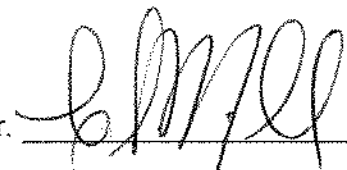


“Modelagem matemática de um sistema de produção e transporte de minério de ferro”

Este exemplar corresponde à redação final da tese devidamente corrigida e defendida pelo Sr. Marcos de Aguiar Nóbrega e aprovada pela Comissão Julgadora.

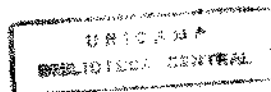
Campinas, 08 de novembro de 1996.

Prof. Dr.



Clovis Perin Filho

Dissertação apresentada ao Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica, UNICAMP, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Matemática Aplicada.



UNIDADE	PC
N.º CHAVADA:	UNICAMP
V.	N669m
TÍTULO	29.876
PROC.	281/97
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	09/04/97
N.º CPD	

CM-00099313-1

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DO IMECC DA UNICAMP**

Nóbrega, Marcos de Aguiar

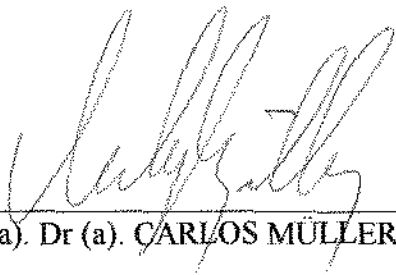
N669m Modelagem matemática de um sistema de produção e transporte de minério de ferro / Marcos de Aguiar Nóbrega -- Campinas, [S.P. :s.n.], 1996.

Orientador : Clovis Perin Filho

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica.

1. Pesquisa operacional. 2. Programação linear. 3. Otimização matemática. 4. Indústria mineral. I. Perin Filho, Clovis. II. Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica. III. Título.

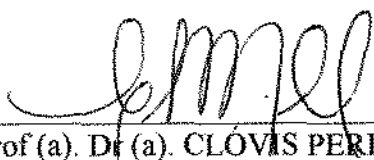
Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 08 de novembro de 1996 pela Banca Examinadora composta pelos Profs. Drs.:



Prof (a). Dr (a). CARLOS MÜLLER



Prof (a). Dr (a). MARCIA APARECIDA GOMES RUGGIERO



Prof (a). Dr (a). CLOVIS PERIN FILHO

À minha família

Agradecimentos

O desenvolvimento desse texto contou com a orientação e a crítica do Prof. Clovis Perin Filho.

O Prof. Miguel Taube Netto fez a concepção inicial da modelagem matemática.

O Prof. Carlos Müller, Alexandre Barros e Eliézer Costa forneceram diversas sugestões durante a construção dos modelos matemáticos.

Os recursos computacionais da UniSoma Matemática para Produtividade S.A. foram utilizados em todas as etapas do projeto. O empenho de Glauco Leal e Suely Abasto no desenvolvimento das interfaces e dos relatórios permitiu a validação mais rápida dos modelos. Eli Madureira digitalizou algumas figuras.

A Companhia Vale do Rio Doce cedeu com presteza as informações necessárias ao desenvolvimento dos modelos e, antes disso, percebeu que eles seriam oportunos.

O Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) concedeu suporte financeiro ao meu programa de mestrado em Campinas.

