neste caso;

- e) desembarque no destino: ao chegar ao porto de destino, os navios são descarregados e, geralmente, o minério é armazenado no pátio de onde segue, por transporte rodoviário ou ferroviário, até seu destino final.

Apesar da simplicidade na descrição das diversas etapas acima não é difícil imaginar que cada etapa é, na verdade, extremamente complexa e oferece oportunidade para a aplicação dos mais variados métodos, tanto tradicionais quanto de inteligência artificial, na resolução de seus problemas particulares.

O presente trabalho concentrou-se na resolução dos problemas relacionados ao gerenciamento do pátio de armazenagem de minério do porto, ou seja, foram tratados principalmente os problemas relacionados aos embarques e descargas de minério, assim como a outros processos que ocorrem dentro do pátio.

Apenas alguns poucos trabalhos foram encontrados na literatura tratando das diversas etapas componentes dos processos de exploração, processamento, transporte e exportação de minérios. Em [3] os autores utilizam uma base de conhecimentos e um mecanismo de inferência (*forward-chaining*) para encontrar a ordenação ótima das filas de navios a embarcar, com relação à minimização das multas pagas em caso de atrasos nos embarques. Já em [2] são aplicados a cada etapa de extração e transporte de minério diversos métodos analíticos e simulações de forma a uniformizar a composição do minério em cada uma destas etapas. Em [4] os autores utilizam uma função de avaliação heurística para escolher uma dentre as possíveis alternativas na utilização de descarregadores, correias transportadoras e empilhadeiras durante o desembarque do minério no porto destino. Nenhum trabalho foi encontrado tratando especificamente do gerenciamento dos diversos elementos do pátio do porto.

O objetivo deste trabalho é, portanto, estudar e obter soluções para os diversos problemas relativos ao gerenciamento do pátio do porto. O texto está dividido da seguinte forma: o capítulo 2 apresenta uma descrição detalhada do problema, assim como os objetivos de decisão e restrições que caracterizam as soluções desejadas; no capítulo 3 são apresentados os elementos que compõem o modelo de busca em espaço de estado e alguns dos principais algoritmos de busca são descritos; no capítulo 4 a aplicação do modelo de busca em espaço de estado ao problema de gerenciamento do pátio é apresentado e uma descrição da implementação computacional do algoritmo desenvolvido é realizada no capítulo 5; os resultados obtidos com a aplicação do algoritmo a situações reais são apresentados no capítulo 6 e o capítulo 7 apresenta as conclusões do trabalho e algumas sugestões para trabalhos futuros.

2 - Descrição do Problema

2.1 - Introdução

Neste capítulo serão descritos os elementos que compõem o pátio de estocagem de minérios estudado e como o minério proveniente da mina flui através destes diversos elementos. Serão apresentados também as restrições físicas e operacionais que devem ser obedecidas e os objetivos de decisão, ou seja, as características das soluções desejadas para o problema do gerenciamento do pátio.

A descrição do problema é feita utilizando um pátio de estocagem específico sem perda, no entanto, de generalidade já que praticamente todos os pátios de estocagem de minério são compostos dos mesmos elementos e das mesmas operações básicas, com diferenças apenas na configuração destes elementos.

2.2 - Descrição dos elementos do pátio

O pátio estudado neste trabalho faz parte de um complexo para exploração, processamento, transporte e exportação de minérios composto basicamente por três partes principais: mina, ferrovia e porto. Na mina o minério explorado é armazenado em um pátio de pequeno porte onde é empilhado e permanece apenas o tempo suficiente para aguardar um trem para o carregamento. Uma média de 6 a 8 trens por dia fazem o transporte do minério da mina até o porto onde, após ser descarregado e empilhado no pátio, o minério aguarda o início do embarque.

Tomado como um todo, o complexo mina-ferrovia-porto apresenta inúmeras oportunidades de estudo e experimentação de técnicas de decisão e otimização de seus diversos componentes. A ferrovia, por exemplo, requer algoritmos inteligentes de despacho de trens para otimizar o transporte de minério entre mina e porto e, no caso do porto, a ordem em que os navios são carregados pode ser otimizada visando aumentos na taxa de embarque e procurando minimizar as multas decorrentes de atrasos no carregamento dos navios. O presente trabalho concentra-se exclusivamente no pátio presente no porto. Assim, variáveis como a ordem em que os trens chegam para a descarga, as quantidades e tipos de minério transportados da mina ou a ordenação da fila de navios esperando o carregamento da carga são consideradas definidas e não são alteradas. O foco do trabalho, portanto, é a otimização e programação do fluxo de minérios que se inicia na descarga dos trens e termina no embarque das cargas dos navios.

A Figura 2.1 mostra a disposição dos principais elementos componentes do pátio, descritos com detalhe a seguir:

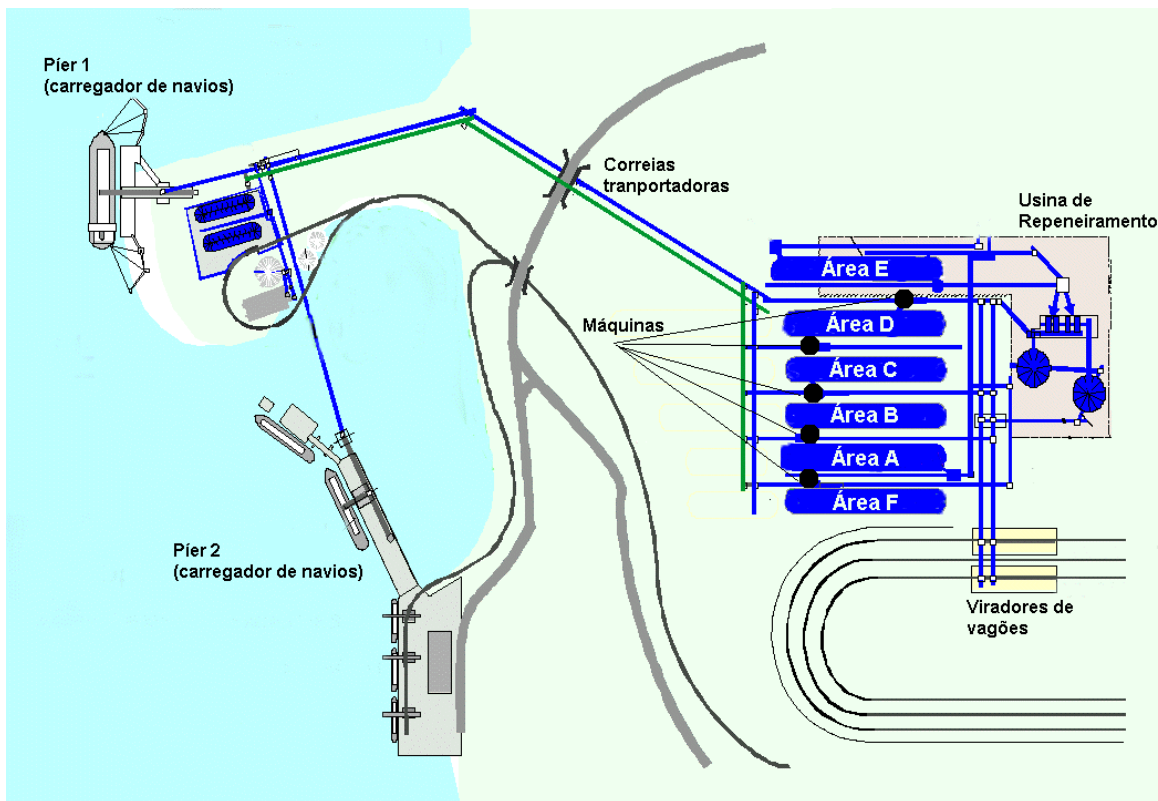


Figura 2.1 – Layout do pátio

1) Viradores de vagões

São os equipamentos utilizados para descarregar os trens nas esteiras que levam o minério a ser empilhado para o pátio. Cada virador tem capacidade para virar dois vagões ao mesmo tempo, a uma taxa de 8000 ton/h. O pátio atualmente conta com dois viradores de vagão e, portanto, a capacidade máxima de descarga é de 16000 ton/h. Cada trem que chega para a descarga é composto por 204 vagões com capacidade de 100 ton por vagão. Assim, um trem transporta 20400 ton de minério e pode ser descarregado, utilizando os dois viradores ao mesmo tempo, em aproximadamente 1 hora e 20 minutos. A descarga completa de um trem leva, na verdade, um pouco mais tempo pois os braços dos viradores não podem puxar todo o trem de uma vez. É necessário dividir os trens em lotes menores compatíveis com a capacidade dos braços e para isso são necessárias algumas manobras ferroviárias que duram em média 30 minutos.

Com uma média de 8 trens por dia o intervalo de chegada entre eles é de 3 horas aproximadamente. Assim, idealmente, os trens devem ser descarregados em menos de duas horas, mas é possível descarrega-los em até 3 horas sem acarretar em atrasos mais graves na circulação normal da ferrovia.

2) Áreas , áreas de empilhamento e pilhas

O pátio é composto por 6 áreas, nomeadas de A a F, onde o minério descarregado é empilhado e armazenado até seu embarque. Cada área é dividida em 72 balizas de 10 metros cada com capacidades que vão de 10000 a 12000 ton por baliza dependendo da área e do produto empilhado.

São diversos os tipos de minério armazenados no pátio e cada um caracteriza-se por qualidades físicas e químicas diferentes. Ao armazenar o minério no pátio é necessário separar esses diversos tipos. Assim, para evitar a contaminação de um tipo de minério por outro, as áreas são divididas em diversas sub-áreas, chamadas áreas de empilhamento, reservadas exclusivamente para os diferentes grupos de minério.

A quantidade de água misturada ao minério influi decisivamente na qualidade dos produtos oferecidos pelo porto. De maneira geral, os clientes que compram minério do porto exigem baixas quantidades de água em seus produtos. Para atender a essas exigências as áreas são equipadas com dispositivos de drenagem e o excesso de água é retirado das pilhas de minérios.

Além das exigências com relação ao excesso de água as pilhas de minérios formadas nas áreas também devem obedecer outras restrições, como tamanhos máximo e mínimo das pilhas, espaço mínimo entre as pilhas e critérios de qualidade do minério armazenado.

3) Usina de repeneiramento

O porto comercializa um tipo especial de produto que deve ser repeneirado antes de embarcar, resultando em dois tipos de produtos: minério fino e minério granulado. Para cada um destes produtos existe uma pilha temporária, os chamados pulmões de fino e granulado, onde o minério é armazenado temporariamente até que seja possível transportá-lo para uma das áreas do pátio. O minério pode ser repeneirado a uma taxa de 2000 ton/h e transferido dos pulmões para as áreas a uma taxa de 4000 ton/h. Devido a restrições estruturais do pátio é possível retirar minério de apenas um pulmão por vez. Todo o minério a ser repeneirado é empilhado, ao chegar pela ferrovia, na área de repeneiramento, exclusiva para minérios deste tipo.

4) Máquinas

As áreas do pátio são atendidas por 6 máquinas que realizam os trabalhos de empilhar o minério nas pilhas e recuperar o minério empilhado para o embarque ou repeneiramento. As máquinas presentes no pátio são:

Empilhadeira EMP1 – esta empilhadeira atende as áreas B e C do pátio podendo empilhar nas pilhas presentes nestas áreas a uma taxa de 16000 ton/h. A utilização

adequada desta empilhadeira é de especial importância no controle e otimização dos recursos do pátio já que é a única empilhadeira capaz de empilhar o minério proveniente dos dois viradores de vagões ao mesmo tempo.

Empilhadeira EMP2 – atende as áreas D e E do pátio a uma taxa de 8000 ton/h

Recuperadora REC1 – recupera o minério empilhado nas áreas A e B a uma taxa de 8000 ton/h

Recuperadora REC2 – trabalha entre as áreas C e D a uma taxa de 8000 ton/h

Empilhadeira e recuperadora ERE1 – atende as áreas A e F com capacidade tanto de empilhamento como de recuperação. Realiza estas operações a uma taxa de 8000 ton/h. Por ser a única máquina com capacidade de empilhamento e recuperação de minério é um importante ponto de conflito no problema de controle do pátio já que, em um determinado instante, pode ser solicitada para descarregar um trem ao mesmo tempo em que é solicitada para embarcar um navio.

Recuperadora dedicada RR1 – esta máquina é dedicada exclusivamente à tarefa de transferir o minério armazenado nas pilhas da área de repeneiramento para a usina de repeneiramento, realizando esta tarefa a uma taxa de 2000 ton/h. Ao contrário das outras máquinas que funcionam sobre trilho e têm acesso a qualquer pilha dentro das respectivas áreas, esta máquina funciona sobre um esteira dentro da área e, portanto, pode recuperar apenas a pilha imediatamente a sua frente ou atrás.

Com esta configuração de máquinas no pátio pode-se descrever a seguinte relação entre as áreas e as máquinas que as atendem:

Área	Empilhadeira	Recuperadora
A	ERE1	ERE1, REC1
B	EMP1	REC1
C	EMP1	REC2
D	EMP2	REC2
E	EMP2	RR01
F	ERE1	ERE1

5) Carregadores de navios

O porto possui dois píeres para embarque de navios e cada píer é atendido por um carregador de navios que recebe o minério recuperado pelas máquinas no pátio. O carregador de navios CN1 atende o píer 1 e tem capacidade de 16000 ton/h, enquanto o carregador de navios CN2 atende os navios atracados no píer 2 a uma taxa de 8000 ton/h. Não há restrições quanto ao uso simultâneo dos carregadores, ou seja, é possível carregar navios nos píeres 1 e 2 ao mesmo tempo.

6) Correias transportadoras

Responsáveis pelo fluxo de minério no pátio existem várias correias transportadoras, sendo quatro as principais:

- duas correias que transportam o minério descarregado pelos dois viradores de vagões até as máquinas empilhadeiras nas áreas. Cada correia tem capacidade de 10000 ton/h, um pouco maior que a capacidade dos próprios viradores que, como já foi visto, é de 8000 ton/h.

- duas correias que fazem a ligação entre as máquinas recuperadoras e os carregadores de navios. A primeira correia, que liga as máquinas ao píer 1 tem capacidade de 16000 ton/h e a segunda correia, ligando as recuperadoras ao píer 2 trabalha a uma taxa de 8000 ton/h.

2.3 - Fluxo no pátio de minérios

Na seção anterior foram descritos os principais elementos presentes no pátio. Agora será descrito como estes elementos interagem para que o minério flua no pátio desde a saída da ferrovia até os navios. De maneira bastante resumida o fluxo de minério no pátio pode ser descrito da seguinte forma: os trens de minério provenientes da mina, ao chegar ao porto, são descarregados pelos viradores de vagões e o minério segue até as empilhadeiras através das correias transportadoras e é empilhado nas áreas em pilhas adequadas. Quando um navio chega para o embarque as pilhas presentes nas áreas são recuperadas pelas recuperadoras e transportadas, via correias transportadoras, até os píeres onde os carregadores preenchem os navios com suas cargas. De forma mais detalhada, o fluxo de minério entre os trens e os navios é efetuado através da realização de diversas operações responsáveis, cada uma, pelo fluxo entre dois elementos componentes do pátio. As operações realizadas no pátio são:

1) Descarga – esta operação é responsável pela descarga de um lote de vagões e pela transferência do minério descarregado até uma máquina empilhadeira, que armazena o minério nas áreas do pátio. Várias decisões devem ser tomadas ao se configurar uma operação de descarga. Algumas das principais são:

- quantidade de minério a descarregar – nem sempre o lote é descarregado completamente em apenas um pilha. Assim é necessário determinar que quantidade será descarregada na pilha em questão no momento.
- empilhadeira a ser utilizada – a escolha da empilhadeira depende de diversos fatores como a disponibilidade de máquinas, as áreas escolhidas para descarregar o minério, a otimização da descarga utilizando duas empilhadeiras ao mesmo tempo, balanceamento de massa pelas áreas, etc.
- área onde o minério será empilhado – a escolha da área depende da disponibilidade de máquinas, da disposição das áreas de empilhamento, espaço suficiente para o armazenamento do minério, oportunidades de otimização dos embarques, etc.
- utilização de pilhas já existentes ou criação de novas pilhas – depende de fatores como a qualidade do minério presente nas pilhas, a disponibilidade de espaço na área, o tamanho das pilhas já existentes, etc.

2) Embarque – operação responsável pela recuperação das pilhas presentes no pátio e transferência do minério para os píeres onde os navios são carregados. Assim como no caso da descarga, a configuração de uma operação de embarque depende de um conjunto de decisões, destacando-se entre elas:

- escolha das pilhas e quantidades por pilha a serem embarcadas – ao escolher as pilhas e quantidades a serem embarcadas por pilha diversos fatores devem ser considerados como, por exemplo, a qualidade do minério armazenado, o tempo de deslocamento da máquina até as pilhas, a possibilidade de se recuperar “saldos” de embarques anteriores (pilhas pequenas que não foram totalmente consumidas e ocupam espaço no pátio), etc.
- ordem com que as pilhas escolhidas serão recuperadas – para se formar a carga de um navio geralmente é necessário o embarque de diversas pilhas presentes no pátio. A escolha da ordem com que as pilhas são recuperadas é tão importante quanto a escolha das pilhas em si, já que a ordem adequada influi de maneira decisiva na utilização inteligente dos recursos a disposição.
- escolha das recuperadoras – no embarque a escolha das recuperadoras é geralmente decidida a partir da escolha das pilhas a serem embarcadas. No entanto, para algumas áreas existe mais de uma recuperadora possível e portanto uma decisão deve ser tomada. Além disso, a indisponibilidade de uma recuperadora pode impedir o embarque de uma pilha planejada para o navio em questão.

3) Repeneiramento – parte do minério de ferro proveniente da mina deve passar por uma usina de repeneiramento antes de ser comercializado no porto. Este minério é inicialmente empilhado na área de repeneiramento do pátio, exclusiva para este tipo de produto, e, na hora apropriada, é recuperado pela recuperadora dedicada RR1 que o transfere para a usina de repeneiramento. O repeneiramento do minério de ferro resulta em dois produtos distintos: ferro fino e ferro granulado, que são então armazenados em duas pilhas especiais, chamadas pulmão de finos e pulmão de granulados, respectivamente. O pulmão de finos tem capacidade de 2000 ton e o pulmão de granulados de 2500 ton. A recuperadora dedicada recupera minério da área de repeneiramento a uma taxa de 2000 ton/h, sendo necessário esvaziar constantemente os pulmões para que a área não acumule excesso de minério destinado ao repeneiramento. As operações de esvaziamento dos pulmões serão descritas logo a seguir. Uma operação de repeneiramento é relativamente fácil de configurar já que a recuperadora dedicada pode trabalhar apenas na pilha diretamente a sua frente ou atrás, deixando poucas opções para a escolha da pilha a ser recuperada. Além disso, a recuperadora RR1 é dedicada exclusivamente à tarefa de recuperar pilhas da área de repeneiramento, o que evita conflitos com outras operações.

4) Injeção de fino – o esvaziamento do pulmão de fino, contendo o minério fino resultante do processo de repeneiramento, é feito pela operação de injeção de fino. O minério fino é considerado um produto menos nobre que o minério granulado e não é comercializado como um produto em si, mas sim misturado em proporções limitadas a outros produtos. Existem duas maneiras de se misturar o minério presente no pulmão de finos a outros produtos: a primeira é injetá-lo diretamente nas pilhas adequadas utilizando uma das empilhadeiras que fica alocada apenas para esta tarefa; a outra maneira é aproveitar a ocorrência de uma descarga e injetar o minério na mesma esteira utilizada para transportar o minério do virador de vagões até a empilhadeira. Esta realização simultânea da descarga e da injeção de fino é possível já que o virador funciona a uma taxa de 8000 ton/h e a esteira tem capacidade de 10000 ton/h, restando uma capacidade ociosa de 2000 ton/h que pode ser utilizada para a injeção simultânea. Quando a injeção utiliza plenamente a capacidade de uma empilhadeira a ela alocada, isto é, sem uma descarga simultânea, a taxa de esvaziamento do pulmão de finos é de até 4000 ton/h.

5) Empilhamento do granulado – a transferência do minério armazenado no pulmão de granulados para as áreas do pátio é realizada a uma taxa de 4000 ton/h utilizando uma das empilhadeiras para armazenar o minério em uma pilha já existente ou criando pilhas novas. Ao contrário do que ocorre na injeção de fino não é possível realizar uma operação de empilhamento do granulado simultaneamente a uma descarga. Além disso, também não é possível esvaziar os pulmões de fino e granulado simultaneamente já que existe apenas uma esteira ligando os dois pulmões às empilhadeiras que atendem as áreas.

As operações de injeção de fino e empilhamento do granulado competem com a operação de descarga na utilização das empilhadeiras. Além disso, podem competir também com os embarques que utilizam a empilhadeira-recuperadora ERE1. Deve-se notar que, no funcionamento geral do pátio, as operações de injeção de fino e empilhamento do granulado não são tão prioritárias quanto as operações de descarga e embarque e, portanto, são geralmente realizadas aproveitando as oportunidades em que não é necessário realizar descargas ou embarques. No entanto, a não realização ou realização inadequada das operações de injeção de fino e empilhamento do granulado pode causar impactos profundos no funcionamento do pátio já que o não esvaziamento dos pulmões causa a paralisação da usina de repeneiramento acarretando em falta de produtos repeneirados para o embarque e em lotação da área de repeneiramento, onde os minérios aguardam até serem repeneirados.

6) Recirculação – esta operação ocorre quando o minério presente em uma pilha é transferido para outra pilha no pátio. Esta transferência de minério entre duas pilhas no pátio ocorre em duas situações: na eliminação de saldos de embarque e na formação de produtos compostos. Saldo de embarque é o nome atribuído às pilhas que foram quase completamente recuperadas para um embarque mas que ainda contêm uma pequena quantidade de minério e ocupam um espaço no pátio que poderia ser utilizado por pilhas de maior tamanho. Assim, para disponibilizar o espaço sub-utilizado estes saldos são transferidos para outras pilhas do mesmo produto presentes nas áreas.

A recirculação é utilizada também na formação de produtos compostos por dois outros produtos que chegam da mina através da ferrovia. Por questões de disponibilidade de máquinas e espaço no pátio, freqüentemente não é possível misturar os produtos em uma mesma pilha no instante da descarga. Os produtos são então empilhados em pilhas diferentes e posteriormente uma pilha é recirculada para a outra formando o produto desejado.

A operação de recirculação utiliza uma recuperadora para retirar minério da pilha origem e uma empilhadeira para armazenar o minério recuperado na pilha destino, competindo, portanto, tanto com as descargas quanto com os embarques na utilização das máquinas. Portanto, uma operação de recirculação deve ser cuidadosamente planejada de forma a minimizar o impacto na realização das operações de descarga e embarque. Assim como no caso das operações de injeção de fino e empilhamento do granulado as operações de recirculação são geralmente realizadas nas oportunidades quando não há nenhuma descarga ou embarque acontecendo.

2.4 - Objetivos de decisão

O objetivo principal deste trabalho é obter estratégias de gerenciamento do fluxo de minério desde sua chegada ao pátio através da descarga nos viradores de vagões até seu embarque nos navios de forma a otimizar a utilização dos recursos disponíveis e atender a uma série de restrições impostas pelas estruturas física e dinâmica do pátio. De maneira

mais prática, o objetivo do trabalho pode ser visto como a criação de um sistema computacional de apoio à tomada de decisão que proponha soluções para o gerenciamento do fluxo de minério no pátio ajudando o tomador de decisões em sua tarefa.

Na seção anterior o fluxo de minério foi descrito por intermédio das operações que acontecem no pátio. Como foi visto, o minério entra e sai do pátio através das operações de descarga e embarque, respectivamente. Além disso, as operações de repeneiramento, injeção de fino, empilhamento do granulado e recirculação são responsáveis pelo fluxo interno de minério no pátio, fluxo este necessário para a formação de produtos e liberação de espaço nas áreas. Assim, a tarefa de gerenciar o fluxo de minério no pátio pode ser vista como a tarefa de caracterizar e ordenar adequadamente as diversas operações que ocorrem no pátio de forma a atender aos diversos critérios de otimização e respeitar restrições operacionais e físicas. Neste caso, a qualidade das soluções de gerenciamento do fluxo de minério obtidas pode ser avaliada através de critérios de avaliação das operações responsáveis pelo fluxo.

Os critérios de avaliação utilizados para avaliar as operações baseiam-se basicamente em preocupações com a qualidade dos produtos comercializados e com a utilização efetiva dos recursos disponíveis no pátio. São eles:

Critérios para a avaliação da operação de embarque:

1- Qualidade do minério das pilhas embarcadas:

A qualidade do minério armazenado no pátio é dada por uma série de medidas de grandezas físicas e químicas. O principal critério de avaliação do embarque é garantir que todas as grandezas estejam dentro de limites estabelecidos. As pilhas com qualidades superiores são prioritárias no embarque enquanto que pilhas com qualidades inadequadas geralmente são desconsideradas. Para cada grandeza física e química existem três limites superiores e inferiores: limites de especificação garantida, limites de advertência e limites de controle. Pilhas com as grandezas dentro dos limites de especificação garantida têm qualidade excelente e podem ser embarcadas sem restrições. Pilhas com as grandezas dentro dos limites de advertência são a meta da gerência do porto e grande parte das pilhas presentes no pátio apresenta esta qualidade. Pilhas com as grandezas dentro dos limites de controle ainda podem ser embarcadas mas já são consideradas de baixa qualidade. Pilhas fora dos limites de controle são interditadas e impedidas de embarcar.

2- Tempo de residência das pilhas embarcadas:

Na descrição das áreas do pátio feita anteriormente foi colocado que uma importante característica dessas áreas é sua capacidade de drenar o excesso de água presente nas pilhas. Além das grandezas físicas e químicas a quantidade de água misturada ao minério é fator importante na determinação de sua qualidade.

O número de dias que uma pilha passa armazenada no pátio, chamado tempo de residência, é um indicador da quantidade de água misturada ao minério, já que quanto maior o tempo que a pilha permanece na área maior sua drenagem. Assim, embarques de pilhas com tempos de residência elevados são preferenciais a embarques de pilhas com tempos de residência baixos.