Sumário

Capítulo 1	Descrição do Problema	1
1 -	Introdução	1
2 -	Pesquisa bibliográfica	4
3 -	Sistema integrado de produção e transporte de minério	5
4 -	Minério de ferro	11
4.1 -	Propriedades físico-químicas	12
4.2 -	Minério ROM	13
4.3 -	Minérios operacionais	13
4.4 -	Minérios comerciais	14
5 -	Planejamento de curto prazo do Sistema Sul	15
Capítulo 2	Modelos do Planejamento de Curto Prazo	20
1 -	Período de operação de pilha	20
1.1 -	Estocagem de minério comercial no porto	20
1.2 -	Modelo	23
1.3 -	Dia de início de construção da pilha	25
2 -	Planejamento integrado de curto prazo	26
2.1 -	Restrições das minas	29
2.2 -	Restrições da ferrovia	37
2.3 -	Restrições do porto	42
2.4 -	Restrições de qualidade e quantidade de minérios comerciais	50
2.5 -	Função objetivo	56

Capítulo 3	Implementação Computacional	62
1 - Problema reduzido		62
1.1 - Descrição		63
1.2 - Resultados		66
2 - Variações do problema		76
2.1 - Manutenção da via		76
2.2 - Inclusão de nova pilha na demanda		78
3 - Problema de tamanho real		79
3.1 - Programa inteiro		80
3.2 - Programa linear		80
Capítulo 4	Conclusões e Comentários	82
Apêndice A	Códigos dos Modelos	85
1 - Programa inteiro		85
2 - Programa linear		90
Apêndice B	Relatórios do Primeiro Cenário	113
Apêndice C	Relatórios do Segundo Cenário	126
Apêndice D	Relatórios do Terceiro Cenário	139
Bibliografia		152

Resumo

Um sistema de produção e transporte de minério de ferro é constituído por um conjunto de minas, por um porto e por uma ferrovia que liga as minas ao porto. Em cada mina são produzidos diversos tipos de minério, diferenciados por suas especificações físico-químicas. O minério transportado para o porto é misturado em pilhas, e as especificações dessas misturas são limitadas de acordo com os tipos de minério que serão embarcados nos navios. Cada pilha deve ser construída até a data de chegada do navio que vai embarcá-la.

Neste trabalho são desenvolvidos modelos de programação matemática que orientam o planejamento de curto prazo de um sistema de produção e transporte de minério de ferro. A modelagem contém restrições de produção e estocagem nas minas, de capacidades de transporte na ferrovia, de capacidades de descarga e estocagem no porto e de especificações das pilhas no porto. O objetivo é, primeiramente, minimizar o atraso na construção das pilhas, e, em seguida, minimizar os custos variáveis de produção e transporte no sistema.

Abstract

A production and transportation iron ore system is composed by a set of mines, a port and railroad links from the mines to the port. Many types of ore are produced in each mine, and they differ in their physical and chemical specifications. The ore that is transported to the port is blended in piles. Blend specifications are set according to the ship loads. Each pile must be built until the arrival of the ship that will carry it.

Mathematical programming models for the short term planning of a production and transportation iron ore system have been developed in this work. The modeling has production and inventory constraints at the mines, transportation capacity constraints at the railroad, rail car unloading and inventory capacity constraints at the port, as well as pile specification constraints also at the port. The objective is, firstly, to minimize the pile construction delay, and secondly, to minimize the system's production and transportation variable costs.

Capítulo 1

Descrição do Problema

1 - Introdução

A vasta utilização de aço e ferro fundido provocou a criação de grandes sistemas de exploração de minério de ferro no mundo, que alimentam os vários complexos siderúrgicos e metalúrgicos existentes.

O Brasil e a Austrália são os principais exportadores de minério de ferro no mercado mundial. Para escoar o minério das jazidas aos clientes foram construídos sistemas integrados de transporte ferroviário e marítimo. A operação integrada desses sistemas requer um planejamento integrado das operações das unidades desses sistemas.

A Companhia Vale do Rio Doce (CVRD) é a maior produtora de minério de ferro do Brasil. A sua produção atende clientes nacionais e estrangeiros e o seu volume de produção anual é da ordem de 100 milhões de toneladas de minério. A exploração de minério de ferro pela CVRD no Brasil é realizada em dois sistemas, o Sistema Sul e o Sistema Norte, nomeados assim por sua localização geográfica. O Sistema Sul está instalado nos Estados de Minas Gerais e Espírito Santo, Região Sudeste do país, enquanto o Sistema Norte instala-se nos Estados do Pará e Maranhão, Norte e Nordeste do Brasil.