3- Embarque com duas máquinas simultaneamente (apenas píer 1):

Como foi visto anteriormente, a correia transportadora que faz a ligação entre as recuperadoras no pátio e o carregador de navios do píer 1 pode funcionar a uma taxa de 16000 ton/h. Como cada recuperadora trabalha a uma taxa de 8000 ton/h é possível realizar embarques para navios no píer 1 utilizando duas máquinas simultaneamente, aproveitando toda a capacidade da correia transportadora e aumentando a taxa de embarque comercial do porto. Assim, deve-se procurar escolher as pilhas a serem embarcadas e as quantidades a embarcar de cada pilha de forma a permitir o embarque com duas máquinas simultaneamente pelo maior tempo possível.

4- Liberação de espaços nas áreas:

O espaço de empilhamento nas áreas é um recurso limitado e geralmente crítico. No embarque é importante, portanto, escolher as pilhas a recuperar visando aumentar a quantidade de espaço liberado e, principalmente, a velocidade com que o espaço é liberado. Como a prioridade aqui é a velocidade de liberação de espaço, deve-se dar preferência a embarques de pilhas pequenas que já começaram a ser recuperadas anteriormente, pois sua recuperação geralmente implica em liberação mais cedo de área para o empilhamento. A recuperação de pilhas maiores implica em liberação de maiores espaços, mas essa liberação é mais lenta.

5- Minimização do deslocamento das máquinas:

Quanto menos as máquinas se deslocam no pátio entre uma pilha e outra melhor tanto em termos de produtividade quanto no tempo de vida útil das mesmas. Assim, deve-se procurar realizar embarques com o mínimo deslocamento possível das recuperadoras.

6- Minimização do atraso nos embarques:

De forma bastante simplificada, o pátio de minérios pode ser visto como uma interface entre os trens e os navios. Neste caso, pode-se considerar o funcionamento adequado desta “interface” como sua capacidade de lidar com as descargas dos trens e embarques nos navios sem atrasos consideráveis.

Para o problema de gerenciamento do fluxo no pátio deve-se procurar, portanto, a obtenção de soluções que minimizem o atraso no embarque dos navios. Na verdade, este critério é tão importante que soluções que ultrapassem um determinado atraso máximo nos embarques são descartadas mesmo que todos os outros critérios de avaliação do embarque tenham resultados satisfatórios. A importância deste critério deve-se ao fato de que são elevadas as multas cobradas em casos de atrasos nos embarques.

Critérios para a avaliação da operação de descarga:

1- Qualidade do minério das pilhas formadas:

Como foi visto anteriormente, o critério mais relevante na avaliação dos embarques é o critério de qualidade das pilhas embarcadas. As pilhas destinadas ao embarque são obviamente formadas pelas descargas do minério dos trens e, portanto, a preocupação com a qualidade das pilhas deve começar desde a descarga. Como o minério que chega ao pátio através da ferrovia já tem a qualidade definida desde a mina, a única forma de manipular a qualidade das pilhas em formação no pátio é a descarga do minério em pilhas adequadas. Assim, deve-se descarregar o minério nas pilhas procurando sempre manter a qualidade das pilhas resultantes e, no caso da descarga de um minério de baixa qualidade, deve-se armazená-lo em pilhas onde a qualidade resultante seja pelo menos aceitável.

2- Descarga com duas máquinas simultaneamente:

Assim como no caso do embarque é importante realizar a descarga com duas máquinas simultaneamente, aumentando a taxa de descarga e evitando atrasos na ferrovia. Esta descarga simultânea é possível pois cada virador conta com uma correia distinta que o liga até as empilhadeiras. Existem basicamente dois tipos de descarga simultânea: a) com duas máquinas distintas e b) utilizando a empilhadeira EMP1. Com duas máquinas distintas cada um dos dois viradores de vagões, que trabalham a uma taxa de 8000 ton/h cada, tem seu fluxo direcionado para uma empilhadeira distinta e, neste caso, o empilhamento de dois produtos diferentes pode ocorrer. Já utilizando a empilhadeira EMP1, que pode trabalhar a 16000 ton/h recebendo o fluxo dos dois viradores de vagões, é possível empilhar apenas um produto já que a empilhadeira trabalha em apenas uma pilha por vez.

Assim, a escolha das máquinas e pilhas utilizadas na descarga deve sempre ser feita de maneira a aumentar o período de utilização simultânea de duas empilhadeiras.

3- Tempo de residência das pilhas:

Como foi visto no caso do embarque, o tempo de residência, ou o número de dias que a pilha permanece no pátio, é uma medida de sua drenagem. Como uma mesma pilha

é formada por várias descargas que podem ocorrer ao longo de vários dias, o tempo de residência é calculado como a média ponderada entre as quantidades de minério descarregadas e os dias de permanência de cada uma dessas quantidades. Assim, ao descarregar uma quantidade de minério em uma pilha deve-se levar em consideração se o tempo de residência resultante da operação continuará ou não apropriado para o embarque.

É fácil perceber que os critérios de qualidade e tempo de residência no embarque são diretamente relacionados aos critérios de qualidade e tempo de residência na descarga já que a formação de pilhas na descarga com qualidade e tempo de residência adequados garante a disponibilidade dessas mesmas pilhas para os embarques futuros.

4- Utilização de pilhas já existentes:

Na descarga de minério de um trem são possíveis duas alternativas: a) a descarga em uma pilha já existente ou b) a formação de uma nova pilha para receber o minério. Como foi visto anteriormente, na descrição das avaliações para a operação de embarque, o espaço de empilhamento no pátio é restrito e, portanto, é sempre preferível descarregar em uma pilha já existente a começar uma nova pilha. Ao se iniciar a formação de uma pilha todo o espaço a ser ocupado por ela é reservado e assim nenhum espaço novo é requerido ao se descarregar em pilhas já existentes, enquanto a formação de novas pilhas requer a alocação de mais espaço dentro do pátio.

5- Minimização do percurso das máquinas:

Critério equivalente ao do embarque. Assim como no caso das recuperadoras as empilhadeiras produzem mais e se desgastam menos com a diminuição de seu deslocamento entre pilhas no pátio para cada operação.

6- Minimização do atraso nas descargas:

Assim como acontece no caso do atraso no embarque dos navios, o atraso na descarga dos trens é um importante critério de avaliação das estratégias de gerenciamento do fluxo de minérios. Deve-se procurar sempre obter soluções que minimizem este atraso e soluções onde o atraso ultrapasse um determinado limite são descartadas.

A qualidade de uma estratégia de gerenciamento do fluxo no pátio de minérios é dada pela qualidade de suas operações de descarga e embarque. As operações de repeneiramento, injeção de fino, empilhamento do granulado e recirculação podem ser consideradas operações auxiliares e não tem critérios de avaliação tão bem definidos quanto no caso da descarga e embarque. De maneira simplificada pode-se dizer que

enquanto estas operações auxiliares realizarem suas funções (como a circulação de minério pelo repeneiramento, o esvaziamento periódico dos pulmões e a formação de produtos pela recirculação) adequadamente, perturbando o mínimo possível as operações de descarga e embarque, elas estarão apropriadas para o funcionamento adequado do pátio.

No começo desta seção foi colocado que soluções para o problema de gerenciamento do fluxo no pátio de minério devem buscar otimizar a utilização dos recursos disponíveis, otimização esta avaliada pelos critérios de avaliação das operações, principalmente as de embarque e descarga. Foi colocado também que, além de buscar a otimização na utilização dos recursos, as soluções obtidas deveriam também atender a uma série de restrições. O número substancial de restrições impostas ao problema estudado torna inoportunas sua listagem e descrição neste trabalho. Essas restrições vão desde as características e capacidades dos equipamentos até as regras que devem ser obedecidas na formação das pilhas, passando por restrições na composição dos produtos, gerenciamento dos pulmões de fino e granulado, plano de carga para os navios e assim por diante.

2.5 - Resumo

Neste capítulo o problema de gerenciamento do fluxo de minério no pátio foi apresentado. Foram descritos os elementos físicos presentes no pátio, como máquinas, áreas, pilhas, correias, etc. e a forma como estes elementos interagem através das operações para permitir o fluxo de minério no pátio. Além disso, foram descritos os objetivos de otimização desejados e citado o fato de que diversas restrições devem ser obedecidas em um gerenciamento adequado do pátio. No próximo capítulo serão apresentados algumas metodologias e algoritmos que podem ser aplicados na solução deste problema juntamente com a justificativa de sua aplicação ao caso estudado.

3 – Metodologias e Algoritmos de Solução de Problemas

3.1 – Introdução

Como foi visto no capítulo anterior o problema de gerenciamento de fluxo de minério no pátio é um problema bastante complexo, sujeito a um número grande de restrições e regras de gerenciamento, regras essas muitas vezes conflitantes entre si e nem sempre muito claras nem mesmo para o tomador de decisão experiente no gerenciamento do pátio. Todos esses fatores tornam inviável e provavelmente impossível a solução do problema utilizando métodos tradicionais de modelagem matemática e durante a pesquisa bibliográfica realizada não foi encontrado nenhum trabalho na literatura onde esta tarefa tenha sido realizada. Em casos como este, em que a modelagem matemática é inapropriada ou impraticável, os métodos de inteligência artificial surgem como uma boa alternativa.

Neste capítulo um destes métodos, a busca em espaço de estado, será apresentado de maneira breve, com uma descrição de suas principais características e de alguns dos algoritmos mais conhecidos. Essa apresentação é justificada já que a proposta apresentada neste trabalho é a de desenvolver um sistema para a solução do problema de gerenciamento de fluxo de minério no pátio utilizando uma série de técnicas de inteligência artificial, sistema este que tem como “espinha dorsal” um método de busca em espaço de estado. Para informações adicionais sobre métodos de busca e heurísticas podem ser consultados [5] e [8].

3.2 - Estado e busca em espaço de estado

Não seria possível resolver nenhum tipo de problema através de métodos matemáticos tradicionais ou de métodos de inteligência artificial se não fosse possível modelar e representar problemas e situações do “mundo real” através de entidades mais simples e manipuláveis. Uma das maneiras de representar os problemas do “mundo real” a partir de abstrações de suas características mais importantes é agregar estas características em entidades chamadas *estados*. O estado de um sistema é, assim, uma estrutura onde estão armazenadas as informações relevantes para representar seu comportamento em um determinado instante de tempo. Além da definição dos estados, é também essencial para a representação de um problema a caracterização das ações e ocorrências que podem levar o sistema de um estado a outro. O modelo de busca em espaço de estado utiliza estes conceitos para modelar e resolver problemas. Os principais elementos deste modelo são:

- estados: representam as características do sistema em um determinado instante do tempo;
- estado inicial: representa a condição inicial do sistema;
- estado final: estado (ou conjunto de estados) que representa a solução para o problema em questão;
- operadores: representam as possíveis ações aplicáveis a cada estado. A aplicação dos operadores a um estado, ou expansão do estado, é responsável pela geração de novos estados e pela transição entre eles. O conceito de espaço de estado refere-se ao conjunto de todos os estados que podem ser alcançados a partir do estado inicial através da aplicação dos operadores aos estados resultantes;
- algoritmo de busca: a partir do estado inicial e com a aplicação dos operadores pode ser possível alcançar um ou mais estados que representem a solução para o problema em questão. De forma geral pode-se dizer que a função do algoritmo de busca é escolher a ordem em que os estados serão analisados e os operadores aplicados de forma a encontrar uma ou mais soluções para o problema;
- teste de parada: para saber se a solução de um problema foi ou não alcançada o algoritmo de busca deve ser capaz de identificar um estado como o estado final desejado. Este teste para certificar se um estado é final, e representa a solução para o problema, pode ser feito verificando se ele pertence a um conjunto de estados que explicitamente representam a solução para o problema, ou, na ausência deste conjunto, verificando se o estado obedece a um conjunto de propriedades desejadas para a solução;
- função de custo: a transição de um estado a outro através da aplicação dos operadores geralmente acarreta em um custo dado por esta função.

A partir das definições acima pode-se resumir o modelo de busca em espaço de estado da seguinte forma:

- a) partindo do estado inicial outros estados são gerados através da aplicação dos possíveis operadores ao estado inicial;
- b) o algoritmo de busca verifica, utilizando o teste de parada, se algum dos estados gerados é o estado final e, caso nenhum deles seja, escolhe então um novo estado dentre os estados já gerados e aplica os possíveis operadores a ele. Diferentes algoritmos de busca caracterizam-se por diferentes critérios na escolha do próximo estado a ser expandido;
- c) o item anterior é repetido até que o algoritmo identifique um ou mais estados finais;

- d) a solução para o problema é então o caminho percorrido desde o estado inicial até o estado final. Caso exista mais de um estado final, ou mais de um caminho até o estado final, geralmente a solução é dada pelo caminho com o menor custo.

Um conceito bastante utilizado para facilitar a visualização do comportamento da busca em espaço de estado é o conceito de árvore de busca. A árvore de busca é superposta ao espaço de estado e cada nó da árvore corresponde a um estado já alcançado pelo algoritmo de busca. As folhas da árvore correspondem aos estados que não têm sucessor na árvore, ou porque ainda não foram expandidos, ou porque sua expansão resultou em um conjunto vazio de novos estados. A cada passo o algoritmo de busca é responsável por escolher uma das folhas e expandi-la.

Além da árvore de busca pode-se representar também um algoritmo de busca utilizando uma pseudo-linguagem computacional. Neste caso o conjunto de nós a serem expandidos é representado por uma lista e os algoritmos de busca diferenciam-se uns dos outros de acordo com o critério de ordenação dos nós na lista. Esta representação, que será utilizada na caracterização dos diversos algoritmos de busca apresentados a seguir, pode ser descrita da seguinte forma:

```
1)  função BuscaGeral (problema, lista) retorna uma solução, ou falha
2)    conjunto_nós = CriaLista(CriaNó(EstadoInicial[problema]))
3)    loop
4)      se conjunto_nós é vazio então retorna falha
5)      nó = RemovePrimeiroDaLista(conjunto_nós)
6)      se CritérioParada[problema] indica que o nó é um estado final, então retorna nó
7)      conjunto_nós = OrdenaçãoDaLista(conjunto_nós , Expande(nó, Operadores[problema]))
8)    fim loop
```

onde os seguintes operadores são aplicados à lista de nós a serem expandidos:

- CriaLista(elementos): cria uma lista a partir dos elementos dados;
- ListaVazia(lista): retorna verdadeiro se não existe nenhum elemento na lista;
- RemovePrimeiroDaLista(lista): retorna e remove o primeiro elemento da lista;
- OrdenaçãoDaLista(elementos, lista): insere os elementos dados na lista. A forma como os elementos são inseridos (ordenação) caracterizam os diferentes algoritmos de busca;
- Expande(nó, listaOperadores): cria novos nós aplicando os operadores da lista ao nó dado como parâmetro.

3.3 – Algoritmos de busca

O sucesso da aplicação do modelo de busca em espaço de estado na solução de um problema está basicamente ligado a dois fatos:

- a) representação adequada do problema em estados, operadores, critérios de parada e funções de custo. A aplicação bem sucedida do modelo de busca em espaço de

estado depende em grande escala da capacidade de representar ou mapear as características relevantes à solução do problema nos elementos que compõem o modelo. É indispensável verificar, portanto, se os estados armazenam todas as informações relevantes para a representação do problema; se todas as possibilidades de aplicação dos operadores a cada estado são consideradas e se sua aplicação resulta na geração de estados condizentes com a realidade do problema; se o critério de parada é flexível o suficiente para caracterizar uma solução quando ela existe, mas restritivo o suficiente para não aceitar soluções que não atendam a todos os critérios desejados; e, finalmente, se os valores obtidos pelas funções de custo realmente representam, tanto quantitativamente quanto qualitativamente, os custos reais resultantes de mudanças de estado no “mundo real”.

- b) qualidade do algoritmo de busca. Se a modelagem do problema através dos estados, operadores, critério de parada e funções de custo é adequada para representar o problema de maneira satisfatória, então grande parte da efetividade do modelo de busca em espaço de estado depende da adequação do algoritmo de busca utilizado.

O restante deste capítulo será dedicado a descrever as características mais importantes de alguns dos principais algoritmos de busca conhecidos e avaliar a qualidade destes diferentes algoritmos. Para a avaliação da qualidade dos algoritmos serão utilizados os seguintes critérios:

- Completeza: avalia se o algoritmo garante a descoberta de uma solução se existir alguma;
- Complexidade temporal: avalia quanto tempo o algoritmo leva para encontrar uma solução;
- Complexidade espacial: avalia quanta memória é utilizada pelo algoritmo em sua tarefa de encontrar a solução;
- Otimalidade: avalia se o algoritmo encontra a melhor solução quando diversas soluções são possíveis.

3.4 - Algoritmos de busca não-informada

Os três algoritmos descritos a seguir fazem parte de um conjunto de algoritmos chamados de busca não-informada. Estes algoritmos caracterizam-se pelo fato de não contarem com nenhuma informação sobre quão perto um determinado estado está do estado final desejado. Assim, ao comparar um estado qualquer ao estado final o algoritmo reconhece se os dois são iguais ou não, mas não avalia se o estado é “parecido” ou o quanto ele “se aproxima” do estado final. A única diferença entre os algoritmos descritos a seguir é a ordem em que eles expandem os nós pendentes na lista.

1) Busca em largura

Na busca em largura todos os nós com profundidade d são expandidos antes dos nós com profundidade $d+1$, ou seja, o nó raiz (estado inicial) é expandido primeiro, então todos os nós gerados a partir do nó raiz são expandidos, e depois os descendentes dos nós gerados a partir do nó raiz são expandidos e assim por diante.

As principais vantagens aqui são com relação à completeza e otimalidade. Como este método analisa todos os caminhos de tamanho 1, todos os caminhos de tamanho 2 e assim por diante até encontrar um solução, ele garante que a solução é encontrada, se alguma existir. Além disso, ele garante que a solução encontrada seja aquela com menor profundidade dentre as existentes e essa solução pode ser considerada a solução ótima desde que o custo do caminho seja proporcional à profundidade do nó.

As vantagens obtidas com o fato do algoritmo verificar todos os caminhos de profundidade 1, profundidade 2, etc. transformam-se, no entanto, em desvantagens quando o algoritmo é avaliado em relação aos custos computacionais de tempo e memória. Definindo o fator de ramificação b como o número de nós gerados a partir de cada nó expandido e considerando que a solução com a menor profundidade tem uma profundidade d então a complexidade do algoritmo é exponencial e proporcional a $O(b^d)$. Essa complexidade torna este método de busca apropriado apenas para problemas pequenos, onde o fator de ramificação e a profundidade da solução são bastante restritos.

Como foi visto anteriormente, os algoritmos de busca diferem uns dos outros apenas pela ordem em que os nós gerados são incluídos na lista de nós a serem expandidos. Como este método expande todos os nós de profundidade d antes de expandir os nós com profundidade $d+1$, os novos nós gerados são incluídos no fim da lista e o algoritmo geral para busca em largura é dado por:

9)	função BuscaEmLargura(problema) retorna uma solução ou falha
10)	retorna BuscaGeral(problema, FinalDaLista)

2) Busca uniforme

Este método de busca diferencia-se da busca em largura pelo fato de que aqui não são expandidos primeiro os nós com menor profundidade, mas sim aqueles com menor custo. Para isso, este método gerencia a lista de nós a serem expandidos ordenando-a em ordem crescente de custo dos caminhos entre o nó raiz e o nó a ser expandido.

Com relação aos critérios de avaliação, este método, assim como a busca em largura, tem complexidade exponencial proporcional a $O(b^d)$ e é completo, ou seja, garante que uma solução é encontrada, se alguma existir. Com relação a otimalidade, este método encontra a solução ótima desde que a função custo $g(n)$ dos nós obedeça à seguinte propriedade: $g(\text{sucessor}(n)) \geq g(n)$. Esta propriedade garante a otimalidade da solução encontrada, pois se houvesse uma solução com menor custo ela teria sido explorada anteriormente, já que a fila de nós a serem expandidos é disposta em ordem crescente de custo.

3) Busca em profundidade

Com o método de busca em profundidade expande-se sempre os nós com maior profundidade na árvore. Os nós mais profundos são expandidos até que a solução seja encontrada ou até que a expansão dos nós não resulte na geração de novos nós e, somente neste caso, o método retorna e expande nós com profundidades menores.

As principais vantagens deste método são em relação aos critérios de complexidade temporal e espacial.

Com um fator de ramificação b e uma profundidade máxima da árvore m , o gasto com armazenamento em memória tem complexidade proporcional a $O(bm)$, já que é necessário armazenar apenas o caminho entre o nó raiz e a folha da árvore, juntamente com os nós irmãos ainda não explorados para cada nó do caminho.

Com relação ao tempo de processamento, este algoritmo tem complexidade proporcional a $O(b^m)$, mas em problemas com diversas soluções ele pode encontrar uma solução mais rapidamente que a busca em largura, já que é grande a probabilidade de se encontrar uma solução explorando apenas uma pequena parte do espaço de estado, enquanto que a busca a largura explora todo o espaço com profundidade menor à profundidade da solução do problema.

Apesar de ser geralmente mais rápido e requisitar quantidades relativamente pequenas de espaço em memória, a busca em profundidade tem suas desvantagens em relação à busca em largura. Se o problema tem uma árvore de busca com profundidade grande a busca em profundidade pode retornar soluções com custos maiores do que as encontradas pela busca em largura, ou seja, a busca em profundidade não é ótima. Além disso, se a árvore de busca tiver profundidade infinita e a busca em profundidade tomar um caminho errado ela pode continuar expandindo nós e buscando infinitamente, sem encontrar nenhuma solução, mesmo quando existe alguma, e, portanto, ela também não é completa.

Com relação à implementação a busca em profundidade gerencia a lista de nós a serem expandidos colocando os novos nós gerados sempre no começo da lista. Assim, ela garante que os nós com maior profundidade sejam expandidos primeiro. O código do algoritmo para a busca em profundidade é, então:

11)	função BuscaEmProfundidade(problema) retorna uma solução ou falha
12)	retorna BuscaGeral(problema, InicioDaLista)

4) Busca com profundidade limitada

Como foi visto acima, a busca em profundidade não é apropriada para a solução de problemas com árvores de busca de profundidade muito grande ou infinita, pois nestes casos, a busca pode encontrar soluções não ótimas ou até mesmo se “perder” na árvore e não encontrar solução alguma. Essa deficiência pode ser corrigida modificando o

algoritmo de forma a limitar a busca a uma profundidade máxima. Se a solução para o problema está dentro da profundidade máxima escolhida então a busca com profundidade limitada garante que a solução é encontrada (é completa), apesar de não garantir que é a melhor solução (não é ótima). Contudo, se a profundidade máxima escolhida não for suficiente então a busca não encontra nem mesmo uma solução.

Este problema pode ser resolvido, no entanto, através de uma escolha iterativa da profundidade máxima. O algoritmo que implementa a escolha iterativa é chamado de busca com profundidade limitada iterativa e funciona efetuando buscas para todas as profundidades máximas até que a solução seja encontrada. Assim, esta estratégia efetua uma busca com profundidade máxima 0, depois profundidade máxima 1, profundidade máxima 2, etc. até que a solução seja encontrada.

Este método combina, assim, as vantagens das buscas em profundidade e largura. Seus gastos com tempo de processamento e memória são equivalentes aos da busca em profundidade, já que, em cada uma das buscas com profundidade limitada, os nós são expandidos na mesma ordem que em uma busca em profundidade. Além disso, o método garante a completeza e a otimalidade, já que ao efetuar uma busca com profundidade d , ele garante que todos os caminhos com profundidade menor que d já foram explorados nas buscas anteriores.

Ao combinar as vantagens das buscas em profundidade e largura este método torna-se a principal opção para a resolução de problemas com um espaço de estado vasto e profundidade de solução desconhecida.

3.5- Algoritmos de busca informados

Na seção anterior foram descritos os principais métodos de busca não-informada utilizados no modelo de busca em espaço de estado. Estes métodos têm como única informação disponível a capacidade de comparar um estado qualquer a um ou mais estados finais e, para encontrar uma solução, devem realizar uma busca “cega” no espaço de estado. Ao resolver um problema, no entanto, geralmente dispõe-se de um número maior de informações que podem ser utilizadas para tornar a busca mais rápida e eficiente. Métodos que utilizam estas informações adicionais são chamados de métodos de busca informados.

Dado o algoritmo de busca geral descrito na seção anterior, a única maneira de incorporar informações adicionais e melhorar a eficiência da busca é ordenar a lista de nós a serem expandidos de forma a expandir primeiro os nós mais promissores. O método que incorpora esta técnica é chamado de *best-first* e seu algoritmo pode ser descrito como:

13)	função BestFirst(problema, FunçãoDeAvaliação) retorna uma solução
14)	FunçãoDeOrdenaçãoDaLista = função que ordena a lista de nós de acordo com a FunçãoDeAvaliação
15)	retorna BuscaGeral(problema, FunçãoDeOrdenaçãoDaLista)

No algoritmo acima a *FunçãoDeAvaliação* é utilizada para avaliar o quanto um nó é promissor, ou seja, o quanto sua expansão pode contribuir para encontrar a solução mais eficiente do problema.

Com o objetivo de encontrar soluções com o menor custo, o algoritmo *best-first* geralmente incorpora em sua *FunçãoDeAvaliação* uma medida estimada do custo da solução e tenta minimizá-la. Além disso, para direcionar a busca em direção às soluções, a medida estimada do custo dada pela *FunçãoDeAvaliação* geralmente é uma medida do custo do caminho entre determinado estado até o estado final mais próximo.

Os dois métodos de busca descritos abaixo utilizam o algoritmo *best-first* com diferentes funções de avaliação, o primeiro tentando expandir os nós mais próximos do estado final, e o segundo tentando incluir, além disso, informações sobre o custo do caminho até o momento quando os nós são expandidos.

1) *Greedy search*

Este método ordena a lista de nós a serem expandidos de forma a expandir primeiro os nós mais próximos do nó objetivo. Para avaliar o quão próximo um nó n se aproxima do nó objetivo o método utiliza uma função, conhecida como função heurística $h(n)$, que efetua uma estimativa desta proximidade utilizando informações específicas relativas ao problema em questão.

Dada a função heurística:

$h(n)$ = menor custo estimado para o caminho entre um nó n e o nó objetivo

então método *greedy search* pode ser descrito como:

16)	função GreedySearch(problema) retorna uma solução ou falha
17)	retorna BestFirst(problema, h)

Ao expandir sempre o nó cuja estimativa do custo do caminho até o estado final tenha o menor custo, o método *greedy search* comporta-se de maneira semelhante à busca em profundidade e sofre das mesmas desvantagens desta última: não é ótimo e nem completo. Com relação a requisitos de tempo de memória, o método tem, no pior caso, complexidade proporcional a $O(b^m)$, onde m é a profundidade máxima da árvore de busca. É importante observar, no entanto, que estas complexidades podem ser bastante reduzidas com a utilização de funções heurísticas adequadas para cada problema.

O nome *greedy search* (algo como “busca gananciosa”) é justificado pelo fato do método procurar a cada momento escolher o nó com menor custo estimado até o objetivo, sem se preocupar se o caminho escolhido é realmente o melhor para a busca como um todo.

2) Algoritmo A*

O método *greedy search* descrito acima é bastante eficiente pois busca sempre minimizar o custo do caminho entre o estado atual e o estado final utilizando a função heurística $h(n)$. Não é, no entanto, completo e nem ótimo. Já o algoritmo de busca com custo uniforme - que utiliza a função $g(n)$ para avaliar o custo do caminho entre o nó raiz e o nó atual - é completo e uniforme, apesar de bastante ineficiente. O algoritmo A* incorpora a vantagens destes dois métodos utilizando como função de avaliação a soma entre o custo calculado do caminho do nó raiz ao nó atual e a estimativa do custo entre o nó atual e o nó objetivo. A função de avaliação para o A* é dada, portanto, por:

$$f(n) = g(n) + h(n)$$

e, utilizando o algoritmo *best-first*:

18)	função AlgoritmoA*(problema) retorna uma solução ou falha
19)	retorna BestFirst(problema, $g + h$)

Uma característica da função $f(n)$ é imprescindível para o funcionamento adequado do algoritmo A*. A função $f(n)$ nunca deve superestimar o custo real da melhor solução que passa pelo nó n . Este fato é garantido desde que a função heurística $h(n)$ não superestime o custo entre o nó n e o nó objetivo. A função heurística $h(n)$ que obedeça a esta restrição é chamada *heurística admissível*.

Ao combinar as características dos métodos *greedy search* e busca com custo uniforme o algoritmo A* pode tornar-se razoavelmente eficiente em relação ao tempo gasto na busca, desde que a função heurística $h(n)$ seja inteligentemente construída. Além disso, se a função heurística utilizada for *admissível*, é possível provar que o algoritmo A* é completo e ótimo (ver referência [8]).

O algoritmo A*, no entanto, tem também seu lado negativo. Ele deve armazenar todos os nós gerados na memória e a complexidade exponencial resultante pode tornar seu uso proibitivo em vários casos. Alguns algoritmos, como o IDA* (*iterative deepening A**) e o SMA* (*simplified memory-bounded A**) foram projetados para diminuir as demandas de memória necessárias ao A*.

Finalizando esta seção, a tabela abaixo resume as características de cada algoritmo apresentado de acordo com os critérios de avaliação utilizados.

Critério	Busca em largura	Busca com custo uniforme	Busca em profundidade	Busca com profundidade limitada	Busca com profundidade limitada iterativa	Greedy search	A*
Tempo	b^d	b^d	b^m	b^l	b^d	b^m	b^d
Memória	b^d	b^d	bm	bl	bd	b^m	b^d
Ótimo?	Sim	Sim	Não	Não	Sim	Não	Sim
Completo?	Sim	Sim	Não	Sim, se $l \geq d$	Sim	Não	Sim

onde b é o fator de ramificação, d é a profundidade da solução, m é a profundidade máxima da árvore de busca e l é a profundidade limite.

3.6 - Resumo

Como foi visto no capítulo anterior, o fluxo no pátio é controlado pelas operações de descarga, embarque, etc. e, portanto, o gerenciamento do pátio é realizado pela caracterização e ordenação apropriada dessas operações. Um algoritmo que implemente uma estratégia de gerenciamento tem a tarefa de aplicar as operações no pátio de forma a, a partir de uma situação inicial, atingir um ponto onde as filas de trens e navios dadas tenham sido atendidas adequadamente. Este problema de gerenciar os recursos do pátio aplicando os operadores e levando-o de uma situação inicial a uma situação final onde as filas de trens e navios sejam atendidas pode ser claramente modelado como um problema de busca em espaço de estados e, portanto, a aplicação de algoritmos de busca ao problema parece apropriada.

Neste capítulo foram descritos o modelo de busca em espaço de estado e as características principais dos algoritmos de busca mais comumente utilizados. No capítulo seguinte será apresentado o algoritmo para a programação das atividades no pátio de minério. O núcleo deste algoritmo é representado por uma busca em espaço de estado que reúne algumas das características dos diversos métodos de busca apresentados neste capítulo.

4 - Algoritmo de programação de atividades em pátio de minério

4.1 – Introdução

No capítulo anterior foram apresentados os dois principais requisitos para a modelagem de um problema utilizando o modelo de busca em espaço de estado: a) a capacidade de representar adequadamente o problema através da modelagem dos estados, operadores, critérios de parada e funções de custo e b) a utilização de algoritmos de busca eficientes, que utilizem de maneira eficiente o conhecimento disponível a respeito do problema.

Neste capítulo será mostrado como estas duas etapas foram atingidas na resolução do problema de gerenciamento do fluxo de minério no pátio através do modelo de busca em espaço de estado. As seções 4.2, 4.3 e 4.4 mostram como as informações relevantes para a representação do problema em um determinado instante foram descritas utilizando, respectivamente, estados, operadores e funções de avaliação. A seção 4.5 descreve uma função de avaliação auxiliar, a função de avaliação dos operadores, utilizada para aumentar a eficiência do algoritmo, a seção 4.6 descreve o algoritmo de busca desenvolvido para a resolução do problema e a seção 4.7 apresenta a análise de complexidade do algoritmo.

4.2 – Definição do estado

Em um determinado instante de tempo, o número de elementos que compõem o pátio de minério e as características e detalhes de cada um desses elementos torna impossível representá-los todos em um modelo, como acontece em qualquer problema com um mínimo de complexidade. É necessário, portanto, abstrair essas características e detalhes e modelar apenas os elementos estritamente relevantes para a representação e solução do problema. De maneira geral, pode-se dizer que os elementos relevantes são aqueles que tornam possível representar adequadamente as transformações ocorridas no estado do problema quando os operadores são aplicados. Além disso, os elementos escolhidos para representar o problema devem permitir a avaliação adequada dos estados baseada nos critérios de avaliação dados.

São listados abaixo, de forma bastante sucinta, os principais elementos que compõem os estados para o problema de gerenciamento de fluxo no pátio de minérios (para uma descrição dos elementos físicos do pátio correspondentes aos elementos presentes no estado do pátio consultar a seção 2.2):

- a) **áreas:** cada uma das seis áreas do pátio de minério que contêm as áreas de empilhamento onde as pilhas são formadas;
- b) **áreas de empilhamento:** são as áreas onde as pilhas são formadas. Cada área de empilhamento é caracterizada por seu código, suas balizas inicial e final, a capacidade de armazenamento por baliza, a natureza-tipo do produto armazenado e pelas pilhas armazenadas dentro de seus limites;
- c) **pilhas:** as pilhas são um dos principais elementos na descrição do estado do pátio e sua modelagem conta com um número bastante grande de detalhes. Alguns dos principais elementos utilizados na descrição das pilhas são:
- i. código: utilizado para identificar univocamente a pilha;
 - ii. balizas inicial e final identificando o espaço ocupado pela pilha dentro da área de empilhamento;
 - iii. situação: indicador que representa a situação da pilha em um determinado instante. O termo “situação” é utilizado para indicar se a pilha está sendo formada pelas descargas, se já está formada e pronta para o embarque, se já está em processo de recuperação ou se está interditada para embarques e descargas (casos onde a qualidade da pilha está abaixo da requerida pelos clientes);
 - iv. tempo de residência: indica há quantos dias a pilha permanece armazenada no pátio desde sua formação pelas descargas;
 - v. qualidade medida: cada pilha tem uma qualidade dada por diversos critérios. A maneira como as qualidades são armazenadas no estado será vista com maiores detalhes adiante, nesta mesma seção;
 - vi. quantidades atual e máxima permitida de minério;
 - vii. produtos armazenados: geralmente o produto armazenado na pilha é resultante de uma composição de diversos outros produtos misturados em proporções definidas. Assim, é necessário armazenar não só o produto final resultante da composição, mas também a lista com as quantidades de todos os produtos componentes, assim como as datas de empilhamento de cada um dos produtos. Esta última informação é importante já que, quando a pilha é formada por diversas descargas realizadas em dias diferentes, seu tempo de residência é calculado através da média entre cada quantidade descarregada ponderada pelo tempo de residência de cada uma destas quantidades;
- d) **máquinas:** as principais informações armazenadas no estado para cada máquina empilhadeira ou recuperadora presente no pátio são:

- i. tipo da máquina: indica se a máquina é uma empilhadeira, uma recuperadora, ou se pode realizar as duas funções;
 - ii. capacidade de empilhamento/recuperação da máquina;
 - iii. velocidade de deslocamento: indica as velocidades de deslocamento da máquina no pátio. Quando a máquina está apenas deslocando-se de uma pilha a outra, sua velocidade é maior do que quando está efetivamente empilhando ou recuperando minério de uma pilha;
 - iv. localização: indica a localização da máquina no pátio. É dada pela baliza da área onde a máquina está trabalhando;
 - v. programa de manutenções: cada máquina tem um programa de manutenções que indica as datas em que a máquina deverá estar em manutenção, assim como a duração de cada manutenção;
 - vi. operações: se uma ou mais operações estiverem sendo realizados no pátio, em um determinado instante de tempo, o estado armazena as informações relativas a essas operações atribuindo-as às máquinas correspondentes. As características das informações armazenadas dependem do tipo de operação que a máquina está realizando. Assim, se a máquina estiver efetuando uma descarga são armazenadas informações como: a pilha onde o minério está sendo armazenado, o lote de vagões que está sendo descarregado, a quantidade de minério descarregada, etc. Já para uma operação de embarque é necessário, por exemplo, armazenar a carga e o navio que estão sendo embarcados. Cada operação tem, além disso, uma data hora de início e uma data hora de término. Na seção 4.3 será visto que as operações atribuídas às máquinas estão diretamente ligadas aos operadores aplicados a cada estado, ou seja, a transição de um estado a outro é feita através da alocação das máquinas para as diversas operações realizadas no pátio;
- e) **filas de navios:** a fila de navios armazena todos os navios que ainda não foram atendidos pelo porto. Assim, são armazenados os navios que ainda não chegaram ao porto, mas que têm data de chegada prevista dentro do horizonte de tempo do problema; todos os navios que já chegaram ao porto, mas ainda não estão sendo embarcados; e todos os navios que estão sendo embarcados em um determinado instante de tempo. Os navios que já foram embarcados não têm mais relevância para o problema e, portanto, não são armazenados no estado do pátio. Cada navio da fila de navios tem uma série de características que devem ser representadas no estado do pátio, dentre as quais as principais são:
- i. nome e código: utilizados para identificar univocamente o navio;
 - ii. píer no qual o navio será (ou já está) atracado;

- iii. datas previstas e reais de atracação e desatracação: as datas reais podem diferir das datas previstas quando há atrasos no embarque dos navios. Como foi visto na seção 2.4 um dos objetivos de decisão para o problema é minimizar estes atrasos e, portanto, minimizar a diferença entre as datas de atracação e desatracação previstas e reais;
 - iv. cargas: cada navio é composto de uma ou mais cargas que devem ser completamente atendidas antes que o navio desatracue do porto. Cada uma das cargas dos navios é representada no estado do pátio por diversas características, dentre as quais as mais importantes são:
 - i. cliente: indica o cliente para o qual a carga está destinada. As diversas cargas em um mesmo navio podem ser destinadas a clientes diferentes;
 - ii. produto: indica o produto que compõe a carga;
 - iii. quantidade total da carga;
 - iv. quantidade atual da carga: para os navios que já estão sendo embarcados é necessário indicar quanto da carga já foi embarcada até o momento;
- f) **fila de trens:** a fila de trens consiste de todos os trens que ainda não foram descarregados no pátio do porto. Pertencem à fila, portanto, todos os trens que ainda não chegaram ao pátio, mas cujo instante previsto de chegada está dentro do horizonte de tempo do problema; todos os trens que já chegaram ao pátio, mas que ainda não estão sendo descarregados e todos os trens que estão sendo descarregados no instante de tempo atual. Os trens que já foram descarregados não são mais relevantes na resolução do problema e, portanto, descartados. Cada trem da fila de trens contribui com as seguintes informações armazenadas no estado do pátio:
- i. código do trem: utilizado para identificar o trem;
 - ii. instante previsto de chegada: indica a hora de chegada no pátio prevista para o trem. É estimado baseando-se no número de trens por dia que saem da mina e no ciclo da ferrovia;
 - iii. lotes de vagões: cada trem é composto por um conjunto de lotes de vagões. Um lote de vagões é caracterizado por um determinado número de vagões de um mesmo produto. As informações relativas aos lotes de vagões relevantes para a representação do problema são:
 - i. produto: indica qual produto é transportado nos vagões que compõem o lote;
 - ii. número de vagões que compõem o lote;

- iii. virador de vagões: indica qual dos dois viradores de vagões é utilizado para descarregar o lote;
 - iv. carga associada: em alguns casos já se sabe de antemão para qual carga está associado um determinado lote de vagões. Isso acontece geralmente quando a carga é composta por produtos especiais, produzidos sob encomenda para determinados clientes;
- g) **pulmões:** informações relevantes na representação dos pulmões são sua capacidade máxima, a quantidade de minério e os produtos armazenados em um determinado instante de tempo;

Os elementos descritos acima na representação do estado têm relação direta com elementos físicos presentes no pátio. Além destes elementos, outras informações mais “abstratas” são também relevantes e, portanto, armazenadas no estado. Dentre estas informações, algumas das mais importantes são:

- h) **composições dos produtos:** na descrição do produto presente na pilha foi visto que um produto geralmente é formado pela composição de diversos produtos misturados em proporções bem definidas. Para um mesmo produto existem, de fato, diversas composições possíveis, ou seja, cada produto pode ser formado a partir de diferentes “receitas”, onde cada “receita” indica quais “ingredientes” (produtos) e quais as quantidades necessárias de cada ingrediente. Assim, é necessário armazenar no estado do pátio estas diferentes composições possíveis para cada produto. É preciso destacar que este conceito de composição é diferente daquele relativo aos produtos armazenados nas pilhas, nos lotes de vagões ou nas cargas dos navios. Aqui são descritas todas as possíveis “receitas” para um determinado produto enquanto que a composição de uma pilha, por exemplo, indica a “receita” efetivamente utilizada na formação do produto armazenado;
- i) **qualidades medida e desejada:** na apresentação dos elementos da pilha presentes no estado do pátio foi visto que a pilha tem uma qualidade medida. Além disso, cada cliente tem exigências diferentes quanto às qualidades de seus produtos, ou seja, cada cliente tem uma qualidade desejada para os diferentes produtos comprados. Cabe aqui esclarecer a diferença entre as qualidades medida e desejada e mostrar como estas informações são armazenadas no estado do pátio. A qualidade de um determinado produto é dada por um conjunto de grandezas físicas e químicas que avaliam as características do minério. Cada cliente especifica, para os produtos de seu interesse, determinados limites para cada uma dessas grandezas. Assim, a qualidade desejada de um produto para um determinado cliente consiste do conjunto de grandezas físicas e químicas limitadas por valores máximos e mínimos definidos pelo cliente. Já a quantidade medida do minério armazenado em uma pilha ou na carga de um navio representa o conjunto de medidas efetivamente realizadas para cada grandeza. No estado do pátio são armazenadas, portanto, além das qualidades efetivamente medidas de cada pilha ou do minério embarcado para os navios, as qualidades desejadas para cada carga e para cada pilha, caso ela já tenha sido reservada para um

determinado cliente. A qualidade medida de uma pilha está dentro da qualidade desejada para o cliente desde que suas grandezas físicas e químicas estejam dentro dos limites estabelecidos pelo cliente;

- j) **meta-pilhas:** de maneira geral são necessárias duas ou mais pilhas para formar uma carga completa para um navio. O conceito de meta-pilha é utilizado para representar o conjunto de pilhas necessárias para formar uma determinada carga. No estado do pátio é armazenada, portanto, juntamente com cada carga, uma meta-pilha representando as pilhas já reservadas para o embarque. O conceito de meta-pilha será explicado com maiores detalhes na descrição dos operadores aplicados aos estados do pátio;
- k) **instante atual:** o estado do pátio armazena as informações relevantes à representação do problema em um determinado instante de tempo. É necessário, portanto, armazenar a informação do instante de tempo ao qual o estado está associado.

4.3 – Definição e caracterização dos operadores

Como foi visto no capítulo 2 o objetivo da estratégia de gerenciamento do fluxo de minério no pátio é caracterizar e ordenar as diversas operações que se realizam no pátio de forma a atender a uma série de objetivos de decisão, respeitando as restrições impostas ao problema. Se o objetivo é caracterizar e ordenar as operações, é natural, portanto, que os operadores aplicados aos estados no modelo de busca sejam representações das diversas operações realizadas no pátio. Assim, os operadores no modelo de busca são definidos a partir das operações de descarga, embarque, repeneiramento, injeção de fino, empilhamento do granulado e recirculação.

As características do problema de gerenciamento do pátio permitem, em um determinado instante de tempo, a criação e aplicação ao estado de praticamente infinitos operadores. Um exemplo pode tornar esta afirmação mais clara: suponha que, em uma descarga de 1000 toneladas de um lote de vagões existam duas pilhas disponíveis para receber o minério. Seria possível descarregar as 1000 toneladas somente na primeira pilha, ou somente na segunda pilha, ou ainda descarregar 500 toneladas na primeira pilha e 500 toneladas na segunda pilha, ou descarregar 200 toneladas na primeira pilha e 800 na segunda e assim por diante. Enfim, o número de combinações entre as descargas nas duas pilhas seria praticamente infinito. Assim, para o problema dado não é viável aplicar todas as possíveis operações a um determinado estado. É necessário limitar a criação dos operadores de forma a gerar apenas aqueles mais promissores na solução do problema. A avaliação de quão promissor um operador se mostra para a solução do problema deve ser baseada em conhecimentos específicos a respeito do comportamento do pátio a partir da aplicação dos operadores e deve, assim, ser respaldada pelo conhecimento dos tomadores de decisões especialistas no gerenciamento do pátio. Os operadores foram construídos, portanto, tomando como base um conjunto de regras utilizadas pelos especialistas na caracterização das operações no pátio.

A formulação deste conjunto de regras exige trabalho árduo já que é bastante grande o número de detalhes envolvidos na criação de cada operação. Além disso, várias das regras utilizadas nem sempre são óbvias nem mesmo para os especialistas, pois estão baseadas na intuição adquirida após anos de experiência no gerenciamento do pátio e são dificilmente descritas verbalmente.

Após várias entrevistas com os especialistas e uma série de testes e experiências chegou-se a um conjunto de regras para a construção de cada operador. São descritas a seguir as principais regras para cada um dos operadores. A descrição das regras omitirá vários detalhes cuja inclusão a tornaria desnecessariamente longa.

a) Descarga

Um operador de descarga pode ser gerado sempre que existir pelo menos um lote de vagões que já chegou ao pátio, mas que ainda não foi descarregado. Para cada um destes lotes deve-se aplicar as seguintes regras na formação dos operadores de descarga:

- a) se o lote de vagões carrega um produto que deve ser repeneirado antes de ser comercializado, então a descarga deve ser feita na área de repeneiramento. Para isso:
 - i. verifica-se se a empilhadeira que atende a área de repeneiramento está disponível. Em caso negativo não é possível descarregar o lote e o operador de descarga não é aplicado;
 - ii. se a empilhadeira estiver disponível então deve-se verificar dentre as pilhas já existentes na área de repeneiramento quais podem receber o minério a ser descarregado. Estas pilhas disponíveis para descarga devem armazenar o mesmo produto a ser descarregado, devem estar em processo de formação e devem ter capacidade suficiente para receber a quantidade de minério a ser descarregada. Para cada uma dessas pilhas disponíveis é gerado um operador de descarga;
 - iii. se não houver nenhuma pilha já existente disponível para descarga, então uma nova pilha deve ser criada. O tamanho da nova pilha é dado por um tamanho padrão previamente definido. É criado, assim, um operador de descarga para cada espaço desocupado na área de repeneiramento onde é possível criar uma nova pilha de tamanho padrão. Se não houver nenhum espaço para a criação de uma pilha de tamanho padrão então este tamanho é decrementado de um valor previamente definido repetidas vezes até que seja possível inserir a nova pilha na área. Se, após os repetidos decrementos, o tamanho da pilha a ser criada atingir um limite mínimo definido, então não foi possível gerar nenhum operador de descarga e o lote de vagões deve continuar esperando por outra oportunidade;
- b) se o produto não precisa ser repeneirado, então verifica-se se o lote de vagões já está associado a alguma carga;

- i. se o lote já estiver associado a uma carga então deve-se verificar se já existe no pátio uma meta-pilha relativa àquela carga. Uma meta-pilha, como foi visto anteriormente, representa o conjunto de pilhas presentes no pátio já associadas ou reservadas para uma determinada carga. Caso exista uma meta-pilha relativa à carga então deve-se descarregar o lote em uma das pilhas que formam a meta-pilha. Para escolher a pilha que será utilizada deve-se verificar, inicialmente, quais pilhas estão disponíveis com relação à disponibilidade das máquinas, ou seja, quais pilhas estão armazenadas em áreas atendidas por empilhadeiras disponíveis no momento. Deve-se, então, escolher, dentre as pilhas disponíveis, aquela armazenada na área que corresponde à maior proporção de massa da meta-pilha. Assim, por exemplo, se a meta-pilha for composta de pilhas distribuídas entre as áreas A, B e F onde as pilhas da área A correspondem a 50% da massa total da meta-pilha e as pilhas das áreas B e F correspondem, cada uma, a 25% da massa total da meta-pilha então deve-se escolher uma pilha da área A. Isso é justificado pelo fato de que, ao descarregar em uma pilha presente na área que corresponde à maior proporção de massa da meta-pilha, a probabilidade de que seja possível efetuar descargas simultâneas é aumentada. Caso haja mais de uma pilha na área escolhida deve-se utilizar na criação do operador de descarga a pilha que está mais próxima da empilhadeira a ser utilizada;
- ii. se o lote já estiver associado a uma carga mas não houver ainda uma meta-pilha então deve-se criar uma e descarregar em uma das pilhas, escolhida da mesma forma como feito no item anterior. A criação de uma meta-pilha tem como principal objetivo tornar possível a futura recuperação simultânea de suas pilhas componentes. Uma maneira de garantir isso é distribuir as pilhas nas áreas de forma que uma máquina seja responsável por recuperar 50% da carga total (ou da massa da meta-pilha) enquanto que os outros 50% da carga são distribuídos pelas outras duas recuperadoras. Assim todo o embarque pode ser feito simultaneamente, com a recuperadora responsável por 50% da carga trabalhando ao mesmo tempo que a segunda ou terceira recuperadora. Para formar a meta-pilha segundo a descrição acima são necessários os seguintes passos:
 1. escolhe-se dentre as três recuperadoras aquela que será responsável por recuperar 50% da carga total;
 2. verifica-se se existem pilhas já existentes no pátio suficientes para atender a quantidade da carga atribuída à primeira recuperadora. As pilhas são escolhidas dando prioridade àquelas que já estão em processo de recuperação, seguidas pelas pilhas já formadas e, em último caso, por pilhas ainda em processo de formação. Se houver mais de uma pilha em uma mesma situação então a prioridade é dada às pilhas com maior tempo de residência e melhor qualidade. Em caso de novo empate, a pilha escolhida é aquela com menor massa, ou seja, aquela que, quando recuperada, liberará espaço

mais rapidamente. Se as pilhas já existentes não forem suficientes então é necessário criar uma ou mais pilhas novas. A criação de pilhas é feita preenchendo-se os espaços disponíveis na área, do menor para o maior, até que a massa atribuída à recuperadora seja atingida. O tamanho de cada pilha criada é dado pelo tamanho do espaço disponível na área ou pelo tamanho padrão da pilha, caso este último seja menor que o primeiro;

3. se foi possível formar a massa necessária para a primeira recuperadora então uma segunda recuperadora é escolhida, dentre as duas restantes, e sua parte da meta-pilha é formada de maneira semelhante à da primeira recuperadora. É necessário observar que no caso da primeira recuperadora eram necessárias pilhas que somavam exatamente 50% da carga total. Para a segunda recuperadora deve-se escolher o máximo possível de pilhas desde que o total não ultrapasse os 50% restantes da carga total;
 4. se foi possível encontrar pilhas para a primeira e para a segunda recuperadoras então o restante da carga é formada para a terceira recuperadora. Esta última é responsável, portanto, por recuperar o que não foi possível utilizando apenas as duas primeiras recuperadoras. Deve-se notar que, em vários casos, são necessárias apenas duas recuperadoras para o embarque simultâneo, sendo que cada uma fica responsável por 50% da carga. A terceira recuperadora não é, portanto, obrigatória para a realização efetiva de um embarque simultâneo.
 5. Os passos 1 a 4 acima são repetidos escolhendo, no entanto, recuperadoras diferentes a cada passo. São possíveis, assim, seis combinações de recuperadoras e, para cada combinação onde foi possível encontrar as pilhas necessárias a cada recuperadora, é gerado um operador de descarga. O lote é descarregado na pilha da meta-pilha escolhida como foi visto anteriormente na descarga em meta-pilha;
- c) se o lote de vagões não está associado a uma carga então ele é formado por um produto genérico. Este produto, chamado de *coringa*, é utilizado em embarques onde os clientes não exigem um produto personalizado. Assim, na descarga deste produto procura-se por meta-pilhas já criadas para clientes de produto *coringa*. Caso exista alguma destas meta-pilhas então a descarga é feita de maneira semelhante à descarga em meta-pilha descrita anteriormente. Se não houver nenhuma meta-pilha já existente, então cria-se uma nova obedecendo as mesmas regras descritas anteriormente para a criação de meta-pilhas. A carga associada a esta nova meta-pilha é a primeira carga de produto *coringa* na fila de navios que ainda não tem uma meta-pilha correspondente. Caso não seja possível descarregar em uma meta-pilha existente ou criar uma nova então nenhum operador de descarga é gerado e o lote fica aguardando uma nova oportunidade.