Cada sistema é constituído por unidades como as minas, para extração, processamento e estocagem de minério, uma malha ferroviária, para transporte do minério

das minas ao porto e a outros clientes nacionais, e um porto, onde o minério é de novo estocado e embarcado para o atendimento de clientes no exterior e de clientes nacionais que utilizem via marítima para o recebimento de minério.

O planejamento das operações de um sistema de exploração de minério de ferro é realizado em pelo menos quatro níveis de decisão, das mais estratégicas ao seqüenciamento de operações diárias.

As decisões de longo prazo são tomadas com base nas previsões do comportamento do mercado de minério de ferro e representam a realocação dos recursos já disponíveis ou a realização de investimentos novos. São decisões típicas desse nível de planejamento os dimensionamentos das capacidades de transporte (venda ou aquisição de vagões e locomotivas, duplicação de um trecho da malha ferroviária), de descarga, estocagem e embarque no porto e de produção de cada mina.

O planejamento de médio prazo busca estimar os níveis de produção, transporte e embarque de minério ao longo dos meses de um ano, tentando atenuar os efeitos das sazonalidades. Além da sazonalidade da demanda de minério, outras têm influência sobre o sistema: a safra de grãos, que consome capacidade de transporte ferroviário e diminui a capacidade de embarque de minério no porto (os navios que transportam grãos e minérios atracam nos mesmos píeres), e o período de chuvas, que reduz a velocidade dos trens e aumenta a umidade do minério, diminuindo a quantidade transportada de minério por vagão.

O planejamento de curto prazo visa ao detalhamento diário de um programa mensal a bimestral de produção, transporte e embarque de minério. Nesse horizonte, as demandas já são firmes e as capacidades das unidades conhecidas, inclusive considerando-se programas de manutenção. Desse planejamento, resultam programas diários de produção nas minas, de

transporte na ferrovia e de descarga de minério no porto, observando as capacidades do sistema e a evolução dos prazos de entrega de minério ao longo dos dias do período.

O seqüenciamento das operações diárias é a última etapa do planejamento do sistema, e a que é realizada mais independentemente pelas suas unidades. A operação de correias de transporte de minério, de empilhadeiras, de escavadeiras, de silos para carregamento de trens, de píeres para o carregamento de navios e o seqüenciamento de trens nos ramais da malha ferroviária são algumas das decisões tomadas dia a dia e que constituem o nível mais básico do planejamento integrado.

A dimensão econômica dos sistemas e a necessidade de uma atuação integrada de suas unidades estimulam o desenvolvimento de ferramentas matemáticas que apoiem o seu gerenciamento. Quando esse gerenciamento é orientado apenas pela intuição dos seus operadores, a eficiência dos sistemas tende a atingir níveis insatisfatórios. Essas ineficiências ocorrem, por exemplo, através do atraso do embarque de minério para o porto, o que pode implicar em pagamento de multas pela mineradora às companhias de navegação que sofrem atrasos nos seus navios.

O objetivo desse trabalho é o desenvolvimento de modelos matemáticos para direcionar o planejamento de curto prazo das unidades do Sistema Sul da CVRD. São usados recursos de programação matemática, particularmente programação linear e programação inteira. A modelagem é desenvolvida em GAMS (General Algebraic Modeling System) e as rotinas do OSL (Optimization Subroutine Library) são utilizadas para a execução dos algoritmos de otimização. Os modelos são apresentados no Capítulo 2 e exemplos numéricos são discutidos no Capítulo 3.