b) Embarque

Os operadores de embarque podem ser criados sempre que exista no porto algum navio no píer 1 e/ou píer 2 com cargas ainda não completamente embarcadas. As cargas do píer 1 são tratadas sempre primeiro. Isso se deve ao fato de que não é possível efetuar embarques simultâneos no píer 2, pois a correia transportadora que liga o pátio ao carregador de navios 2 tem capacidade de 8000 ton/h e não suporta duas máquinas recuperando ao mesmo tempo. Ao alocar uma recuperadora para um embarque no píer 2 perde-se flexibilidade na geração de embarques simultâneos no píer 1 e, portanto, as cargas do píer 2 são sempre tratadas por último. Para cada carga dos navios já atracados as seguintes regras devem ser seguidas para gerar os operadores:

- a) se existe uma meta-pilha já associada à carga então deve-se criar operadores de embarque utilizando-se as pilhas da meta-pilha. Para escolher qual pilha será embarcada deve-se verificar quais dentre elas estão disponíveis a partir da disponibilidade das recuperadoras, ou seja, quais pilhas estão armazenadas em áreas atendidas por recuperadoras disponíveis no momento. Para cada uma das recuperadoras disponíveis é gerado um operador de embarque. Isso aumenta bastante a probabilidade de realização de embarques simultâneos já que a ordem com que as recuperadoras são utilizadas influi diretamente na simultaneidade do embarque e a geração de um operador para cada recuperadora disponível torna a busca na árvore de estados mais flexível para a escolha desta ordem. Dentre as pilhas disponíveis por recuperadora têm prioridades maiores aquelas que estão em processo de recuperação, seguidas pelas pilhas já formadas e, em último caso, pelas pilhas ainda em formação. Se existir mais de uma pilha na mesma situação então a prioridade é dada àquela com maior tempo de residência e melhor qualidade. Em caso de novo empate é escolhida a pilha cuja distância até a máquina é a menor.
- b) se não existe uma meta-pilha associada ao embarque então deve-se inicialmente formar esta meta-pilha e, então, criar um operador de embarque para cada recuperadora disponível como foi descrito no item acima. A formação de meta-pilhas no embarque segue as mesmas regras da formação de meta-pilhas na descarga, descritas anteriormente. A única exceção é que, no caso do embarque, não são geradas novas pilhas, mas utilizadas apenas aquelas já existentes nas áreas do pátio.
- c) se não for possível gerar uma meta-pilha com as pilhas presentes no pátio então gera-se um operador de embarque para cada uma das pilhas disponíveis. Neste caso, as pilhas disponíveis são aquelas que estão armazenadas em áreas atendidas por recuperadoras disponíveis, que têm qualidade e tempo de residência compatíveis com a qualidade exigida pelo cliente da carga e que ainda não estão reservadas para nenhum outro embarque. Nestes casos dificilmente é possível gerar embarques com utilização simultânea das recuperadoras. Se for impossível

recuperar mesmo essas pilhas isoladas então nenhum operador de embarque é gerado e o navio continua atracado no píer esperando para completar sua carga;

c) Repeneiramento

A máquina recuperadora que atende a área de repeneiramento, onde estão armazenados os produtos destinados ao repeneiramento, funciona sob esteira e, assim, pode acessar somente a pilha imediatamente a sua frente e a pilha imediatamente atrás. Existem, portanto, em um determinado instante de tempo, apenas dois possíveis operadores de repeneiramento e apenas um operador é efetivamente criado na busca. Para escolher qual das duas pilhas é utilizada na geração do operador de repeneiramento são efetuados os seguintes passos:

- a) inicialmente verifica-se se a máquina recuperadora que atende a área de repeneiramento está disponível. Em caso negativo nenhum operador de repeneiramento pode ser gerado;
- b) se a recuperadora que atende a área de repeneiramento está disponível então deve-se verificar quais, dentre as duas pilhas recuperáveis, estão disponíveis para a recuperação. Para verificar a disponibilidade da pilha deve-se verificar se os produtos fino e granulado resultantes do repeneiramento do minério armazenado são compatíveis com os produtos já armazenados nos pulmões de fino e granulado, respectivamente. Se nenhuma das pilhas tiver produtos resultantes compatíveis com os dos pulmões então o repeneiramento não é possível neste momento, devendo-se aguardar primeiro o esvaziamento dos pulmões. Se apenas uma das pilhas tiver produtos resultantes compatíveis com os dos pulmões então ela é escolhida na criação do operador de repeneiramento. Se as duas pilhas tiverem produtos resultantes compatíveis com os produtos dos pulmões então a pilha escolhida é dada pela direção de deslocamento da máquina, ou seja, a pilha escolhida é aquela que se encontra à frente da máquina, relativamente a sua direção de deslocamento atual. Neste caso, não é preciso manobrar a máquina para mudar sua direção de deslocamento;
- c) a quantidade retirada da pilha escolhida para o repeneiramento é calculada verificando-se a capacidade atual restante nos pulmões de fino e granulado, assim como a quantidade atual de minério na pilha. Por exemplo, mesmo que o pulmão de granulado esteja vazio não é possível criar um operador de repeneiramento se o pulmão de fino estiver cheio, já que não haveria espaço para armazenar o produto fino resultante do repeneiramento.

d) Injeção de fino

- a) na criação dos operadores de injeção de fino a primeira regra é verificar se já existe uma injeção ou um empilhamento de granulado sendo efetuado. Se isso

acontecer não é possível gerar o operador já que existe apenas uma correia transportadora ligando os pulmões de fino e granulado às empilhadeiras no pátio;

- b) se não houver nenhuma operação de injeção de fino ou empilhamento do granulado acontecendo então deve-se verificar se existe alguma descarga ocorrendo e, em caso positivo, se é possível injetar o fino simultaneamente a descarga. A injeção simultânea é possível desde que o produto armazenado no pulmão de fino faça parte da composição do produto sendo descarregado. Neste caso, a quantidade de fino injetada simultaneamente com a descarga é dada pela quantidade máxima permitida para manter a composição da pilha dentro dos limites estabelecidos pela composição do produto sendo descarregado, ou pela quantidade máxima de minério presente no pulmão, caso esta última seja menor que a primeira;
- c) se não for possível injetar o fino simultaneamente a uma descarga então deve-se procurar por pilhas disponíveis para fazer a injeção separada. As pilhas disponíveis para a injeção são aquelas cujas composições contêm o produto armazenado no pulmão de finos e que estão armazenadas em áreas atendidas por empilhadeiras disponíveis no momento. Em algumas composições de produtos o fino é obrigatório e a pilha só estará pronta para o embarque quando a quantidade mínima de fino tiver sido atingida. Em outras composições o fino é opcional e pode ser substituído por outros produtos. Caso exista alguma pilha, dentre as disponíveis encontradas anteriormente, cujo produto tenha composição onde o fino é obrigatório, são gerados operadores de injeção de fino apenas para essas pilhas. Se não existir nenhuma dessas pilhas então é gerado um operador para cada uma das pilhas disponíveis. A quantidade de fino injetada em uma pilha é calculada com base na quantidade máxima de minério presente no pulmão e na composição do produto. No capítulo 2 foi visto que a operação de injeção de fino é efetuada apenas nos intervalos entre as descargas (ou simultaneamente a elas na mesma pilha). Assim, para que a injeção interfira o menos possível na realização das operações de descarga, a quantidade injetada também é limitada pelo intervalo de tempo destinado à injeção. Este intervalo é, no máximo, aquele entre o instante atual e o instante de chegada do próximo lote de trem.

e) Empilhamento do granulado

Os produtos finos resultantes do repeneiramento não são vendidos diretamente como produtos finais, mas apenas como parte da composição de outros produtos. Já os produtos granulados resultantes são produtos destinados à venda e devem, portanto ser distribuídos no pátio da mesma forma que os produtos que são descarregados diretamente dos viradores de vagões. As regras para a criação de um operador de empilhamento do granulado são, portanto, idênticas às utilizadas na construção dos operadores de descarga e não serão repetidas aqui. Pode-se pensar, assim, no empilhamento do granulado como uma descarga cuja origem do minério não seja os viradores de vagões, mas sim o pulmão de granulados. A única diferença nas regras para os operadores de descarga e

empilhamento do granulado deve-se ao fato de que só é possível gerar um operador de empilhamento quando não existe nenhuma injeção de fino ou empilhamento sendo realizado já que, como foi visto anteriormente, apenas uma correia transportadora liga os pulmões às empilhadeiras. A quantidade de granulado empilhado é dada pelo máximo entre a quantidade de minério presente no pulmão e a quantidade que ainda falta para completar a pilha escolhida.

f) Recirculação

Os operadores de recirculação, responsáveis por finalizar saldos de estoque e formar novos produtos (ver seção 2.3), são gerados utilizando as seguintes regras:

- a) inicialmente verifica-se quais pilhas estão disponíveis para a recirculação com relação à disponibilidade de empilhadeiras, ou seja, quais pilhas estão armazenadas em áreas atendidas por empilhadeiras disponíveis no momento. Verifica-se então quais dentre essas pilhas são saldos de outros embarques e não fazem parte de nenhuma meta-pilha. Esta última condição é necessária já que deslocar uma pilha pertencente à uma meta-pilha pode alterar o arranjo feito para tornar possível o embarque simultâneo da carga associada à meta-pilha;
- b) uma operação de recirculação utiliza, ao mesmo tempo, uma empilhadeira e uma recuperadora. Características funcionais das recuperadoras tornam necessário um tempo de *setup*, tipicamente 30 minutos, sempre que elas são utilizadas para uma recirculação. Devido a isso, só é proveitoso efetuar esta operação quando é possível recircular toda a pilha durante o intervalo de tempo disponível. Assim, dentre as pilhas disponíveis encontradas anteriormente são consideradas para a recirculação somente aquelas que poderiam ser recirculadas totalmente no intervalo de tempo entre o instante atual e a chegada do próximo trem ou atracação do próximo navio;
- c) após encontrar as pilhas disponíveis para a recirculação é necessário encontrar um espaço nas áreas para a criação da nova pilha que receberá o minério recirculado. Para encontrar este espaço são consideradas todas as áreas atendidas por recuperadoras disponíveis no momento e para cada área verifica-se, dentro das áreas de empilhamento compatíveis com o produto recirculado, os espaços disponíveis para a criação de novas pilhas. Para cada área é escolhido, então, o menor espaço disponível que comporta a criação de uma pilha para receber o minério. O menor espaço é escolhido já que o objetivo da recirculação é, justamente, minimizar o número de espaços sub-utilizados;
- d) um operador de recirculação é gerado para cada combinação entre pilha-origem disponível e espaço para criar nova pilha.

g) Manutenção

Como foi visto na seção 4.2 cada máquina deve obedecer a um programa de manutenções que especifica as datas e tempo de duração de cada uma das manutenções obrigatórias. Assim, este operador foi desenvolvido para manter a máquina indisponível para as outras operações no período em que ela está em manutenção. A única regra na geração da operação de manutenção é: se o instante de tempo atual corresponde ao instante de tempo especificado para o início de uma manutenção então o operador é gerado.

Na descrição dos operadores acima o objetivo não foi fazer um relato detalhado de todas as regras utilizadas em sua geração, relato este inviável por considerações de espaço e desnecessário para os propósitos do presente trabalho. Ao descrever algumas das regras utilizadas na construção dos operadores, o objetivo principal foi, na verdade, mostrar que essas regras são de caráter bastante experimental e baseadas inteiramente no conhecimento adquirido através de entrevistas com os tomadores de decisão especialistas no gerenciamento do pátio. O conjunto de regras utilizado foi, portanto, uma maneira estruturada de captar verbalmente o conhecimento intuitivo utilizado pelos especialistas no dia-a-dia de gerenciamento do pátio.

É importante observar que a aplicação de um operador a um estado representa somente a alocação da máquina correspondente à operação no novo estado gerado. Assim, por exemplo, ao aplicar a um estado-pai um operador de descarga que utiliza a máquina EMP2, o estado-filho resultante será uma cópia do estado-pai com a informação adicional de que a máquina EMP2 está agora alocada para uma descarga de determinado lote em determinada pilha. O instante de tempo do estado-filho gerado, no entanto, permanece o mesmo do estado-pai e, portanto, é necessário um dispositivo adicional para gerenciar o tempo na árvore de busca. O operador de deslocamento no tempo, descrito abaixo, foi desenvolvido para este propósito.

g) Deslocamento no tempo

Ao aplicar o operador de deslocamento no tempo a um estado o instante de tempo é adiantado para aquele especificado e todas as alterações que ocorreram no estado durante o intervalo transcorrido são atualizadas no estado resultante. Por exemplo, suponha que no instante t_0 um operador de descarga do lote L para a pilha P utilizando a máquina M é aplicado a um estado. O estado resultante será uma cópia do estado original mais a informação de que a máquina M está agora alocada a uma operação de descarga. Ao aplicar um operador de deslocamento no tempo de valor d a este estado, o estado resultante representará o pátio no instante de tempo t_0+d e parte do minério presente originalmente no lote L estará agora armazenado na pilha P. Se o instante de tempo t_0+d corresponde à data hora de término da operação de descarga então todo o minério de L estaria armazenado em P e L seria retirado da lista de lotes de vagões. Além disso, a máquina M estaria agora disponível para outras operações.

O valor do deslocamento no tempo é dado pela ocorrência no sistema do próximo evento, sendo que os eventos considerados são: término da execução de um operador, chegada de trem ao pátio ou chegada de navio ao porto.

Para finalizar a descrição dos operadores, a Figura 4.1 mostra um exemplo de árvore de busca gerada a partir dos estados e operadores:

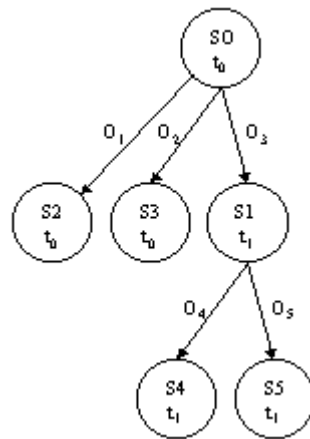


Figura 4.1 – Árvore de busca

Nesta figura, os operadores O_1 , O_2 e O_3 são aplicados ao estado inicial S_0 , no instante de tempo t_0 , resultando nos estados S_2 , S_3 , S_1 , respectivamente. Os operadores O_1 e O_2 representam qualquer um dos operadores descritos anteriormente, com exceção do deslocamento no tempo e, portanto, os estados S_2 e S_3 resultantes mantêm o instante de tempo t_0 original. Já o operador O_3 é um deslocamento no tempo e, portanto, o estado S_1 resultante representa o pátio no instante de tempo t_1 , onde $t_1 = t_0 + d$ e d é o deslocamento no tempo especificado pelo operador.

4.4 – Funções de avaliação de estado

Após a definição dos estados e operadores, o próximo passo na modelagem da busca em espaço de estado é a caracterização das funções de avaliação dos estados.

O principal objetivo na resolução do problema de gerenciamento do fluxo de minério no pátio é, como descrito na seção 2.4, auxiliar o tomador de decisões na tarefa de encontrar soluções que manipulem de maneira adequada os recursos disponíveis no pátio, atendendo a uma série de restrições. Esta utilização adequada dos recursos do pátio é avaliada por uma série de objetivos de decisão que são, por vezes, de difícil definição e, em vários casos, conflitantes entre si. É praticamente impossível, portanto, definir o que seria uma solução ótima para o problema e uma solução obtida pelo algoritmo de busca pode ser considerada satisfatória desde que atenda, da melhor maneira possível, os objetivos de decisão, respeitando as restrições operacionais. Neste caso, o algoritmo de busca desenvolvido não deve ser orientado apenas para procurar, como nos modelos tradicionais, um estado final que represente a solução ótima, mas sim procurar, a cada passo, escolher os operadores de forma a gerenciar adequadamente os recursos. A função de avaliação dos estados, neste caso, deve avaliar se os estados gerados a partir da aplicação dos operadores correspondem a estados em que os recursos do pátio estejam sendo utilizados de forma adequada. Não basta, no entanto, escolher, a cada passo, a

operação mais adequada em termos dos critérios que avaliam a utilização dos recursos do pátio. É necessário também prover o algoritmo com dispositivos que o permitam prever o impacto de uma operação no pátio com relação a eventos futuros. Em outras palavras, o algoritmo deve buscar também a geração de estados promissores, que facilitem a utilização futura adequada dos recursos do pátio.

A função de avaliação desenvolvida para o problema procurou, portanto, reunir as duas características descritas acima: a) a avaliação do estado em relação à utilização adequada dos recursos do pátio no instante atual e b) a avaliação do estado em relação a quanto este favorece ou, colocado de forma mais correta, pode favorecer a utilização adequada dos recursos do pátio em eventos futuros.

A função de avaliação é calculada a partir da agregação de quatro medidas, descritas abaixo. A agregação é realizada através do cálculo da média ponderada entre as medidas e expressa por:

$$avaliaçãoDoEstado = x_1 fr + x_2 bm + x_3 vt + x_4 at$$

onde $fr \in [0,1]$, $bm \in [0,1]$, $vt \in [0,1]$ e $at \in [0,1]$ são os critérios de fragmentação do pátio, balanceamento de massa pelas recuperadoras, vizinhança temporal e atraso nas descargas dos trens, respectivamente, e x_1, x_2, x_3 e x_4 são as ponderações de cada medida com $x_1 + x_2 + x_3 + x_4 = 1$,

Com a escolha apropriada dos valores x_1, x_2, x_3 e x_4 pode-se enfatizar a contribuição de determinadas medidas na avaliação final e, desta forma, informar ao algoritmo de busca quais, dentre os critérios de avaliação, devem ser considerados mais importante na situação atual. As quatro medidas agregadas na função de avaliação do pátio são:

a) **Fragmentação do pátio (*fr*)**

Esta medida é utilizada para avaliar o quão fragmentado ou organizado está o pátio após a aplicação de uma operação. É baseada na idéia de que a existência de poucos espaços de tamanho grande entre as pilhas no pátio é mais interessante que a existência de muitos espaços de tamanho pequeno. A presença de espaços de tamanho grande torna mais fácil a tarefa de encontrar lugares disponíveis para a inclusão de novas pilhas no pátio. Além disso, se o pátio estiver pouco fragmentado as pilhas estarão menos dispersas nas áreas e as operações provavelmente serão realizadas com menores deslocamentos das máquinas e, conseqüentemente, com maior velocidade.

O problema de avaliação da medida de fragmentação do pátio é análogo àquele da avaliação de fragmentação em discos rígidos (ver referências [12] e [13]) como pode ser visto na figura abaixo:

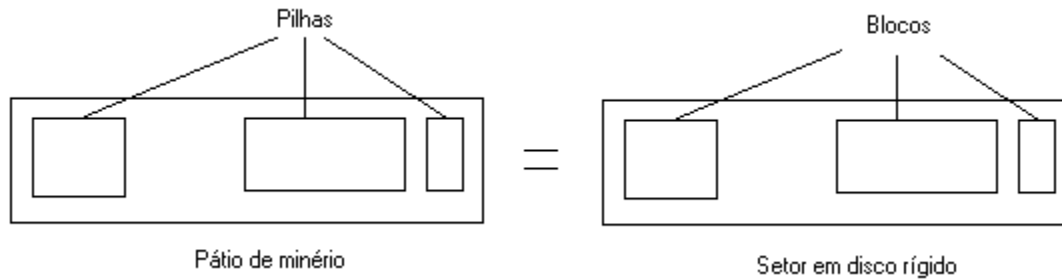


Figura 4.2 – Analogia pátio de minério – setor em disco rígido

Dentre as diversas fórmulas descritas na literatura para a avaliação da fragmentação em discos rígidos optou-se pela descrita abaixo, adaptada para a utilização no pátio:

$$fr = \sum \frac{1}{q_i}$$

onde q_i é o tamanho do i -ésimo espaço não utilizado entre as pilhas. A medida acima deve ser normalizada para se obter valores no intervalo [0 1] antes de ser utilizada na função de avaliação dos estados.

b) Balanceamento de massas pelas recuperadoras (bm)

Em um gerenciamento bem sucedido do pátio deve-se procurar sempre distribuir as pilhas nas áreas de forma a permitir o acesso pelas recuperadoras à mesma proporção do minério total armazenado no pátio. Este cuidado é justificado pelo fato de que esta distribuição aumenta a probabilidade de ocorrência de embarques simultâneos e a flexibilidade dos embarques em caso de indisponibilidade de uma ou mais máquinas (quebra, manutenção ou utilização em outras operações). A equação abaixo foi utilizada para o cálculo da medida de balanceamento de massas pelas recuperadoras:

$$bm = a + (b^2 - c^2)$$

onde a , b e c são as proporções do minério total no pátio para cada uma das três recuperadoras; a representa a maior proporção e c a menor. Se, por exemplo, a quantidade total de minério no pátio for de 100000 toneladas e as recuperadoras tiverem acesso a 50000, 30000 e 20000 toneladas então a , b e c serão 0.5, 0.3 e 0.2, respectivamente.

A idéia por trás desta medida é punir a concentração em apenas uma recuperadora do minério total do pátio ou, em outras palavras, altos valores de a . A parcela $(b^2 - c^2)$ é importante para comparar diferentes situações onde a tem um valor adequado mas o minério está desigualmente distribuído entre as duas recuperadoras restantes. Neste caso, as situações onde b e c têm valores ligeiramente diferentes são mais adequadas do que as

situações onde o minério está mais concentrado na recuperadora relativa a b em detrimento da recuperadora relativa a c .

A tabela 4.1 ilustra o comportamento da medida de balanceamento de massas em função de alguns valores de a , b e c :

	$a = 1$	$a = 2/3$	$a = 1/2$	$a = 1/3$
$b = 0 ; c = 0$	1			
$b = 1/2 ; c = 0$			0.75	
$b = 1/3 ; c = 0$		0.778		
$b = 1/3 ; c = 1/3$				0.333
$b = 1/3 ; c = 1/6$			0.583	
$b = 1/4 ; c = 1/4$			0.5	
$b = 1/4 ; c = 1/12$		0.772		
$b = 1/6 ; c = 1/6$		0.667		

Tabela 4.1 – Comportamento da medida de balanceamento de massas

Por esta tabela é possível verificar que, conforme o valor de a diminui, o valor da avaliação também diminui, ou seja, quanto menos concentrado o minério está em apenas uma recuperadora, melhor a avaliação (considerando que valores menores na avaliação são melhores que valores maiores). Para um mesmo valor de a a avaliação é melhor quanto mais próximos forem os valores de b e c .

A medida de balanceamento de massa calculada acima tem valores variando entre $1/3$ (no caso onde a massa está igualmente distribuída entre as recuperadoras) e 1 (no caso onde a massa está totalmente concentrada em apenas uma recuperadora). Assim, é necessária uma normalização para que os valores da avaliação estejam na faixa $[0 \ 1]$.

c) Vizinhança temporal (vt)

Assim como a medida de fragmentação, a medida de vizinhança temporal também avalia o grau de organização do pátio. Se no primeiro caso o objetivo era avaliar a fragmentação do pátio após a realização de uma operação, aqui a idéia é estimar a fragmentação do pátio no futuro. Como a maioria das pilhas presentes no pátio já está associada a determinadas cargas é possível estimar quando essas pilhas serão embarcadas ou, em outras palavras, quando o espaço atualmente ocupado por elas será liberado. Esta estimativa é dada pela data estimada de atracação do navio ao qual pertence a carga associada à pilha. A partir desta informação é possível, então, efetuar uma estimativa de quão fragmentado o pátio estará no futuro.

Considere, por exemplo, a situação apresentada na Figura 4.3, onde deve-se escolher a localização da nova pilha B a ser criada:

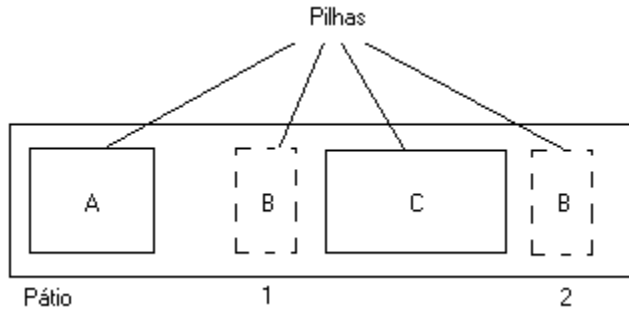


Figura 4.3 – Vizinhança temporal

É possível determinar, analisando as datas estimadas de embarque de cada uma das pilhas, a seqüência na qual as pilhas serão embarcadas. Se a seqüência de embarque estimada for [A – B – C] então a alternativa 1 é mais apropriada pois a utilização do espaço disponível é otimizada. Já se a seqüência estimada for [A – C – B] então a pilha deve ser criada na posição sugerida pela alternativa 2 já que a primeira alternativa resultaria em uma maior fragmentação do pátio no momento do embarque.

Para cada pilha já associada a uma carga é calculada uma avaliação através de uma base de regras nebulosas (ver referência [11]) e a avaliação de vizinhança temporal resultante é dada pela média do valor obtido para cada pilha. A base de regras é composta de 4 entradas: distância da pilha atual até a pilha à esquerda (D1), distância da pilha atual até a pilha à direita (D2), intervalo de tempo entre a data de embarque estimada da pilha atual e a data de embarque estimada da pilha à esquerda (T1) e intervalo de tempo entre a data de embarque estimada da pilha atual e a data de embarque estimada da pilha à direita (T2).

Abaixo é apresentada a base de regras utilizada, onde G significa grande, M significa média, P significa pequena, NG significa negativo grande, NP significa negativo pequeno, ZE significa zero, PP significa positivo pequeno e PG significa positivo grande. Para o cálculo da avaliação foi utilizado o procedimento de inferência de Mamdani.

20)	Se (D1 é G) e (D2 é G) então (avaliação é BOA)
21)	Se (D1 é M) e (D2 é M) então (avaliação é NEUTRA)
22)	Se (T1 é NP) e (T2 é PP) e (D1 é P) e (D2 é P) então (avaliação é BOA)
23)	Se (T1 é ZE) e (T2 é ZE) e (D1 é P) e (D2 é P) então (avaliação é BOA)
24)	Se (T1 é PP) e (T2 é NP) e (D1 é P) e (D2 é P) então (avaliação é BOA)
25)	Se (T1 é NG) e (D1 é P) então (avaliação é RUIM)
26)	Se (T1 é PG) e (D1 é P) então (avaliação é RUIM)
27)	Se (T2 é NG) e (D2 é P) então (avaliação é RUIM)
28)	Se (T2 é PG) e (D2 é P) então (avaliação é RUIM)
29)	Se (T1 é PP) e (T2 é PP) e (D1 é P) e (D2 é P) então (avaliação é BOA)
30)	Se (T1 é NP) e (T2 é NP) e (D1 é P) e (D2 é P) então (avaliação é BOA)
31)	Se (T1 é PP) e (D1 é P) então (avaliação é BOA)
32)	Se (T1 é PP) e (D1 é M) então (avaliação é NEUTRA)
33)	Se (T1 é NP) e (D1 é M) então (avaliação é NEUTRA)
34)	Se (T2 é PP) e (D2 é M) então (avaliação é NEUTRA)
35)	Se (T2 é NP) e (D2 é M) então (avaliação é NEUTRA)
36)	Se (T1 é NP) e (D1 é P) então (avaliação é BOA)
37)	Se (T1 é ZE) e (D1 é P) então (avaliação é BOA)
38)	Se (T2 é PP) e (D2 é P) então (avaliação é BOA)
39)	Se (T2 é NP) e (D2 é P) então (avaliação é BOA)
40)	Se (T2 é ZE) e (D2 é P) então (avaliação é BOA)
41)	Se (T1 é NG) e (D1 é M) então (avaliação é RUIM)

42)	Se (T1 é PG) e (D1 é M) então (avaliação é RUIM)
43)	Se (T2 é NG) e (D2 é M) então (avaliação é RUIM)
44)	Se (T2 é PG) e (D2 é M) então (avaliação é RUIM)
45)	Se (T1 é ZE) e (D1 é M) então (avaliação é NEUTRA)
46)	Se (T2 é ZE) e (D2 é M) então (avaliação é NEUTRA)
47)	Se (T1 é ZE) e (T2 é ZE) então (avaliação é BOA)
48)	Se (T1 é ZE) e (D1 é G) então (avaliação é NEUTRA)
49)	Se (T2 é ZE) e (D2 é G) então (avaliação é NEUTRA)

Figura 4.4 – Base de regras para o cálculo de vt

Para tornar o algoritmo mais eficiente em termos computacionais optou-se por calcular a priori o valor da medida de vizinhança temporal para diversas combinações entre as 4 entradas. Os resultados foram, então, armazenados em uma tabela e, durante a busca, os valores para a medida eram extraídos diretamente da tabela. Se os valores das entradas não correspondiam a uma das combinações armazenadas na tabela então uma interpolação linear era realizada para estimar a medida de vizinhança temporal. A perda de precisão da medida obtida, seguindo este procedimento, é, além de pouco significativa, justificada pelos ganhos substanciais em termos de tempo de processamento.

d) Atraso na descarga dos trens (at)

Atrasos nas descargas dos trens podem ocorrer em situações onde os recursos do pátio não são adequadamente utilizados ou mesmo em situações onde, apesar da utilização adequada dos recursos, o fluxo de entrada de minério imposto ao pátio ultrapassa sua capacidade de operação. Para cada trem que já chegou ao pátio e ainda não foi descarregado a seguinte medida é calculada:

$$at_{trem} = \begin{cases} \frac{n}{24}, & \text{se } \frac{n}{24} < 1 \\ 1, & \text{se } \frac{n}{24} \geq 1 \end{cases}$$

onde n é o número de horas que o trem já aguardou na fila após sua chegada ao pátio. Se a descarga do trem não está atrasada então $at_{trem} = 0$ e para atrasos maiores ou iguais a 24 horas $at_{trem} = 1$. O valor da medida total de atraso na descarga dos trens é dado pela média dos valores obtidos para cada trem.

No começo desta seção afirmou-se que uma função de avaliação dos estados bem projetada para o problema deveria cumprir duas metas: a) avaliar os estados em relação à utilização adequada dos recursos do pátio no instante atual, ou seja, avaliar os estados de acordo com os objetivos de decisão definidos na seção 2.4 e b) avaliar os estados em relação à sua predisposição para a utilização adequada dos recursos do pátio em eventos futuros.

É interessante observar, assim, como estas metas foram atingidas. Alguns dos objetivos de decisão descritos na seção 2.4 foram diretamente contemplados por medidas presentes na função de avaliação como, por exemplo, o objetivo de minimização de atraso nos trens via medida de atraso *at*. Outros objetivos foram contemplados de forma indireta pelas medidas da função de avaliação, como, por exemplo, o objetivo de minimização do deslocamento das máquinas e a medida de fragmentação (*fr*). Neste caso, se o pátio estiver pouco fragmentado as pilhas estarão concentradas em determinadas regiões das áreas e serão necessários menores deslocamentos das máquinas entre uma pilha e outra na realização das operações. Além disso, alguns dos objetivos de decisão aparentemente não foram contemplados na função de avaliação e isso se deve ao fato do problema já ter sido considerado durante a caracterização dos operadores. O objetivo de maximizar a qualidade das pilhas durante as descargas, por exemplo, é tratado diretamente na criação dos operadores de descarga. Assim, em uma situação onde existam duas pilhas disponíveis para uma descarga, com a qualidade de uma delas incompatível com a qualidade do minério no lote, seria gerado apenas um operador para a pilha restante, aquela com qualidade adequada.

A segunda meta da função de avaliação ficou a cargo, principalmente, das medidas de fragmentação (*fr*) e vizinhança temporal (*vt*). Essas medidas procuram organizar o pátio de forma a tornar mais provável a utilização adequada dos recursos no futuro. A medida de balanceamento de massa pelas recuperadoras (*bm*) também é importante neste aspecto já que a distribuição proporcional da massa entre as áreas do pátio aumenta as possibilidades de embarques e descargas simultâneos no futuro, além de garantir flexibilidade na utilização dos recursos do pátio.

A conclusão, portanto, é de que as definições dos estados, operadores e função de avaliação foram aparentemente adequadas na captura das principais características do problema e na avaliação dos resultados obtidos de acordo com os objetivos de decisão definidos. Os resultados satisfatórios obtidos com a aplicação do algoritmo em situações reais (ver capítulo 6) confirmam esta impressão.

4.5 – Funções de avaliação dos operadores

Após a definição apropriada dos estados, operadores e função de avaliação de estado já seria possível, a princípio, aplicar o algoritmo de busca para encontrar as soluções para o problema. No entanto, ao implementar computacionalmente o algoritmo verificou-se que, mesmo com as restrições no espaço de busca obtidas pelos operadores e função de avaliação, o algoritmo só encontrava soluções em tempos de processamento aceitáveis se estas estivessem em profundidades bastante baixas (a análise de complexidade do algoritmo é apresentada na seção 4.7). Neste caso, para aumentar a profundidade das buscas sem aumentar inefetivamente o tempo necessário para obter as soluções, foi necessário aplicar uma restrição adicional ao espaço de busca pesquisado. Esta restrição foi implementada através de uma função de avaliação dos operadores.

Ao definir os estados, procurou-se reduzir ao máximo o número de informações armazenadas, limitando-as apenas ao mínimo necessário para representar adequadamente

o problema em questão. No entanto, mesmo ao tomar este cuidado, o número grande de informações necessárias tornou cada estado bastante exigente em termos de espaço de armazenamento. Ao aplicar um operador a um estado a maioria de suas informações armazenadas é copiada para o estado resultante e, para árvores com profundidades maiores, isso pode tornar a busca pouco eficiente.

Para contornar este problema a função de avaliação para os operadores foi desenvolvida. O objetivo desta função é avaliar o quão promissor se mostra um operador antes mesmo de aplicá-lo a um estado. A vantagem obtida com esta abordagem é o ganho em eficiência do algoritmo já que a avaliação é feita antes da geração de um novo estado, geração esta que consome tempos bastante consideráveis. Esta abordagem tem, no entanto, uma desvantagem. Várias informações importantes para a avaliação estão disponíveis apenas após a geração efetiva do estado e, portanto, as informações com as quais a função de avaliação dos operadores trabalha são de qualidade inferior às utilizadas pela função de avaliação dos estados. Os resultados obtidos com a aplicação do algoritmo mostram, no entanto, que os ganhos obtidos em termos de eficiência justificam a eventual perda de qualidade na escolha dos estados a expandir durante a busca.

Os diferentes operadores desenvolvidos manipulam de diferentes maneiras os diversos elementos presentes no pátio e, portanto, comparar as avaliações de diferentes tipos de operadores não faria sentido. A função de avaliação dos operadores é aplicada, então, somente para a comparação de operadores do mesmo tipo. Para comparar operadores de tipos diferentes foi atribuída uma prioridade para cada um deles. Na seção 2.3 as operações de descarga e embarque foram descritas como as principais no processo de gerenciamento do fluxo de minério no pátio. As outras operações seriam realizadas, portanto, preferencialmente durante os intervalos entre as descargas e embarques de forma a perturbar o mínimo possível sua realização. Assim, as operações de embarque e descarga são preferenciais com relação às outras operações e isso é refletido nas prioridades atribuídas. É importante observar que, dependendo da quantidade de minério armazenada no pátio, é preferível realizar operações de descarga do que de embarque e vice-versa. Para situações de pátio cheio os embarques são mais urgentes e para situações de pátio vazio as descargas. Com relação às outras operações, a escolha da prioridade foi baseada na experiência dos especialistas no gerenciamento no pátio que conhecem, de forma intuitiva, quais operações são prioritárias para a resolução do problema. As prioridades atribuídas a cada operador são apresentadas na tabela 4.2:

Operação	Estado do pátio	Prioridade (<i>pr</i>)
Manutenção	qualquer	1
Descarga	vazio	2
Embarque	vazio	3
Descarga	cheio	3
Embarque	cheio	2
Repeneiramento	qualquer	4
Injeção do fino	qualquer	5
Empilhamento do granulado	qualquer	6
Recirculação	qualquer	7
Deslocamento no tempo	qualquer	8

Tabela 4.2 – Prioridades dos operadores

É importante observar que na tabela 4.2 quanto maior a prioridade da operação, menor o valor de *pr* e que o operador de manutenção é aquele com maior prioridade, pois o programa de manutenções deve ser obrigatoriamente cumprido para todas as máquinas. Além disso, é importante observar que o deslocamento no tempo tem a menor prioridade dentre os operadores e, assim, ele só é aplicado se não for possível efetuar mais nenhuma operação no pátio em um determinado instante.

A avaliação dos operadores é dada, assim, pela soma entre dois termos, onde o primeiro é a prioridade do tipo do operador e o segundo é a função de avaliação propriamente dita, calculada de maneira diferente para cada tipo de operador:

$$avaliaçãoDoOperador(O) = pr(O) + funçãoDeAvaliaçãoDoOperador(O)$$

Abaixo são descritas as expressões para o cálculo da *funçãoDeAvaliaçãoDoOperador* para cada tipo de operador:

a) *funçãoDeAvaliaçãoDoOperador* para os operadores de descarga, empilhamento do granulado, injeção do fino e recirculação

Os operadores de descarga, empilhamento do granulado, injeção do fino e recirculação são os responsáveis pelo empilhamento de minério no pátio e pela criação de novas pilhas quando necessário (com exceção, neste último caso, da injeção do fino). Sua função de avaliação é dada, portanto, pela mesma expressão. O valor da função de avaliação é o resultado de uma média ponderada entre três fatores: fragmentação (*fr*), deslocamento da máquina (*dm*) e tempo de residência (*tr*):

$$funçãoDeAvaliaçãoDoOperador = x_1fr + x_2dm + x_3tr$$

onde x_1 , x_2 e x_3 representam os pesos atribuídos a cada parcela, com $x_1 + x_2 + x_3 = 1$.

O fator de fragmentação *fr* é calculado da mesma forma que no caso da função de avaliação dos estados. Isso é possível já que não é necessário gerar efetivamente o novo estado para saber qual a disposição resultante das pilhas no pátio. Na definição do próprio

operador já estão especificados a disposição e o tamanho das novas pilhas geradas e, portanto, o valor resultante da fragmentação do pátio após a aplicação do operador pode ser calculado de antemão.

Ao iniciar uma nova operação a máquina deve deslocar-se até a posição onde se localiza a pilha a ser utilizada. Em termos de gerenciamento efetivo dos recursos do pátio quanto menor este deslocamento melhor. O fator de deslocamento da máquina (dm) avalia o impacto deste deslocamento na adequação do operador e é dado por:

$$dm = \frac{d_i}{Nb_j}$$

onde d_i é a distância, em balizas, entre a pilha e a máquina i utilizadas pela operação e Nb_j é o número total de balizas da área j onde está localizada a pilha. No pior caso a máquina deve deslocar-se de uma ponta a outra da área e $dm = 1$.

Na seção 4.2 foi colocado que o tempo de residência de uma pilha, ou o número de dias que a pilha aguarda antes de ser embarcada, é calculado através da média entre cada quantidade empilhada ponderada pelo tempo de residência de cada uma destas quantidades. Assim, ao empilhar minério na pilha seu tempo de residência é alterado e o fator tr é utilizado para avaliar o impacto desta alteração. Após 10 dias no pátio a pilha atinge seu limite em termos de drenagem e, assim, o valor de tr é calculado como mostra a Figura 4.5:



Figura 4.5 – Tempo de residência

É possível calcular este fator antes da geração efetiva do estado, pois na caracterização do operador já estão especificados a pilha utilizada, a quantidade a ser empilhada e a data de empilhamento.

b) *funçãoDeAvaliaçãoDoOperador* para o operador de embarque

A função de avaliação do operador de embarque é dada pela média ponderada entre os fatores de deslocamento da máquina (dm) e tempo de residência (tr) calculados da mesma maneira que no caso anterior:

$$\text{funçãoDeAvaliaçãoDoOperador} = x_1 dm + x_2 tr$$

onde x_1 e x_2 representam os pesos atribuídos a cada parcela, com $x_1 + x_2 = 1$.

A parcela relativa ao tempo de residência (tr) é calculada aqui da mesma forma que no caso dos operadores de empilhamento descrito anteriormente. No entanto há uma diferença conceitual: no caso dos operadores de empilhamento o fator é utilizado para avaliar o tempo de residência resultante da pilha após a realização da operação; no caso do operador de embarque este fator é utilizado para auxiliar na escolha da pilha a ser embarcada, dando preferência para aquelas com maior tempo de residência e descartando aquelas com tempo de residência incompatível com o exigido pelo cliente para o qual o embarque está direcionado.

c) ***funçãoDeAvaliaçãoDoOperador* para os operadores de repeneiramento, manutenção e deslocamento no tempo**

Como foi visto na seção 4.3 nunca são gerados mais do que um operador de repeneiramento, manutenção e deslocamento no tempo a cada passo do algoritmo e, portanto, não é necessária a função de avaliação para estes operadores.

A máquina responsável por recuperar as pilhas da área de repeneiramento e transferi-las para a usina desloca-se sob esteira e tem, por isso, acesso a apenas duas pilhas: aquela localizada diretamente a sua frente e aquela localizada diretamente atrás. No conjunto de regras desenvolvidas para o operador de repeneiramento uma delas é escolhida e apenas um operador é gerado.

No caso da manutenção, se dois ou mais operadores forem criados ao mesmo tempo (para máquinas diferentes) é irrelevante qual deles será aplicado primeiro já que, com a prioridade máxima atribuída a este operador, é garantido que as manutenções restantes serão efetuadas logo a seguir, nos próximos passos do algoritmo.

Com relação ao deslocamento no tempo apenas um operador é gerado a cada passo do algoritmo: aquele que corresponde ao próximo evento a ocorrer no pátio.

4.6 – Algoritmo de busca

Para a solução do problema de gerenciamento do fluxo de minério no pátio foi desenvolvido um algoritmo de busca informada com profundidade limitada. A busca é informada pois a cada passo o algoritmo utiliza as avaliações dos operadores para limitar o número máximo de nós a expandir e escolhe o próximo nó a expandir de acordo com as avaliações dos estados. A velocidade com que o algoritmo sugere soluções e, desta forma, auxilia o tomador de decisões é essencial para sua utilização prática e, assim, foi necessário incluir também limitações na profundidade de busca de forma a adequar o tempo de processamento aos padrões requeridos pela aplicação.

O algoritmo utilizado é descrito abaixo:

```
1. função encontraSolução(Estado estadoInicial), retorna um estado
2. Estado S = estadoInicial
3. contador = 1
```

```

4. enquanto (contador < contador_max) ir para passo 5, senão ir para passo 9
5. S = encontraSoluçãoLocal(S, 0)
6. se (S é uma solução final) ir para passo 9
7. contador = contador + 1
8. ir para passo 4
9. retorna S
10.
11. função encontraSoluçãoLocal(Estado S, int profundidade), retorna um estado
12. se profundidade >= profundidade_max então retorna S como a melhor solução local encontrada até o momento
13. se S é uma solução, retorna S
14. L = geraPossiveisOperadores(S); (coloca todos os possíveis operadores que podem processar o estado S em uma lista chamada L)
15. avaliar todos os operadores da lista L
16. ordenar a lista L e cria uma sublista L' com as n melhores alternativas (truncar lista L)
17. para cada elemento de L' criar um novo estado baseado no estado atual S e inclui o resultado em uma nova lista chamada Q
18. avaliar todos os estados da lista Q
19. ordenar a lista Q
20. para cada estado Sx∈Q, chama a função encontraSolução(Sx, profundidade+1)
21. retorna o melhor resultado da função encontraSolução(.)

```

Para tornar a descrição do algoritmo mais facilmente compreensível optou-se por apresentar como solução apenas o estado final S. Na verdade, a solução para o problema é dada pelo caminho entre o estado inicial e o estado final obtido.

É interessante observar como a aplicação dos operadores e das funções de avaliação dos estados e operadores atua de forma a limitar o espaço de busca percorrido pelo algoritmo:

- no passo 14 são gerados os possíveis operadores aplicáveis ao estado. Os operadores gerados, conforme visto na seção 4.3, são baseados em regras criadas a partir do conhecimento utilizado pelos especialistas no gerenciamento do pátio. Da infinidade de possíveis operadores são, portanto, gerados apenas aqueles considerados promissores pelos especialistas. Desta forma, o algoritmo utiliza informações relativas ao problema não apenas nas avaliações dos estados e operadores, mas a partir da própria criação dos operadores;
- mesmo com a geração dos operadores baseada no conhecimento dos especialistas, o número de operadores criados pode, ainda assim, ser grande o suficiente para tornar a busca ineficiente e, neste caso, inapropriada para a tarefa atribuída. Assim, no passo 15 os operadores gerados são avaliados e no passo 16 são considerados apenas os mais promissores, descartando-se os restantes. O número n de operadores escolhidos é um parâmetro do algoritmo e sua escolha deve considerar um compromisso entre o número de possibilidades pesquisadas e a eficiência do algoritmo;
- após restringir o número de operadores gerados com a função de avaliação dos operadores, o algoritmo avalia (passo 18) e ordena (passo 19) os estados gerados e dentre eles escolhe o mais bem avaliado como o próximo a ser expandido.

Com a limitação imposta na profundidade de busca o algoritmo encontra a melhor solução local dentro do espaço delimitado e reinicia uma nova busca utilizando esta

solução como estado inicial até que uma solução global seja atingida. A Figura 4.6 mostra o comportamento do algoritmo com relação à limitação na profundidade de busca:

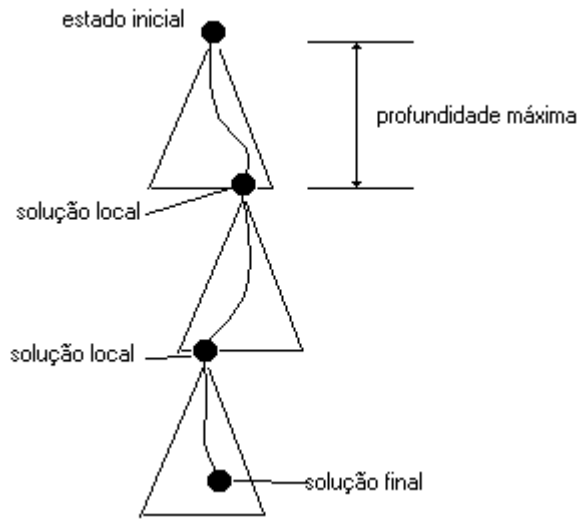


Figura 4.6 – Algoritmo de busca

A limitação do espaço de busca pesquisado pelo algoritmo tem a vantagem de tornar o problema tratável e possibilita a obtenção de soluções em tempos de execução aceitáveis. No entanto, apesar de todos os cuidados tomados na escolha adequada dos operadores e na avaliação dos estados, nada garante que o algoritmo encontre uma solução, mesmo quando existir alguma. Em alguns casos um estado avaliado como inadequado pelo algoritmo e desconsiderado na busca pode fazer parte do único caminho possível entre o estado inicial e o estado final desejado. Assim, o algoritmo desenvolvido não é *completo*. Além disso, os objetivos de decisão adotados são, em muitos casos, conflitantes entre si e é praticamente impossível definir o que viria a ser a solução ótima, ou seja, o algoritmo também não é *ótimo*. Apesar destas deficiências a aplicação do algoritmo em situações práticas (ver capítulo 6) mostrou-se bastante satisfatória. De maneira geral, o algoritmo mostrou-se bem sucedido ao auxiliar o tomador de decisões, propondo soluções, obtidas em tempos de execução adequados, que respeitam as restrições e onde os recursos do pólio são administrados de forma satisfatória.

4.7 – Análise de complexidade do algoritmo

Dados:

d_{SG} = profundidade máxima da solução global;

d = profundidade máxima de cada sub-árvore da busca;

b_m = ramificação máxima (número máximo de operadores gerados para cada estado)

então, o número máximo de nós armazenados em memória em um determinado instante de tempo é dado por $b_m d + d_{SG} - d$

onde o fator $b_m d$ refere-se ao número máximo de nós armazenados para a sub-árvore atual e o fator $(d_{SG} - d)$ refere-se ao número de nós armazenados desde o nó-raiz do problema até a solução local encontrada para a sub-árvore anterior à atual.

Com relação à complexidade temporal, cada sub-árvore tem complexidade equivalente à de uma busca em profundidade e, portanto, proporcional a $O(b_m^d)$ (ver seção 3.4).

4.8 – Resumo

Nesta seção o algoritmo para a solução do problema de programação das atividades no pátio foi apresentado. O algoritmo implementa uma busca informada com profundidade limitada. Para restringir o espaço de busca pesquisado a proporções manipuláveis em termos de espaço ocupado em memória e, principalmente, em termos de tempo de execução, várias técnicas foram aplicadas. Os estados foram definidos de forma a representar todas as informações relevantes para a representação e solução do problema. No desenvolvimento dos operadores foi utilizada uma série de regras baseadas no conhecimento dos especialistas no gerenciamento do pátio e, a seguir, o número de operadores gerados foi limitado por uma função de avaliação que explora o fato de que várias informações sobre o estado resultante à aplicação de um operador podem ser acessadas antes mesmo da geração efetiva do novo estado. Para a avaliação dos estados resultantes foi utilizada uma função que agrega medidas da utilização efetiva dos recursos do pátio assim como medidas que auxiliam na organização do pátio de forma a aumentar a probabilidade da utilização efetiva de seus recursos no futuro.

No capítulo seguinte é apresentado um sistema computacional que implementa o algoritmo descrito nesta seção.

5 – Sistema computacional de suporte à programação

5.1 – Introdução

Este capítulo apresenta a implementação computacional do algoritmo de programação de atividades no pátio de minério descrito no capítulo anterior. Esta descrição será bastante breve e, portanto, serão apresentadas, na seção 5.2, apenas as características funcionais e interfaces mais relevantes na implementação computacional. Para o desenvolvimento do sistema foi utilizada uma abordagem orientada a objetos e a seção 5.3 apresenta suas principais etapas.

5.2 – Arquitetura funcional e interfaces

O pátio de minério estudado neste trabalho conta com uma base de dados onde são armazenadas todas as informações relativas a seus elementos componentes. Esta base de dados é constantemente atualizada e contém tanto informações históricas sobre os estados do pátio no passado como as informações necessárias para descrever o estado do pátio no instante atual. O algoritmo de programação de atividades deve ser executado a partir de um estado inicial que representa o pátio no instante atual, e é necessário, portanto, que o sistema desenvolvido acesse as informações da base de dados necessárias para a caracterização do estado inicial da busca. Além da leitura, o sistema deve contemplar também a escrita na base de dados permitindo, assim, o armazenamento dos resultados obtidos após a execução do algoritmo. A principal função do sistema desenvolvido é auxiliar os especialistas no gerenciamento do pátio em suas tomadas de decisão, propondo a caracterização e ordenação adequada dos operadores de forma a atender a uma série de objetivos de decisão e restrições. É necessária, portanto, além da comunicação entre sistema e base de dados, a comunicação entre sistema e usuário (tomador de decisão). Esta comunicação deve permitir ao usuário configurar os parâmetros do sistema que controlam a busca e visualizar os resultados obtidos pelo algoritmo. Os conceitos descritos acima podem ser observados na Figura 5.1.

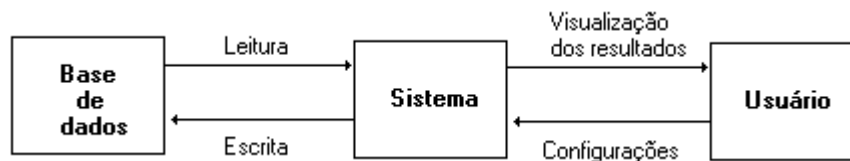


Figura 5.1 – Base de dados – Sistema – Usuário

Para permitir esta interação entre o sistema e a base de dados por um lado, e entre o sistema e o usuário por outro, as seguintes funcionalidades foram desenvolvidas:

- a) leitura e escrita da base de dados;
- b) visualização, pelo usuário, dos resultados obtidos pelo algoritmo;
- c) configuração, pelo usuário, dos parâmetros da busca;
- d) escolha, pelo usuário, de caminhos alternativos daqueles tomados pelo algoritmo de busca.