Esse trabalho foi realizado através de um projeto de desenvolvimento de modelos matemáticos executado pela UniSoma Matemática para Produtividade S.A. para a CVRD. Os modelos foram concebidos e implementados numa etapa compreendida entre dezembro de 1994 e junho de 1995. Numa segunda etapa, entre abril e outubro de 1996, foram aperfeiçoados os modelos, as interfaces e os relatórios, e foram desenvolvidos sistemas que alimentam automaticamente os modelos com informações extraídas dos bancos de dados da companhia. Esses avanços viabilizaram execuções mais rápidas dos modelos, contribuindo decisivamente para a sua validação.

2 - Pesquisa bibliográfica

O planejamento de longo prazo de exploração de uma mina a céu aberto é tratado por Lerchs & Grossmann (1965). A mina é dividida em blocos, e a cada bloco é atribuído um custo de exploração e um valor, função de sua composição mineral. O problema de longo prazo, ou problema do contorno final, consiste em decidir quais blocos são retirados da mina e quais não são, durante todo o período de exploração. O problema está sujeito a um conjunto de restrições geométricas de precedência de extração de blocos e de máximo ângulo de talude admissível. O objetivo do planejamento é maximizar o lucro da mina, que é a soma dos valores dos blocos extraídos subtraída da soma dos custos desses blocos. O problema do contorno final de uma mina a céu aberto é tratado como um problema de fecho máximo de um grafo. Picard (1976) discute aplicações do problema de fecho máximo e aborda o problema de modo formal e simples.

O problema de seqüenciamento de extração dos blocos é tratado por Johnson (1968). O problema contém as restrições geométricas do problema de longo prazo e também

restrições de número de blocos extraídos em cada um dos períodos de exploração da mina e de composição mineral dos blocos extraídos nesses períodos. A solução é desenvolvida através da decomposição do problema, e um método para resolver os subproblemas gerados é apresentado.

Tachefine (1991) também estuda o problema de seqüenciamento de extração de blocos numa mina a céu aberto. Ele também utiliza um método de decomposição do problema, sugere um método de resolução dos subproblemas gerados e prova que esse método de decomposição leva à obtenção da solução ótima do problema proposto.

A formulação do planejamento de curto prazo do Sistema Sul da CVRD como um problema de programação matemática é inicialmente percebida por Taube Netto (1994), que faz uma associação entre o processo de produção de minério de ferro e o problema de formulação de misturas a custo mínimo, usualmente tratado como um problema de programação linear.

3 - Sistema integrado de produção e transporte de minério

A produção de minério de ferro no Estado de Minas Gerais motivou a construção de uma grande infra-estrutura para o seu escoamento e também a construção de usinas siderúrgicas para o seu processamento. A CVRD é a maior mineradora do Quadrilátero Ferrífero, área do estado onde se explora ferro, mas outras mineradoras também possuem minas na região. A atividade de mineração de ferro pela CVRD é concentrada em quatro minas principais: as do Cauê e de Conceição, em Itabira, e as de Capanema e de Timbopeba,

na região de Ouro Preto. Duas minas menores, a de São Luiz, em desativação, e a de Brucutu, em início de produção, também fazem parte do complexo da companhia.

Nas minas, estão localizadas usinas que realizam processos de concentração e classificação de minério após a extração, que é realizada por escavadeiras nas frentes de lavra. O transporte do minério das frentes de lavra, até os britadores que alimentam o sistema de esteiras que levam o minério para as usinas, é feito de caminhão. O minério que sai das usinas é transportado por esteiras para pátios de estocagem e dos pátios o minério é de novo transportado por esteiras para os silos de carregamento de trens.

A CVRD e algumas outras mineradoras utilizam a Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM) para transportar minério de suas minas para o Porto de Tubarão e para algumas siderúrgicas situadas à margem da ferrovia. O minério é carregado nos trens, nos silos localizados nas minas, e descarregado nos viradores de vagões do porto ou das siderúrgicas.

A ferrovia é constituída por dois ramais, Itabira e Fábrica. O ramal de Itabira embarca minério nos pontos de carregamento de João Paulo (Cauê) e Conceição. O ramal de Fábrica embarca minério em diversos pontos, entre eles o de Timbopeba, e também é ligado ao ramal de Capitão Eduardo, que chega até Belo Horizonte. Os dois ramais principais se unem em Desembargador Drummond, e são ligados a Tubarão por uma via de linha dupla. Além de minério, a ferrovia é utilizada para transportar carga geral e passageiros. A figura 1 apresenta um mapa da linha ferroviária.

O Porto de Tubarão é o maior terminal de embarque de minério de ferro do mundo. Dispondo de dois píeres, sendo que um deles com dois berços, o porto permite a atracagem simultânea de até três navios. O minério, que chega ao porto pela ferrovia, é desembarcado em viradores de vagões e transportado por esteiras para as pilhas nos pátios de estocagem. As pilhas de minério são recuperadas nos pátios e de novo transportadas por esteiras para os navios. Estão também localizados no complexo do porto uma unidade de peneiramento de minério e seis usinas de pelletização, que transformam minério fino em pelotas. No Porto de Tubarão, também são embarcados grãos de cereais, que são estocados em silos próprios, mas cujos navios competem com os navios graneleiros de minério, por um dos píeres.

A figura 2 é um esquema do Porto de Tubarão. O minério é descarregado nos viradores de vagões (em verde no esquema) e é transportado por um sistema de esteiras (em marrom) para as usinas de pelletização - rotas SUPEL (Superintendência de Pelotização) saindo das esteiras, para o sistema de peneiramento (em roxo) ou para os pátios de estocagem (em amarelo). A área de estocagem circular, localizada ao lado do sistema de peneiramento, é usada para estocar o minério fino resultante do peneiramento. Os equipamentos utilizados para empilhar o minério nos pátios são chamados de empilhadeiras (em vermelho). As pelotas produzidas nas usinas são estocadas em pátios ao lado das usinas, ou nos pátios grandes do porto. Elas são transportadas para esses pátios através das rotas SUPEL entrando nas esteiras. Os equipamentos que retiram minério das pilhas para alimentar as esteiras que carregam os navios são as recuperadoras de minério (em verde). Alguns equipamentos, as empilhadeiras-recuperadoras, realizam tanto empilhamento quanto recuperação de minério (também em verde). Outros equipamentos, as escravas, funcionam como pontes: recebem minério através de uma empilhadeira, pulam um pátio e empilham o minério no pátio seguinte (em vermelho). Os equipamentos que orientam as esteiras para as bocas dos porões dos navios são os carregadores de navios (em azul).