A seguir são descritas as principais características de cada uma das funcionalidades apresentadas:

a) Leitura e escrita na base de dados

O sistema, ao ser inicializado, carrega da base de dados todas as informações necessárias à caracterização do estado atual do pátio de minério. O algoritmo é executado utilizando este estado atual como estado inicial da busca no espaço de estados e os resultados obtidos são armazenados na base de dados para posteriores consultas e visualização por outros sistemas interligados, através da base de dados, ao sistema desenvolvido neste trabalho.

b) Visualização dos resultados

Para o problema de programação de atividades no pátio de minério a solução, como visto no capítulo anterior, é dada pela caracterização e ordenação adequada das operações aplicadas ao pátio. Em outras palavras, a solução é representada pelo caminho entre o estado inicial e o estado final encontrado com a execução do algoritmo. Para permitir a visualização deste caminho o sistema deve permitir, portanto, a visualização de cada um de seus estados componentes. A figura 5.2 mostra a interface desenvolvida para a representação de um estado e a seguir, nos itens de i) a v), é descrita cada uma das janelas componentes desta representação:

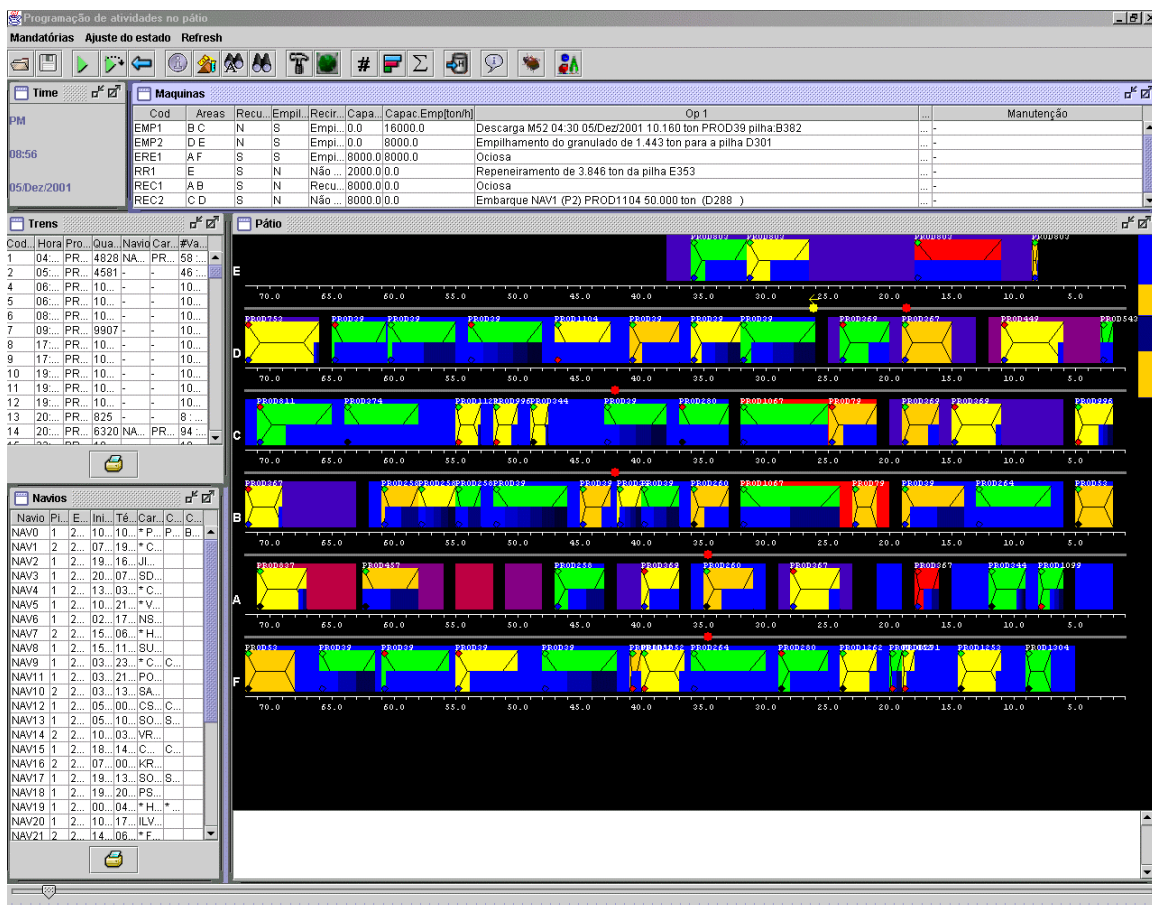


Figura 5.2 – Interface para a visualização do estado do pátio

i) Janela “Time”: apresenta o instante de tempo ao qual refere-se o estado do pátio apresentado.

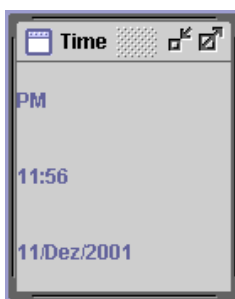


Figura 5.3 – Time

ii) Janela “Trens”: apresenta a fila de lotes de vagões que ainda não foram descarregados nas pilhas do pátio. Cada lote da fila é caracterizado por seu código, data hora estimada de chegada, produto transportado, quantidade total de minério, número de vagões no lote

e, caso o lote já esteja associado a uma carga, o nome do navio no qual a carga associada será embarcada.

Trens						
Codigo	Hora	Produto	Quantidade	Navio	Carga	#Vagoes
117	18:20 12/Dez/2001	PROD280	1734	NAV14	PROD280	17 : M14 18:00 12/Dez/...
118	18:33 12/Dez/2001	PROD290	8874	NAV13	PROD290	87 : M14 18:00 12/Dez/...
119	18:40 12/Dez/2001	PROD290	1734	NAV13	PROD290	17 : M14 18:00 12/Dez/...
120	18:53 12/Dez/2001	PROD290	8670	NAV13	PROD290	85 : M14 18:00 12/Dez/...
121	00:20 13/Dez/2001	PROD280	10404	NAV14	PROD280	102 : M02 00:00 13/Dez/...
122	00:40 13/Dez/2001	PROD803	10192	-	-	104 : M02 00:00 13/Dez/...
123	03:20 13/Dez/2001	PROD280	10608	NAV14	PROD280	104 : M04 03:00 13/Dez/...
124	03:40 13/Dez/2001	PROD803	9996	-	-	102 : M04 03:00 13/Dez/...
125	06:20 13/Dez/2001	PROD79	8364	NAV19	PROD79	102 : M06 06:00 13/Dez/...
126	06:40 13/Dez/2001	PROD280	10608	NAV14	PROD280	104 : M06 06:00 13/Dez/...
127	09:20 13/Dez/2001	PROD280	10608	NAV14	PROD280	104 : M08 09:00 13/Dez/...
128	09:40 13/Dez/2001	PROD280	10404	NAV14	PROD280	102 : M08 09:00 13/Dez/...
129	12:20 13/Dez/2001	PROD280	10608	NAV14	PROD280	104 : M10 12:00 13/Dez/...
130	12:40 13/Dez/2001	PROD39	8874	-	-	87 : M10 12:00 13/Dez/...

Figura 5.4 – Trens

iii) Janela “Navios”: apresenta a fila de navios que ainda não tiveram todas as suas cargas embarcadas no porto. Cada navio da fila é caracterizado por seu nome, píer alocado para a atracação, código de embarque, datas previstas de atracação e desatracação e a lista de cargas transportadas. Para cada carga do navio são apresentadas informações como: cliente para o qual a carga está destinada, produto da carga, quantidade de minério, etc.

Navios						
Navio	Pier	Embarque	Início carregamento	Término carregamento	Carga 0	Carga 1
NAV0	1	2001 / 05898	10:20 04/Dez/2001	10:35 05/Dez/2001	* PRE PROD344 0.15K 0.0K 1.0d	PRE PROD369 33.26K 0.0...
NAV1	2	2001 / 00561	07:27 05/Dez/2001	19:32 05/Dez/2001	* COS PROD1104 50.0K 11.5444444444...	BRE PROD367 0.0K 0.0K 0...
NAV2	1	2001 / 06079	19:40 05/Dez/2001	16:55 06/Dez/2001	JIN PROD39 170.0K 0.0K 5.0d	
NAV3	1	2001 / 05870	20:55 06/Dez/2001	07:55 07/Dez/2001	SDM PROD39 69.999K 0.0K 4.0d	
NAV4	1	2001 / 05952	13:14 07/Dez/2001	03:56 08/Dez/2001	* CSC PROD264 120.0K 0.0K 4.0d	
NAV5	1	2001 / 00554	10:27 08/Dez/2001	21:27 08/Dez/2001	* VRD PROD280 70.0K 0.0K 2.0d	
NAV6	1	2001 / 05987	02:51 09/Dez/2001	17:45 10/Dez/2001	NSC PROD39 304.814K 0.0K 5.0d	
NAV7	2	2001 / 05393	15:38 09/Dez/2001	06:20 10/Dez/2001	* HUK PROD374 60.0K 0.0K 4.0d	
NAV8	1	2001 / 05988	15:00 11/Dez/2001	11:57 12/Dez/2001	SUM PROD39 167.648K 0.0K 5.0d	
NAV9	1	2001 / 05769	03:14 13/Dez/2001	23:50 13/Dez/2001	* CSI PROD1052 120.0K 0.0K 4.0d	CSI PROD367 45.0K 0.0K 0...
NAV11	1	2001 / 06034	03:57 14/Dez/2001	21:17 14/Dez/2001	POH PROD39 140.0K 0.0K 5.0d	

Figura 5.5 – Navios

iv) Janela “Máquinas”: apresenta algumas informações relativas às máquinas empilhadeiras e recuperadoras que atuam no pátio como: nome da máquina, áreas em que ela atua, capacidades de empilhamento e recuperação, etc. Apresenta, além disso, as operações alocadas a cada máquina em um determinado instante de tempo. No exemplo apresentado na figura 5.6 todas as máquina do pátio estão ociosas com exceção de uma recuperadora, REC2, que realiza um embarque para o navio NAV1 de 50000 toneladas do produto PROD1104 armazenado na pilha D288.

mostra com maior detalhe como as informações sobre as pilhas e máquinas são representadas na janela Pátio:

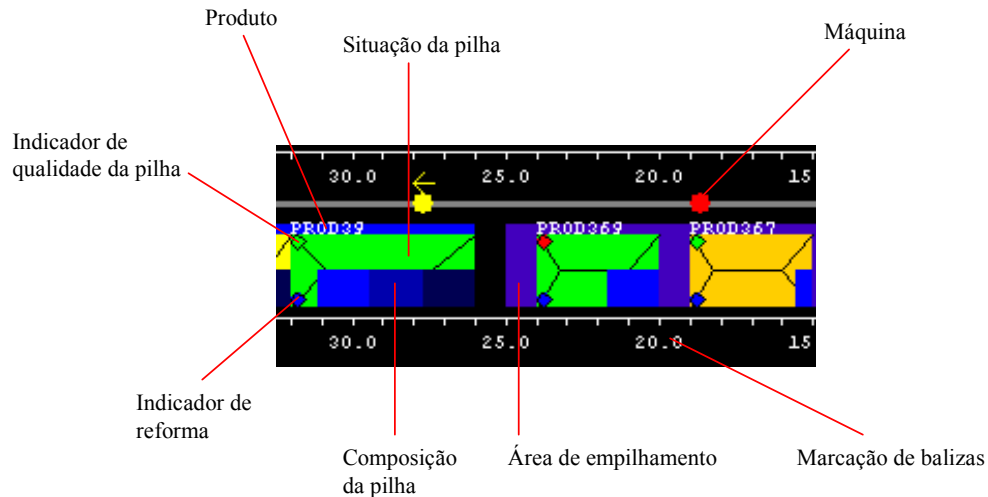


Figura 5.8 – Janela Pátio – detalhe

Com todas as informações apresentadas pela janela “Pátio” pode-se dizer que ela equivale a uma “fotografia” simplificada do pátio em um determinado instante de tempo. Como foi visto no início desta seção, a representação de um estado do pátio através das interfaces apresentadas acima, é necessária para permitir a visualização, por parte do usuário, da solução obtida pelo algoritmo. Esta solução corresponde ao caminho entre os estados inicial e final. Assim, a janela “Pátio” possui também uma barra de controle de tempo onde cada uma de suas divisões representa um estado componente do caminho proposto como solução. A barra de controle de tempo está localizada no canto inferior da interface de representação dos estados, logo abaixo do quadro com as informações detalhadas sobre a pilha. O exemplo seguinte mostra como a barra de controle de tempo é utilizada para visualizar a solução encontrada pelo algoritmo. Na figura 5.9 o marcador da barra de controle do tempo está localizado na sexta divisão a partir da esquerda e o estado correspondente representa o pátio em 5 de dezembro de 2001, às 09:11. Ao deslocar o marcador para a direita é apresentado o próximo estado que compõe a solução (figura 5.10). Neste estado a máquina EMP1 foi alocada a uma operação de descarga de 10285 toneladas do produto PROD39 para a pilha B382. Deve-se observar que o instante de tempo continua o mesmo do estado anterior e que a quantidade atual de minério na pilha B382 é 10160 toneladas (esta informação é apresentada no canto inferior da interface). O próximo estado da solução (figura 5.11), obtido ao deslocar-se novamente o marcador da barra de controle de tempo, corresponde à situação do pátio às 09:16. Houve, portanto, um deslocamento de 5 minutos com relação ao estado anterior e neste intervalo foram descarregadas 584 toneladas de minério do lote na pilha B382.

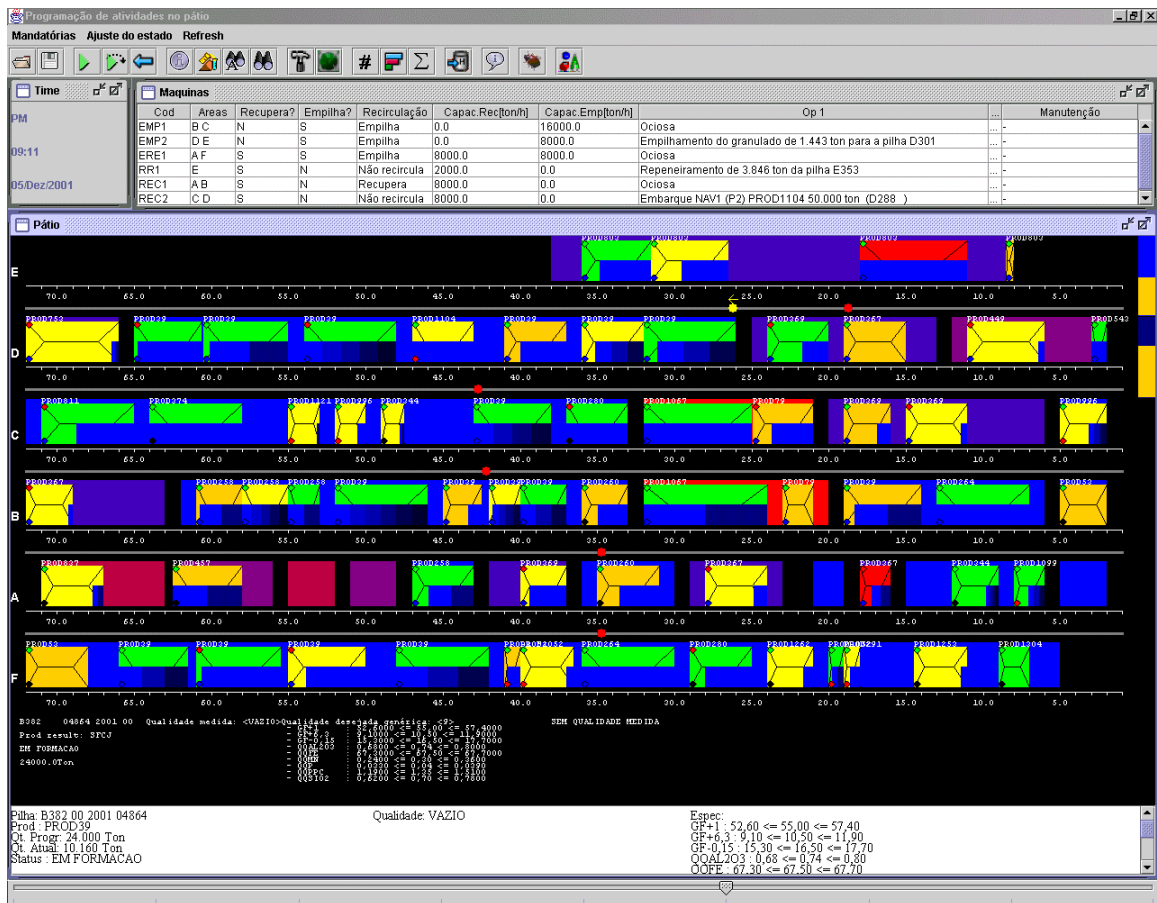


Figura 5.9 – Visualização dos resultados – Barra de controle de tempo

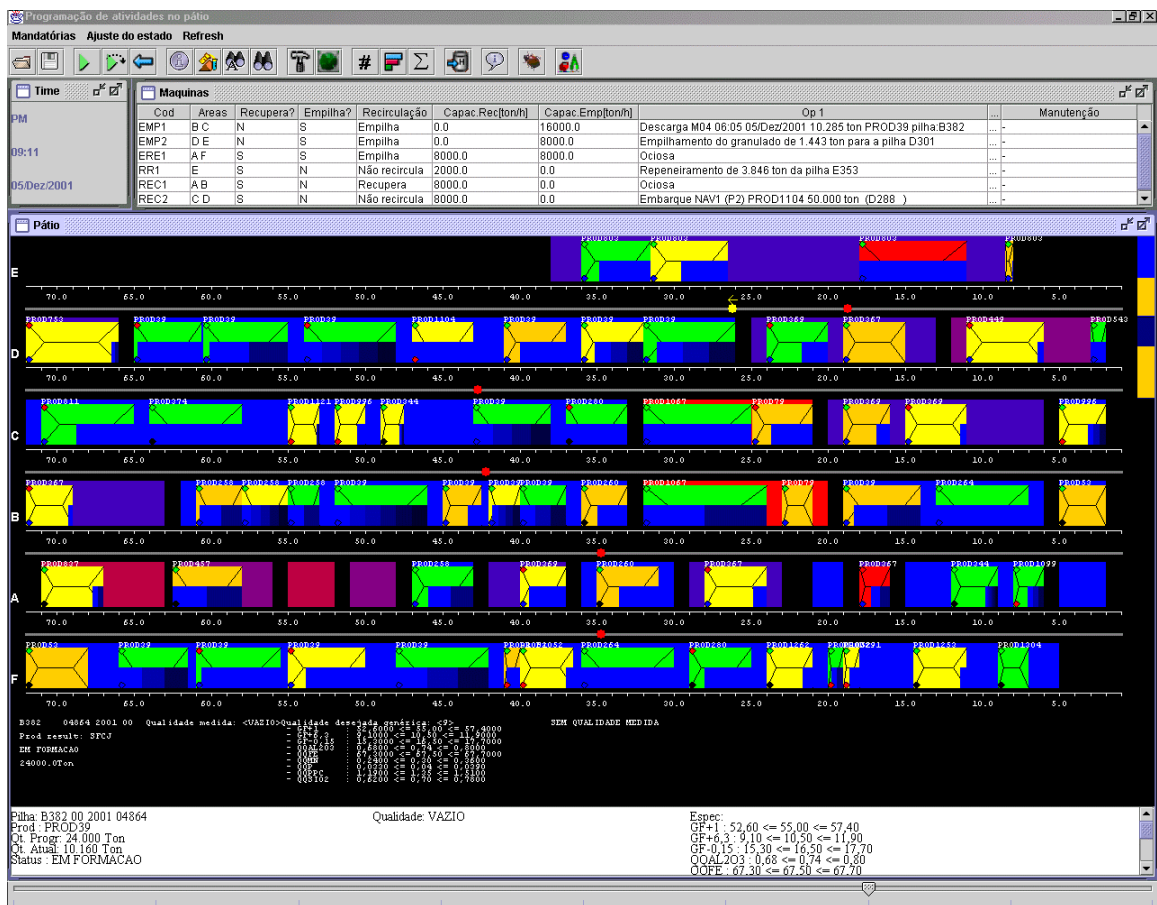


Figura 5.10 – Visualização dos resultados – Barra de controle de tempo

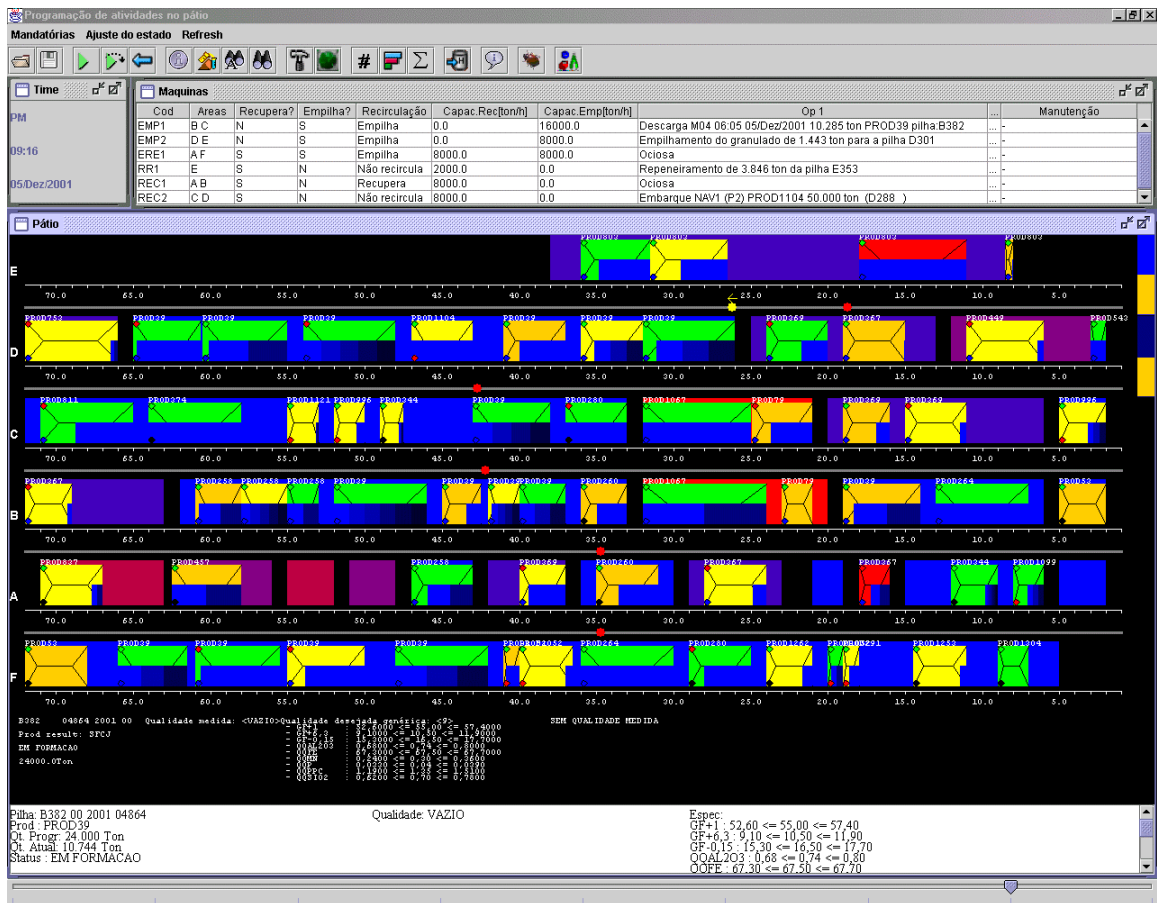


Figura 5.11 – Visualização dos resultados – Barra de controle de tempo

Além da visualização dos estados presentes no caminho encontrado pelo algoritmo, o sistema disponibiliza também outras interfaces que auxiliam o tomador de decisões a analisar os resultados obtidos. Dentre estas interfaces estão, por exemplo, diagramas de utilização das máquinas, diagrama de estoque por produtos nas áreas, etc.

c) Configuração dos parâmetros da busca

Esta interface permite ao usuário configurar alguns parâmetros do algoritmo de programação de atividades no pátio. Os parâmetros configuráveis são a profundidade máxima de cada subárvore de busca, o número máximo de subárvores pesquisadas e o número máximo de operadores aplicados a cada estado. No algoritmo descrito na seção 4.6 estes parâmetros correspondem às variáveis *profundidade_max*, *contador_max* e *n*, respectivamente. Na configuração dos parâmetros do algoritmo o usuário deve escolher também o critério de parada, usualmente dado por um número máximo de dias para os quais o espaço de estados é pesquisado:

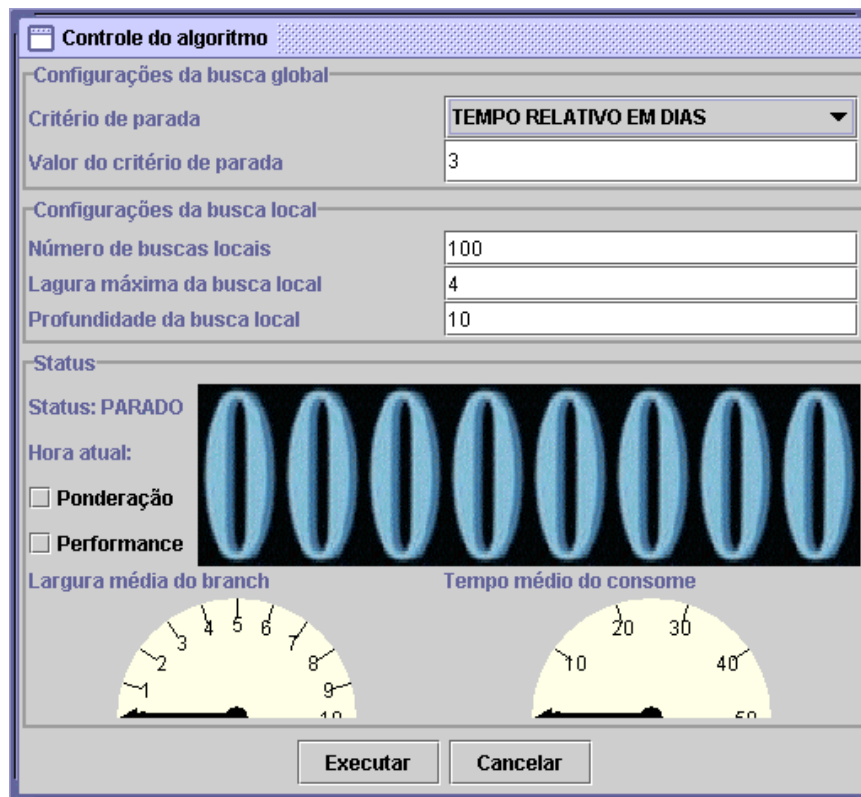


Figura 5.12 – Configuração dos parâmetros do algoritmo

d) Escolha de caminhos alternativos na busca

As regras utilizadas na formação dos operadores (ver seção 4.3) são, de maneira geral, suficientes para tratar de maneira adequada a maioria das situações que ocorrem no pátio. No entanto, estas regras não são totalmente exaustivas e em alguns casos sua aplicação não é satisfatória. Nestes casos, a busca é interrompida e cabe ao tomador de decisões escolher as medidas adequadas à ocasião. Após a intervenção do usuário a busca segue normalmente, incorporando em sua solução a decisão tomada. Para que isso seja possível é necessário, portanto, disponibilizar ao usuário uma interface que torne possíveis configurações para os operadores que não estavam previstas no conjunto de regras. Na figura 5.13 é mostrada, a título de exemplo, a interface utilizada para a configuração de operadores de descarga:

Descarga

Configuração da Descarga

Lote Vagão: 1 Num. de Vagões: 40

Pilha: A158

Trens Disponíveis

Codigo	Hora	Produto	Quantidade	Navio	Carga	#Vagoes
1	04:50 05/Dez/2001	PROD811	4828	NAV26	PROD811	58 : M52 04:3...
2	05:26 05/Dez/2001	PROD39	4581	-	-	46 : M52 04:3...
5	06:45 05/Dez/2001	PROD39	10087	-	-	102 : M04 06:...
6	08:56 05/Dez/2001	PROD39	10102	-	-	104 : M06 08:...

A F

Apelido	Código	B.Ini	B.Fim	P...	Quantidade	Cliente
A158	03916 2000 00	6.0	8.0	...	10757	POC
A103	03104 2001 00	9.0	12.0	...	7871	POC
A149	04812 2001 00	31.0	35.0	...	25605	POC

Figura 5.13 – Configuração de operador de descarga

Além da configuração dos parâmetros do algoritmo e da possibilidade de escolha de caminhos alternativos na busca, o sistema disponibiliza ao usuário diversas outras opções para a manipulação do mecanismo de busca. Dentre essas opções destacam-se:

- escolha dos pesos para os critérios de avaliação dos estados (ver seção 4.4);
- possibilidade de flexibilização de algumas das restrições impostas ao problema como, por exemplo, exigência de tempo de residência, qualidade, atrasos máximos nas descargas e embarques, etc.

Nesta seção foram apresentadas as principais funcionalidades e interfaces do sistema computacional desenvolvido para a programação de atividades no pátio de minério. A aplicação do sistema em diversas situações práticas tem demonstrado a adequação destas funcionalidades e interfaces, provendo ao usuário uma ferramenta amigável para a visualização dos resultados obtidos e permitindo a ele a configuração dos parâmetros da busca sem sobrecarregá-lo com informações desnecessárias. Alguns exemplos de aplicação do sistema em situações reais são apresentados no capítulo 6.

Para finalizar, é importante observar ainda um outro fato. É evidente a importância da implementação computacional do algoritmo com relação à sua aplicação em situações práticas. No entanto, esta implementação foi essencial também durante o próprio processo de desenvolvimento do algoritmo. O processo de definição das regras utilizadas para a construção de cada operador seria impraticável sem o auxílio de uma ferramenta

visual que tornasse possível a verificação e validação dos resultados obtidos durante o processo.

5.3 – Modelagem orientada a objetos

A implementação computacional do algoritmo de programação de atividades no pátio de minério, apresentada neste capítulo, foi realizada através do modelo de orientação a objetos. Este modelo é voltado para a decomposição de um problema em objetos e não em funções, como no caso das abordagens estruturadas convencionais.

Esta decomposição dos elementos do problema é realizada através dos processos de análise e desenvolvimento orientados a objetos. Descrições detalhadas dos conceitos envolvidos na análise e desenvolvimento orientados a objetos, assim como a aplicação destes conceitos ao problema de gerenciamento dos recursos do pátio estão além do escopo deste trabalho. Estes conceitos serão descritos aqui, portanto, apenas em linhas gerais. Para uma descrição detalhada consultar [6] e [7], nos quais esta seção está baseada.

Apesar de não haver uma delimitação exata entre os conceitos de análise e desenvolvimento pode-se dizer, de maneira geral, que o primeiro está relacionado a uma investigação dos elementos que compõem um problema enquanto o segundo relaciona-se com a maneira como o problema é resolvido. Um processo de análise e desenvolvimento orientados a objetos é, de maneira geral, dividido nas seguintes etapas:

a) Análise de requisitos: esta etapa tem como objetivo descrever os processos que ocorrem, ou que devem ocorrer, no sistema em questão. Para a descrição destes processos é utilizado o conceito de *casos de uso*, descrições textuais dos processos envolvidos no sistema. Para o problema de programação de atividades no pátio os *casos de uso* são numerosos e utilizados para identificar e descrever, por exemplo, cada uma das operações que ocorrem no pátio, assim como processos como a chegada de trens aos viradores de vagões ou a atracação e desatracação de navios ao porto. Os *casos de uso* não são limitados, no entanto, apenas a processos reais que ocorrem no pátio, ou seja, apenas a processos que têm relação direta com elementos físicos presentes no pátio. Eles são utilizados para descrever todos os processos do sistema como um todo e, portanto, processos como a execução do algoritmo de busca ou a visualização dos resultados pelo usuário, por exemplo, devem também ser descritos através de *casos de uso*.

b) Análise de domínio: nesta etapa são identificados e descritos todos os conceitos, atributos e associações no domínio do problema necessários para sua representação adequada. Ao final desta etapa um *modelo conceitual*, onde todos os elementos citados acima estão representados, é gerado. É importante observar que os conceitos descritos no *modelo conceitual* representam itens do mundo real e não componentes de *software*. O modelo para o problema de programação de atividades no pátio de minério foi dividido em módulos (*packages*) de forma a separar os conceitos básicos daqueles envolvidos com o algoritmo de resolução do problema. Esta divisão permitiu a constante evolução dos conceitos do algoritmo sem alteração dos conceitos

mais básicos que já estavam bem definidos desde o início da análise. Além dos *packages* Algoritmo e Básico foram necessários também outros para representar os conceitos relativos à comunicação com a base de dados e os conceitos de utilidade geral utilizados como apoio à implementação. A título de ilustração, são apresentados nas figuras 5.14 e 5.15 os *modelos conceituais* para os *packages* Algoritmo e Básico, respectivamente:

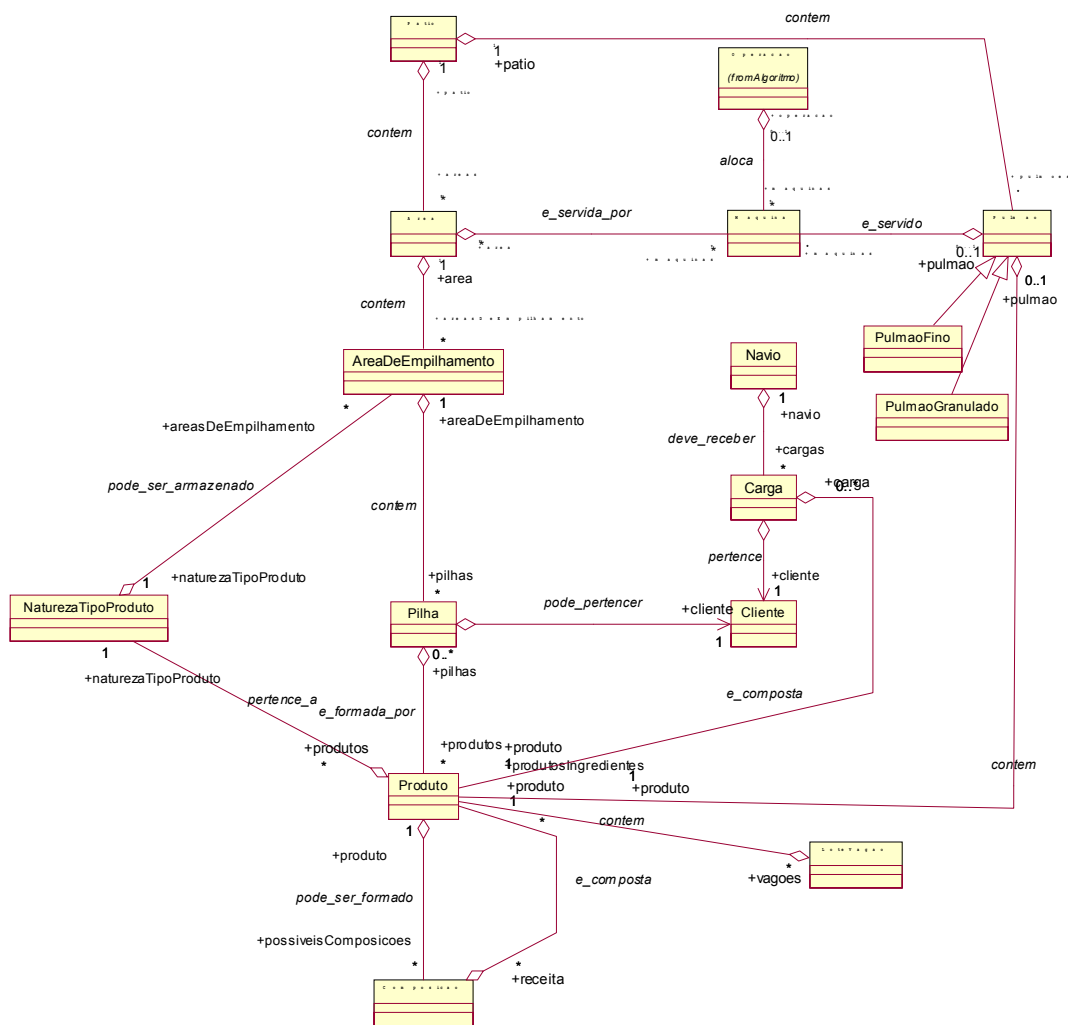


Figura 5.14 – Modelo conceitual do package Básico

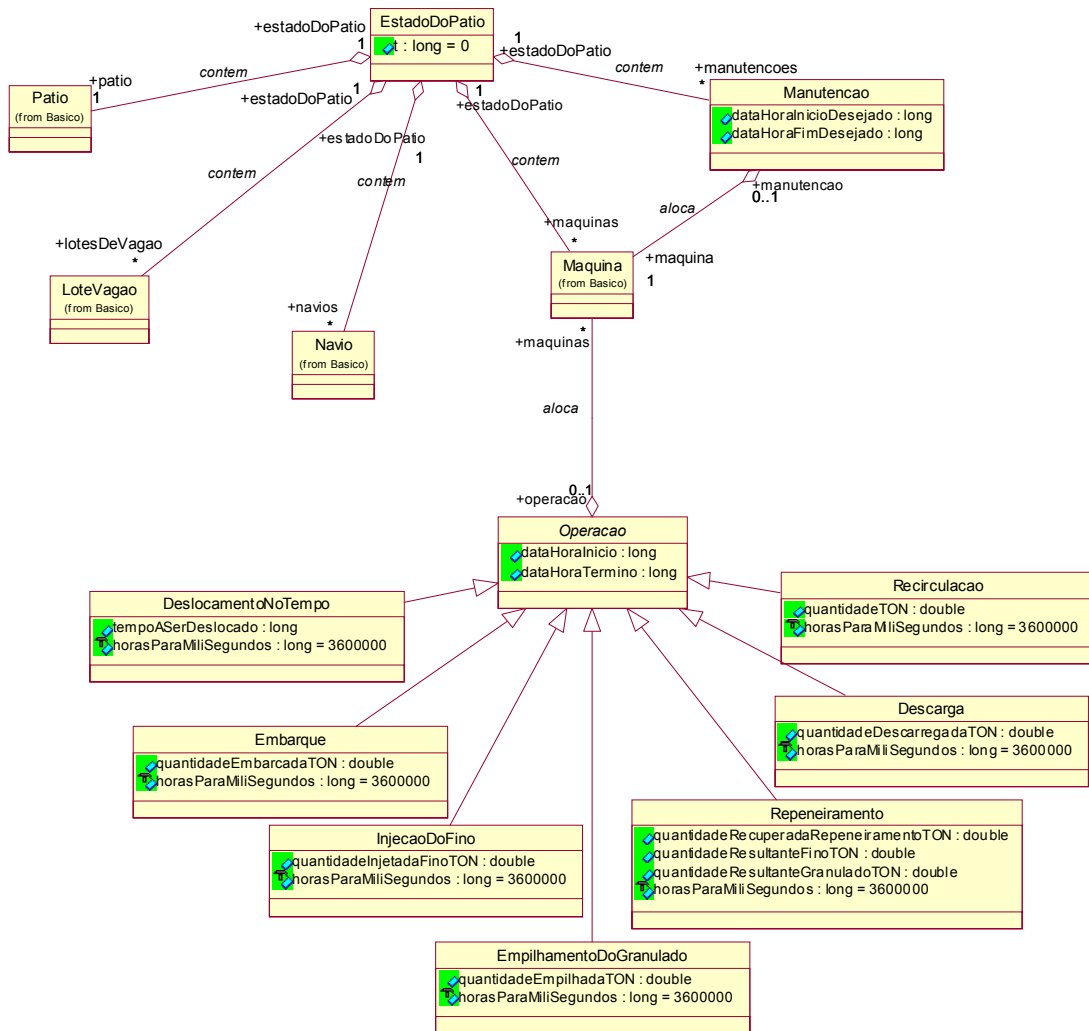


Figura 5.15 – Modelo conceitual do package Algoritmo

c) Alocação de responsabilidades e modelos de interações: nesta terceira e última etapa, tarefas e responsabilidades são alocadas aos vários componentes de *software* da aplicação de forma a atender aos processos necessários definidos anteriormente. Além disso, os componentes de *software* devem comunicar-se uns com os outros, colaborando e interagindo de forma a cumprir as funções que lhes foram delegadas. A atribuição de responsabilidades aos componentes de *software* e a comunicação entre estes componentes são representadas pelos *diagramas de classe* e de *colaboração*. Estes diagramas apresentam, respectivamente, a definição das classes, com seus atributos e métodos, e o fluxo de mensagens entre os componentes de *software*. Para o problema estudado, as classes representadas no *diagrama de classe* foram modeladas

diretamente a partir dos conceitos apresentadas no *modelo conceitual*. Apesar desta relação direta entre classes e conceitos é preciso observar que as classes referem-se a componentes de *software* enquanto os conceitos referem-se a itens do mundo real.

A especificação de cada uma das etapas descritas acima foi realizada utilizando-se a linguagem de modelagem unificada UML. Esta linguagem, em sua maioria diagramática, foi desenvolvida especificamente para a modelagem de sistemas usando conceitos de orientação a objetos.

Após a especificação das três etapas de análise e desenvolvimento orientados a objeto, os componentes resultantes devem ser implementados, ou codificados, computacionalmente. Para o problema de programação de atividades no pátio esta codificação foi realizada utilizando-se a linguagem computacional Java.

Finalmente, é importante destacar também que as etapas de análise e desenvolvimento foram efetuadas seguindo o modelo de engenharia de *software* em espiral (ou incremental). De acordo com este modelo o ciclo completo das etapas de análise e desenvolvimento é realizado repetidas vezes e em cada novo ciclo são adicionados detalhes que foram desconsiderados em ciclos anteriores até que a modelagem seja considerada satisfatória.

5.4 – Resumo

Neste capítulo foi apresentada a implementação computacional do algoritmo de programação de atividades no pátio de minério descrito no capítulo 4. As principais funcionalidades e algumas interfaces presentes na implementação computacional foram apresentadas e mostrou-se que a modelagem do sistema foi realizada a partir de conceitos de orientação a objetos, seguindo as etapas de análise e desenvolvimento. O capítulo seguinte apresenta alguns resultados obtidos a partir da aplicação do sistema desenvolvido em situações reais.

6 – Resultados de simulação

6.1 – Introdução

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos com a aplicação do sistema computacional desenvolvido ao problema de programação de atividades no pátio de minério. A descrição dos cenários nos quais o sistema é aplicado é feita na seção 6.2. Para avaliar a relevância da utilização do sistema no auxílio à tomada de decisões, os resultados obtidos são comparados com aqueles obtidos pelo especialista no gerenciamento do pátio sem o auxílio do sistema. A seção 6.3 apresenta a forma como as soluções são obtidas pelos especialistas e a seção 6.4 mostra como o sistema pode auxiliar na obtenção destas soluções. Na seção 6.5 um exemplo de simulação é apresentado e a seção 6.6 mostra, ainda, a análise do desempenho computacional do sistema. Todos os resultados apresentados neste capítulo foram baseados em situações reais de aplicação do sistema ao pátio do Porto de Ponta da Madeira, localizado em São Luís, MA, de propriedade da Companhia Vale Do Rio Doce.

6.2 – Descrição dos cenários

Os cenários para os quais o sistema deve propor soluções e auxiliar o tomador de decisões diferem uns dos outros em diversos aspectos como, por exemplo: número e disposição das pilhas no pátio, filas de trens e navios que devem ser atendidas, posição inicial das máquinas, planos de manutenção, etc. No entanto, apesar destas diferenças, de maneira geral todos estes cenários dividem algumas características comuns. Um cenário típico tem as seguintes características:

- a chegada de trens ao pátio ocorre a uma taxa de 6 a 7 trens por dia. Cada trem é formado por 206 vagões e a mina tem como regra compor cada um deles com dois lotes de 103 vagões. Assim, em cada dia de operação do pátio são necessárias, em média, de 12 a 14 descargas de lotes para manter a ferrovia funcionando sem atrasos;
- em média é embarcado um navio por dia em cada um dos píeres. O píer 1, com maior capacidade, geralmente recebe os navios maiores com capacidades totais variando entre 100.000 e 360.000 toneladas. Estes navios são compostos geralmente por duas ou três cargas (navios com mais de três cargas são possíveis, mas raros) e cada uma dessas cargas requer tipicamente a recuperação de 3 ou 4 pilhas presentes no pátio, podendo chegar, para as cargas maiores, até a 6 ou 7 pilhas. As capacidades totais dos navios atracados no píer 2 variam entre 20.000 e 120.000 toneladas e estes navios são geralmente compostos por apenas 1 ou 2

cargas. Como não é possível efetuar embarque simultâneo para o píer 2 – sua capacidade de embarque é de 8000 ton/h, equivalente à capacidade de apenas uma recuperadora – geralmente as cargas são compostas apenas por 1 ou 2 pilhas e somente em raros casos são necessárias mais do que 2 pilhas para completá-las;

- de acordo com uma das metas definidas pela gerência do pátio, deve-se evitar que usina de repeneiramento fique ociosa por longos períodos. A taxa de chegada no porto de produtos que devem ser repeneirados é geralmente de 1 trem por dia, ou seja, 206 vagões. Para evitar atrasos nos embarques e descargas, devido à realização inadequada dos processos envolvidos no repeneiramento, deve-se garantir, a cada dia, a realização de operações de repeneiramento, empilhamento do granulado e injeção do fino suficientes para manterem satisfatório o funcionamento da usina;
- apesar do número e disposição das pilhas no pátio variarem bastante de cenário a cenário é possível identificar algumas características comuns a todos eles. A taxa de chegada de trens de minério ao porto é relacionada diretamente à taxa de saída de minério do porto através das demandas de embarque. No entanto, a mina tem restrições de produção mínima e, assim, em períodos de baixa demanda os cenários caracterizam-se geralmente por pátios cheios. Nestes casos, encontrar espaço para a criação de novas pilhas pode tornar-se o principal problema no gerenciamento do pátio. Já em períodos de alta demanda, ou após o embarque de um navio de grandes proporções, o pátio fica relativamente vazio e a principal dificuldade neste caso é encontrar pilhas suficientes para ao atendimento dos embarques seguintes. O gerenciamento adequado do pátio, tanto em situações de pátio cheio quanto em situações de pátio vazio, está diretamente relacionado à disposição das pilhas no pátio nestas situações, ou seja, está diretamente relacionado a quão fragmentado o pátio encontra-se no momento.

6.3 – Programação de atividades pelo especialista

Para resolver o problema de gerenciamento dos recursos do pátio o especialista utiliza a estratégia de planejar com antecedência todas as decisões a serem tomadas em um determinado horizonte de tempo. Neste caso, por exemplo, a decisão sobre quais empilhadeira e pilha utilizar na descarga de um lote não acontece no instante em que o lote efetivamente chega ao pátio; esta descarga foi planejada com antecedência, juntamente com as outras operações necessárias ao gerenciamento do pátio no horizonte de tempo escolhido.

Este planejamento antecipado das atividades torna possível analisar o impacto no pátio de cada operação para todo o período programado. Assim, operações que, em um determinado instante, pareceriam as mais adequadas são descartadas já que sua realização tornaria impossíveis ou inadequadas a realização de outras operações necessárias ao gerenciamento do pátio dentro do horizonte de tempo desejado.

Apesar da programação antecipada das operações ser essencial no gerenciamento adequado do pátio, essa abordagem tem também suas desvantagens. Se tudo ocorrer como planejado, as operações são realizadas de acordo com as programações e o comportamento resultante do pátio é aquele previsto durante o processo de planejamento. No entanto, vários dos elementos do pátio utilizados no cumprimento das atividades planejadas estão sujeitos a distúrbios e interferências muitas vezes imprevistos. Quebras de equipamentos (máquinas, carregadores de navios, viradores de vagões, correias transportadoras) podem ser frequentes, assim como atrasos na chegada prevista de trens ou navios. Na maioria destes casos, onde é impossível efetuar todas as atividades da maneira como foram planejadas, pequenos ajustes nas programações tornam factível sua realização. No entanto, podem ocorrer situações onde toda a programação é invalidada e torna-se necessário repetir todo o processo de planejamento das atividades.

O horizonte de tempo escolhido pelo tomador de decisões para a programação das atividades no pátio é limitado exclusivamente pelo tempo gasto no processo de planejamento. Na seção anterior foi descrito um cenário típico para o qual a programação de atividades deve ser realizada. Para este cenário típico devem ser realizadas por dia de 12 a 14 descargas. Além de decidir como será feita cada uma destas descargas o especialista deve decidir também como será caracterizado cada um dos embarques, tendo sempre em mente critérios de decisão como, por exemplo, qualidade e tempo de residência adequados para cada pilha, minimização dos deslocamentos das máquinas, embarques e descargas simultâneos, liberação de áreas para empilhamento, etc. É fácil perceber, desta forma, que a programação de descargas e embarques, mesmo para períodos de tempo curtos como um dia, é uma tarefa bastante complexa. Não se deve esquecer que, além de caracterizar as operações de embarque e descarga, o especialista deve também procurar encaixar, durante os intervalos entre estas operações, a realização de repeneiramentos, empilhamentos do granulado, injeções de fino e recirculações.

Devido à complexidade na geração da programação de atividades e freqüente necessidade de reprogramações, o horizonte de tempo escolhido pelo especialista geralmente é de apenas 2 ou 3 dias, o que torna bastante limitada a análise do impacto de cada operação a longo prazo. Durante o planejamento das programações o especialista conta com o auxílio de uma ferramenta gráfica que permite a visualização da situação do pátio e a realização de verificações simples de consistência das operações planejadas, evitando, assim, erros desnecessários. Para um horizonte de 3 dias, mesmo com o auxílio desta ferramenta gráfica, são necessárias de 4 a 5 horas de trabalho para planejar toda a programação.

6.4 – Programação de atividades com o auxílio do sistema desenvolvido

Ao utilizar o sistema desenvolvido no apoio às suas tomadas de decisão o especialista deve ter sempre em mente o compromisso entre tempo disponível para a execução do algoritmo e tamanho do espaço de estados pesquisado. Com a configuração dos parâmetros da busca o especialista pode enfatizar tanto a busca de soluções rápidas

com a pesquisa de um espaço de estados reduzido quanto uma pesquisa mais completa com exigências maiores em termos de tempo de execução.

Com a escolha dos parâmetros de profundidade e largura máximas o especialista define a qualidade dos resultados e tempo de execução para cada uma das subárvores que compõem a busca e com a escolha do número de subárvores pesquisadas é definido o horizonte de tempo para o qual a busca é efetuada.

Com a escolha do horizonte de tempo para a busca o especialista pode, então, utilizar o sistema de duas maneiras ligeiramente distintas:

a) No primeiro caso, o especialista escolhe um horizonte de tempo semelhante àquele utilizado em suas programações sem o auxílio do sistema, ou seja, 2, 3 ou até 4 dias. Neste caso, o espaço de busca pesquisado pelo algoritmo é o mesmo considerado pelo especialista e, como as regras utilizadas na construção dos operadores são baseadas diretamente naquelas aplicadas pelo especialista, os resultados obtidos pelo sistema têm praticamente as mesmas características daqueles obtidos pelo especialista trabalhando sozinho.

A vantagem, neste caso, é com relação à velocidade com que as soluções são obtidas. Vários testes de aplicação do sistema em diversas situações práticas foram realizados e observou-se que um bom equilíbrio entre tempo de execução e qualidade dos resultados é obtido quando os parâmetros de largura e profundidades máximas para cada subárvore da busca são configurados com valores em torno de 4 e 8, respectivamente. Dependendo da organização das pilhas no pátio e da disposição das filas de trens e navios, observou-se que são geralmente necessárias entre 5 a 15 subárvores para cobrir o intervalo de 1 dia de programação. Tipicamente este valor está em torno de 10 subárvores. Para uma programação de 3 dias, portanto, são necessárias em média 24 subárvores de largura e profundidade máximas 4 e 8, respectivamente. O tempo necessário para pesquisar este espaço de busca depende diretamente da configuração de *hardware* utilizada, mas pode-se dizer que com as configurações mais comuns disponíveis atualmente a pesquisa é realizada em um intervalo de poucos minutos (a seção 6.5 apresenta uma análise mais detalhada do desempenho computacional do algoritmo).

Ao ser executado para horizontes de tempo de 2 ou 3 dias, portanto, o algoritmo propõe soluções parecidas com aquelas encontradas pelo especialista. Os ganhos em relação ao tempo gasto na tarefa, no entanto, justificam plenamente sua aplicação. É interessante observar também que nos casos onde não é possível realizar as programações planejadas (devido a quebra de máquinas, atrasos nas chegadas dos navios e trens, etc.), soluções alternativas podem ser obtidas rapidamente através da execução do algoritmo.

b) No segundo caso, o especialista executa o algoritmo permitindo um horizonte de tempo maior para a pesquisa. Neste caso, o sistema leva mais tempo para encontrar as soluções, mas os resultados são mais significativos em termos do gerenciamento do pátio a longo prazo. De fato, os resultados obtidos pelo algoritmo podem ser significativamente diferentes dos obtidos pelo especialista sozinho já que, com a pesquisa de um horizonte de tempo maior, o algoritmo pode escolher alternativas que não sejam as mais

apropriadas a curto prazo, mas que encontrem um compromisso entre o gerenciamento do pátio a curto e longo prazos. Além disso, a utilização na avaliação dos estados de critérios de fragmentação e vizinhança temporal (seção 4.4) contribuem para uma distribuição mais organizada das pilhas no pátio quando os resultados obtidos pelo algoritmo são aplicados a longo prazo. Geralmente estão disponíveis e bem definidas as filas de navios e trens para períodos de aproximadamente 15 dias e, portanto, o algoritmo pode ser executado para este horizonte de tempo. O tempo de execução do algoritmo para este período, utilizando as configurações de parâmetros dada anteriormente, é geralmente da ordem de vários minutos (depende do *hardware* utilizado), mas dificilmente chega a ser maior que uma hora.

Uma terceira forma possível de se utilizar o sistema não foi suficientemente pesquisada até o momento. Trata-se de sua utilização como ferramenta para avaliação do impacto causado por alterações nas características dos elementos presentes no pátio, assim como pela inclusão de novos elementos. A gerência do pátio pode desejar avaliar, por exemplo, os benefícios resultantes da aquisição de novas máquinas ou da ampliação das áreas de armazenagem de minérios e, desta forma, decidir se os investimentos são válidos. É evidente que os resultados obtidos somente por este sistema não são suficientes para justificar completamente o investimento já que, nesta situação, os impactos resultantes da inclusão de novos equipamentos devem ser avaliados por períodos de vários meses, ou mesmo por vários anos. No entanto, a execução do algoritmo para períodos de alguns dias seria útil para visualizar como os novos elementos seriam integrados ao dia-a-dia de funcionamento do pátio.

6.5 – Exemplo de simulação

Para ilustrar como o sistema apresenta ao usuário as soluções obtidas será apresentado a seguir um exemplo de aplicação em uma situação real. A figura 6.1 apresenta o estado inicial da busca, correspondendo ao estado do pátio no dia 05 de dezembro de 2001, às 07:49.

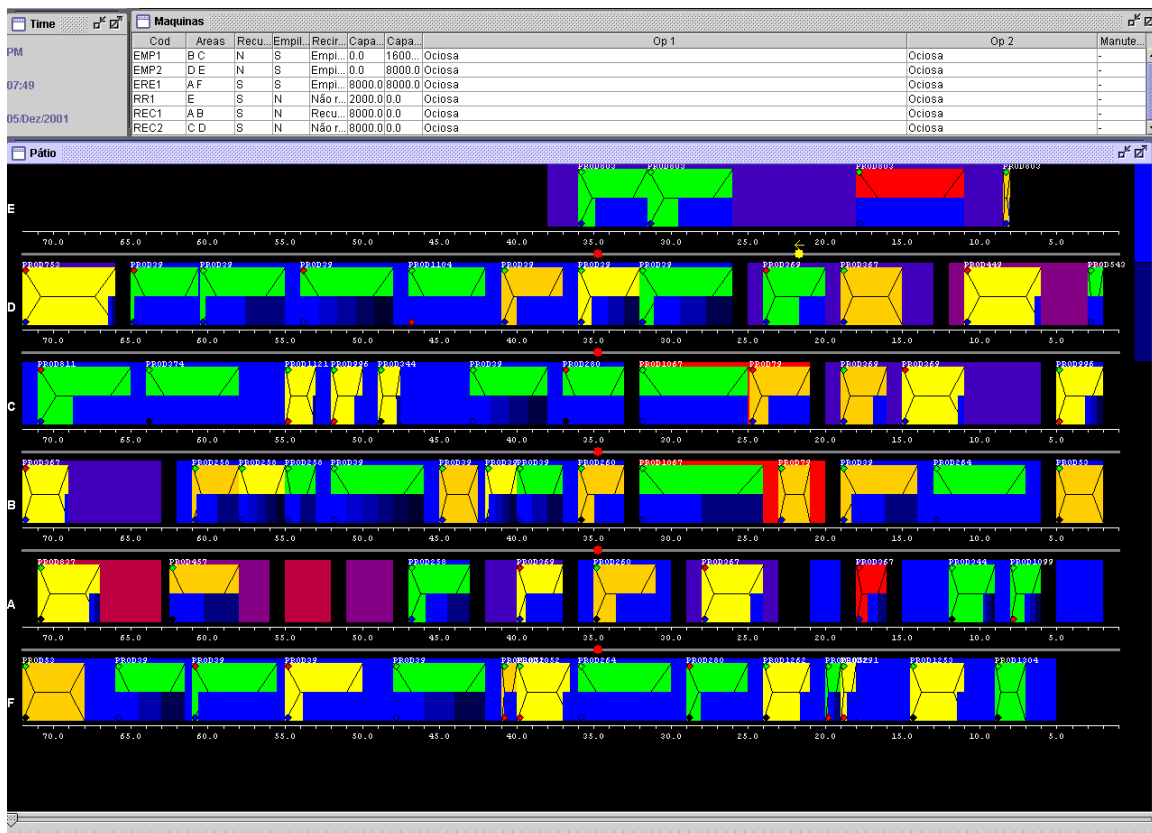


Figura 6.1 – Estado inicial da busca

O algoritmo foi executado, então, para um horizonte de um dia de simulação e o estado final obtido é apresentado na figura 6.2. Este estado representa o pátio no dia 06 de dezembro de 2001, às 07:59.

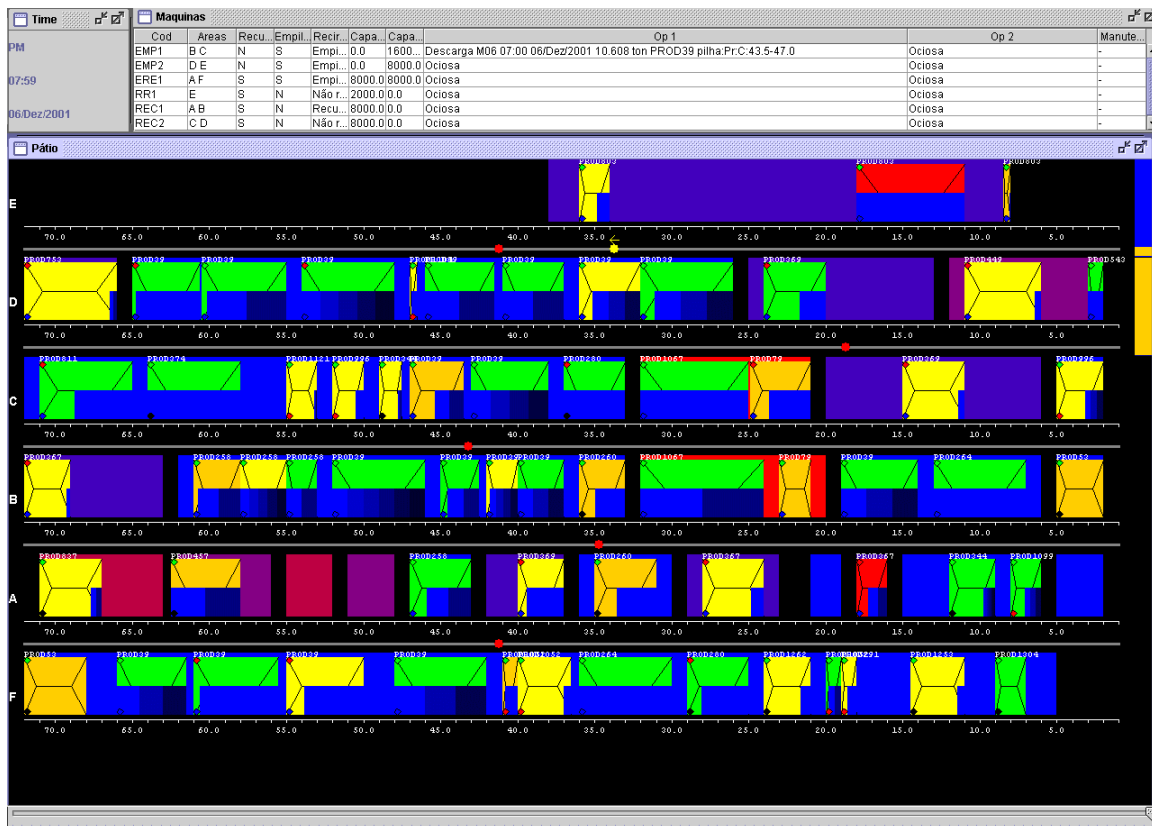


Figura 6.2 – Estado final da busca

A programação de operações que levaram o pátio de seu estado inicial (figura 6.1) a seu estado final (figura 6.2) é apresentada, em parte, na figura 6.3. A visualização das características e ordenação das operações aplicadas ao pátio pode ser considerada como uma outra forma de se apresentar o caminho entre os estados inicial e final.

Operações							
Início	Término	Operacao	Recurso 1	Origem	Destino	Massa	
2001-12-05 10:49:08	2001-12-05 12:03:18	Descarga	EMP1	M06 08:36 05/Dez/2001 : 10:49...	B380	7.382,33	
2001-12-05 10:50:06	2001-12-05 11:21:20	Injeção do fino	EMP1	Pulmão fino	B380	1.041,07	
2001-12-05 11:21:20	2001-12-05 11:36:23	Empilhamento do granulado	EMP2	Pulmão gran.	D301	1.003,53	
2001-12-05 12:12:18	2001-12-05 12:28:52	Empilhamento do granulado	EMP2	Pulmão gran.	D301	1.104,86	
2001-12-05 12:12:18	2001-12-05 13:16:41	Repeneiramento	RR1	E353	Pulmões	2.146,37	
2001-12-05 13:16:41	2001-12-05 13:37:36	Empilhamento do granulado	EMP2	Pulmão gran.	D301	1.395,03	
2001-12-05 13:16:41	2001-12-05 13:41:35	Repeneiramento	RR1	E353	Pulmões	830,40	
2001-12-05 14:10:01	2001-12-05 15:24:44	Embarque	REC2	C249	NAVO : 10:20 0...	7.031,00	
2001-12-05 15:24:44	2001-12-05 16:17:46	Embarque	REC2	D301	NAVO : 10:20 0...	7.018,72	
2001-12-05 17:02:00	2001-12-05 18:19:57	Descarga	EMP2	M08 16:42 05/Dez/2001 : 17:02...	D300	10.393,...	
2001-12-05 17:02:00	2001-12-05 17:57:01	Injeção do fino	EMP2	Pulmão fino	D300	1.834,23	
2001-12-05 17:22:00	2001-12-05 18:19:09	Repeneiramento	RR1	E353	Pulmões	1.905,51	
2001-12-05 17:57:01	2001-12-05 18:16:30	Empilhamento do granulado	ERE1	Pulmão gran.	PrA:40.5-42.0	1.298,78	
2001-12-05 18:19:09	2001-12-05 19:38:50	Repeneiramento	RR1	E353	Pulmões	2.656,11	
2001-12-05 19:20:00	2001-12-05 19:51:22	Empilhamento do granulado	ERE1	Pulmão gran.	PrA:40.5-42.0	2.091,22	
2001-12-05 19:20:00	2001-12-05 20:38:14	Descarga	EMP2	M10 19:00 05/Dez/2001 : 19:20...	PrD:41.5-46.0	10.432,...	
2001-12-05 19:38:50	2001-12-05 19:59:17	Repeneiramento	RR1	E353	Pulmões	681,60	
2001-12-05 19:51:22	2001-12-05 20:38:14	Injeção do fino	EMP2	Pulmão fino	PrD:41.5-46.0	1.562,22	
2001-12-05 19:51:22	2001-12-05 20:14:34	Embarque	ERE1	PrA:40.5-42.0	NAVO : 10:20 0...	3.095,67	
2001-12-05 19:59:17	2001-12-05 20:21:53	Repeneiramento	RR1	E353	Pulmões	753,69	
2001-12-05 20:21:53	2001-12-05 21:15:27	Repeneiramento	RR1	E353	Pulmões	1.785,60	
2001-12-05 20:38:14	2001-12-05 21:03:37	Empilhamento do granulado	ERE1	Pulmão gran.	PrA:40.5-42.0	1.693,25	
2001-12-05 20:38:14	2001-12-05 21:58:46	Descarga	EMP2	M92 19:20 05/Dez/2001 : 19:40...	PrD:41.5-46.0	10.737,...	
2001-12-05 21:03:37	2001-12-05 21:39:14	Injeção do fino	EMP2	Pulmão fino	PrD:41.5-46.0	1.187,39	
2001-12-05 21:15:27	2001-12-05 22:02:57	Repeneiramento	RR1	E353	Pulmões	1.583,40	
2001-12-05 21:39:14	2001-12-05 21:59:28	Empilhamento do granulado	ERE1	Pulmão gran.	PrA:40.5-42.0	1.349,00	
2001-12-05 21:59:28	2001-12-05 22:22:05	Embarque	ERE1	PrA:40.5-42.0	NAVO : 10:20 0...	3.014,56	
2001-12-05 22:02:57	2001-12-05 23:35:03	Repeneiramento	RR1	E352	Pulmões	3.056,71	
2001-12-05 22:15:00	2001-12-05 23:31:34	Descarga	EMP2	M14 21:55 05/Dez/2001 : 22:15...	PrD:41.5-46.0	10.210,...	
2001-12-05 22:35:00	2001-12-05 23:06:57	Injeção do fino	EMP2	Pulmão fino	PrD:41.5-46.0	1.065,17	
2001-12-05 23:06:57	2001-12-05 23:35:25	Empilhamento do granulado	ERE1	Pulmão gran.	PrA:40.5-42.0	1.899,08	
2001-12-05 23:35:03	2001-12-06 01:02:42	Repeneiramento	RR1	E352	Pulmões	2.921,67	
2001-12-06 00:39:00	2001-12-06 01:08:47	Empilhamento do granulado	ERE1	Pulmão gran.	PrA:40.5-42.0	1.986,14	
2001-12-06 00:39:00	2001-12-06 01:56:29	Descarga	EMP2	M02 00:19 06/Dez/2001 : 00:39...	PrD:41.5-46.0	10.333,...	
2001-12-06 01:02:42	2001-12-06 01:26:48	Repeneiramento	RR1	E352	Pulmões	803,69	
2001-12-06 01:08:47	2001-12-06 01:56:29	Injeção do fino	EMP2	Pulmão fino	PrD:41.5-46.0	1.590,00	
2001-12-06 01:08:47	2001-12-06 01:37:55	Embarque	ERE1	PrA:40.5-42.0	NAVO : 10:20 0...	3.885,22	
2001-12-06 01:26:48	2001-12-06 02:18:17	Repeneiramento	RR1	E352	Pulmões	1.716,23	
2001-12-06 01:56:29	2001-12-06 02:21:39	Empilhamento do granulado	EMP1	Pulmão gran.	PrC:15.5-19.5	1.678,08	
2001-12-06 02:18:17	2001-12-06 03:04:16	Repeneiramento	RR1	E352	Pulmões	2.732,69	
2001-12-06 03:32:00	2001-12-06 04:48:55	Descarga	EMP1	M04 03:12 06/Dez/2001 : 03:32...	PrC:43.5-47.0	10.256...	

Figura 6.3 – Programação de operações

Além das operações aplicadas ao pátio, o sistema apresenta, também, um gráfico mostrando a ocupação das máquinas nas diferentes operações durante o período simulado. Para o período de um dia de simulação, apresentado nesta seção, o gráfico de ocupação das máquinas é mostrado na figura 6.4.

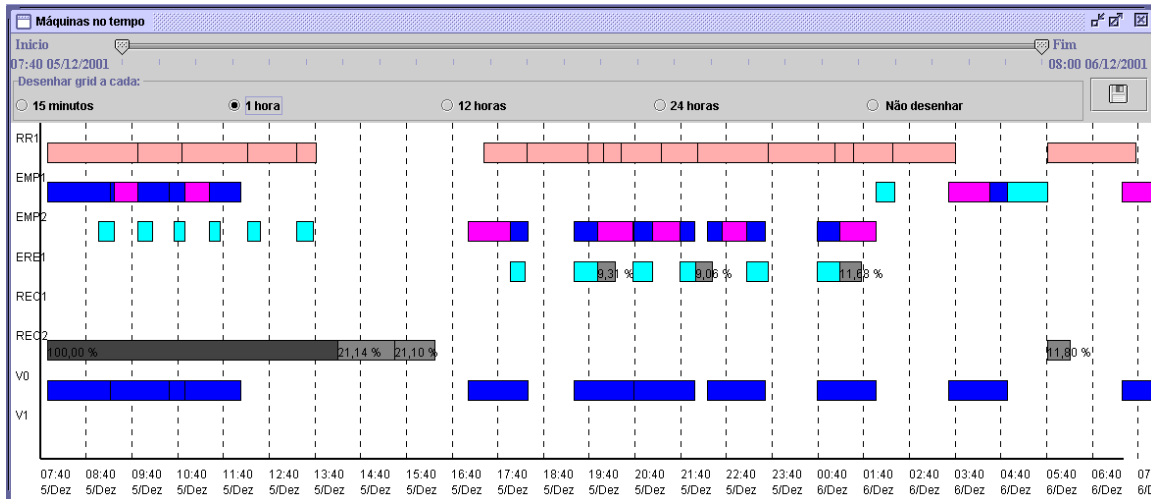


Figura 6.4 – Gráfico de ocupação das máquinas

6.6 – Análise de desempenho computacional

Para a análise de desempenho computacional foi utilizado um Pentium III de 550MHz, com Windows NT e 256Mb de RAM. Com esta configuração o algoritmo foi rodado diversas vezes para cenários diferentes e os dados colhidos são apresentados na tabela 6.1:

Medida	Valor	Descrição
t_o	4.14 ms	tempo médio para a criação e avaliação dos operadores
t_e	5.10 ms	tempo médio para a geração e avaliação de um novo estado através da aplicação de um operador

Tabela 6.1 – Medidas de tempo de processamento

Definindo b como o número máximo de operadores aplicados a cada estado e d como a profundidade máxima de cada subárvore, então para um estado S qualquer o tempo consumido na geração de todos os operadores aplicáveis a S é dado por t_o e o tempo consumido para gerar novos estados a partir de S é dado por bt_e . Assim, o tempo total consumido em uma busca exaustiva em uma árvore com profundidade d e largura b é dado por:

$$t_{total} = t_o (b^0 + b^1 + \dots + b^{d-1}) + t_e (b^1 + b^2 + \dots + b^{d-1})$$

e a tabela 6.2 mostra valores de t_{total} em minutos para alguns valores de b e d :

	$d=2$	$d=4$	$d=6$	$d=8$	$d=10$	$d=12$
$b=1$	0.00038	0.00099	0.00198	0.00315	0.00469	0.00654
$b=2$	0.00130	0.01116	0.07029	0.385689	1.96265	9.53205
$b=3$	0.00284	0.05274	0.72633	8.80949	99.74495	1081.84791
$b=4$	0.00499	0.16269	3.94739	84.68775	1699.49479	32703.78996
$b=5$	0.00777	0.39277	14.83027	496.08027	15535.14277	466707.01777
$b=6$	0.01116	0.80949	43.91963	2113.20656	95231.11759	4117924.87451

Tabela 6.2 – Tempo total de processamento

Os valores apresentados na tabela acima são obtidos com a busca exaustiva em uma árvore de profundidade e largura máximas d e b , respectivamente, e representam, assim, os tempos de execução para o pior caso. No caso geral, a busca informada torna desnecessária a busca em toda a árvore e os tempos de execução são consideravelmente menores.

6.5 – Resumo

Neste capítulo foram apresentados os resultados da aplicação em situações práticas da implementação computacional do algoritmo de programação de atividades no pátio. Os cenários típicos aos quais o algoritmo é aplicado foram descritos e a os resultados propostos pelo algoritmo foram comparados àqueles obtidos pelo especialista trabalhando sem o auxílio da ferramenta. Além disso, um exemplo de simulação foi apresentado e a análise de desempenho computacional mostrou que a aplicação do algoritmo é factível em termos de tempo de execução.

7 - Conclusão

O principal objetivo deste trabalho foi obter soluções para o problema de gerenciamento dos recursos do pátio de minério de forma a atender a uma série de objetivos de decisão, sem deixar de respeitar as restrições físicas e operacionais impostas.

Para isso foi desenvolvido um modelo de busca em espaço de estado, utilizando na construção dos estados as informações relevantes à representação do pátio em cada instante de tempo. Os operadores foram modelados a partir das diversas operações responsáveis por todo o fluxo minério no pátio e um algoritmo de busca informado com profundidade limitada foi aplicado na busca de soluções. As funções de avaliação dos estados foram construídas baseadas principalmente no conhecimento dos especialistas no gerenciamento do pátio, além de incorporar, também, algumas heurísticas que favorecem a organização do pátio a longo prazo. Mesmo com a caracterização adequada dos estados, operadores e função de avaliação, o espaço de estados resultante mostrou-se bastante vasto, tornando a busca ineficiente. Assim, com o objetivo de impor limites adicionais ao espaço de busca pesquisado, foram desenvolvidas também funções de avaliação de operadores. Apesar do algoritmo resultante não ser *completo* e nem *ótimo*, sua aplicação a situações reais mostrou-se bastante satisfatória, cumprindo o objetivo de auxiliar o tomador de decisões em sua tarefa de gerenciamento dos recursos do pátio.

Quatro principais pontos destacam-se como oportunidades para desenvolvimentos futuros do trabalho:

- a) desenvolvimento de algoritmos *ótimos* e *completos*: o desenvolvimento de algoritmos *ótimos* e *completos* como o A^* , por exemplo, não foi possível devido ao fato de que não foram encontradas heurísticas que atendessem às condições necessárias para esta categoria de algoritmos. Além disso, a grande quantidade de restrições e objetivos de decisão, muitas vezes conflitantes entre si, torna complexa a tarefa de definir – e, portanto, encontrar – soluções ótimas. Futuras pesquisas podem ser direcionadas, assim, às tarefas de definir soluções ótimas para o problema, assim como encontrar as heurísticas necessárias na busca por essas soluções;
- b) aumento de eficiência do algoritmo: mesmo sem encontrar heurísticas apropriadas para o desenvolvimento de algoritmos *ótimos* e *completos*, ainda assim é possível aplicar técnicas para melhorar a eficiência computacional do algoritmo. Desta forma, o espaço de estado pesquisado pode ser aumentado exigindo menores tempos de processamento. Uma sugestão é aplicar ferramentas de paralelização do algoritmo, executando partes diferentes da mesma busca em diversos processadores ao mesmo tempo;

- c) estudo mais sistematizado das características das funções de avaliação dos operadores e dos algoritmos que utilizariam estas funções, já que isso não foi encontrado em parte alguma na literatura;
- d) sistematização e generalização da solução apresentada para o pátio estudado de forma a permitir sua aplicação a uma classe maior de problemas.

Referências bibliográficas

- [1]. J. E. Everett, 1997. Simulation to reduce variability in iron stockpiles. *Mathematics and Computers in Simulation*, 43, pp. 563-568.
- [2]. J. E. Everett, 2001. Iron ore production scheduling to improve product quality. *European Journal of Operational Research*, 129, pp. 355-361.
- [3]. Chiang Kao, Der-Chiang Li, Chihsen Wu and Chih-Chang Tsai, 1990. Knowledge-based approach to the optimal dock arrangement. *Int. J. Systems Science*. Vol. 21, no. 11, pp. 2209-2215.
- [4]. Chiang Kao, Chihsen Wu, Der-Chiang Li, and Chih-Yan Lai, 1992. Scheduling ship discharging via knowledge transformed heuristic evaluation function. *Int. J. Systems Science*. Vol. 23, no. 4, pp. 631-639.
- [5]. Judea Perl, 1985. *Heuristics – Intelligent Search Strategies for Computer Problem Solving*, Addison-Wesley Publishing Company
- [6]. Grady Booch, Ivar Jacobson, James Rumbaugh, Jim Rumbaugh, 1998. *The Unified Modeling Language User Guide*, Addison-Wesley Publishing Company
- [7]. Craig Larman, 1997. *Applying UML and Patterns: An Introduction to Object-Oriented Analysis and Design*, Prentice Hall.
- [8]. Stuart Russel, Peter Norvig, 1995. *Artificial Intelligence, A Modern Approach* – Prentice Hall.
- [9]. Andrew S. Tanenbaum, Albert S. Woodhull, 1997. *Operating Systems: Design And Implementation*, Prentice Hall.
- [10] Thomas E. Morton, David W. Pentico, 1993. *Heuristic Scheduling Systems, With Applications to Production Systems and Project Management*, John Wiley & Sons.
- [11] Witold Pedrycz, Fernando Gomide, 1998. *An Introduction To Fuzzy Sets*, MIT Press.
- [12] Donald E. Knuth, 1973. *The Art of Computer Programming, Volume 3*, Addison-Wesley.
- [13] A.N. Habermann, 1976. *Introduction to Operating System Design*, Science Research Associates.