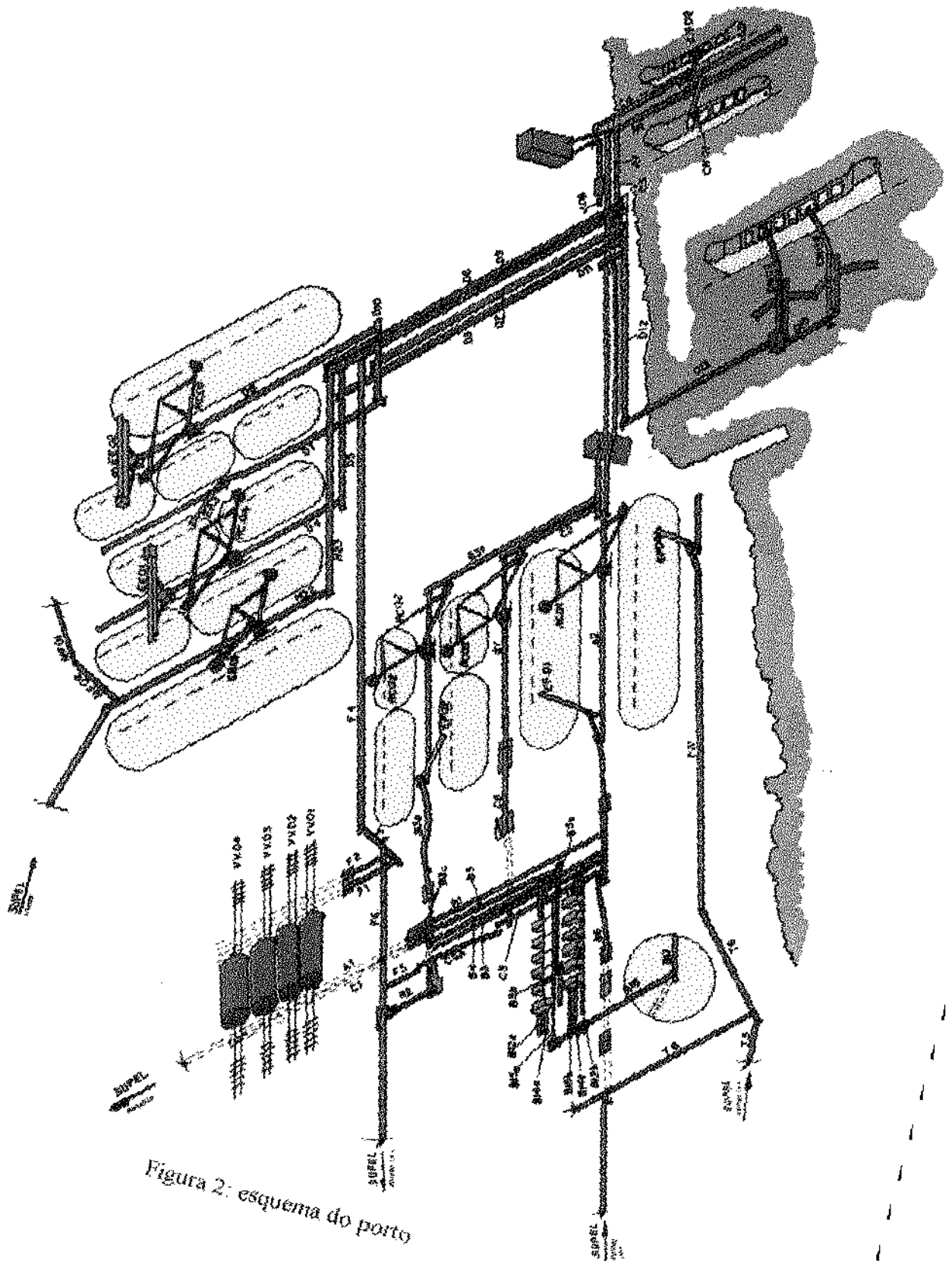


Figura 2: esquema do porto

Constituído pelo Porto de Tubarão, pela EFVM e por algumas minas de ferro em Minas Gerais, o Sistema Sul da CVRD tem um fluxo mensal de minério de aproximadamente seis milhões de toneladas. Esse fluxo representa a produção própria somada à produção de terceiros que são escoadas através dos sistemas de transporte da companhia, para clientes situados ao longo da ferrovia e para o porto.

4 - Minério de ferro

O minério de ferro passa por diversos processamentos desde a frente de lavra até a entrega ao cliente, com o objetivo de regular os teores das suas propriedades físico-químicas. Conforme o minério flui da frente de lavra ao cliente, ele muda de nome: o minério extraído na frente de lavra é chamado de ROM (Run of Mine); após a extração, o minério passa por processos de concentração e classificação em usinas localizadas ao lado das minas, e ao fim desses processos é chamado de minério operacional; o minério que é entregue ao cliente é chamado de minério comercial, que é uma mistura de minérios operacionais. A figura 3 mostra esse fluxo de minério desde o ROM até as pilhas de minério comercial, que são construídas nos pátios das usinas siderúrgicas ou do Porto de Tubarão.

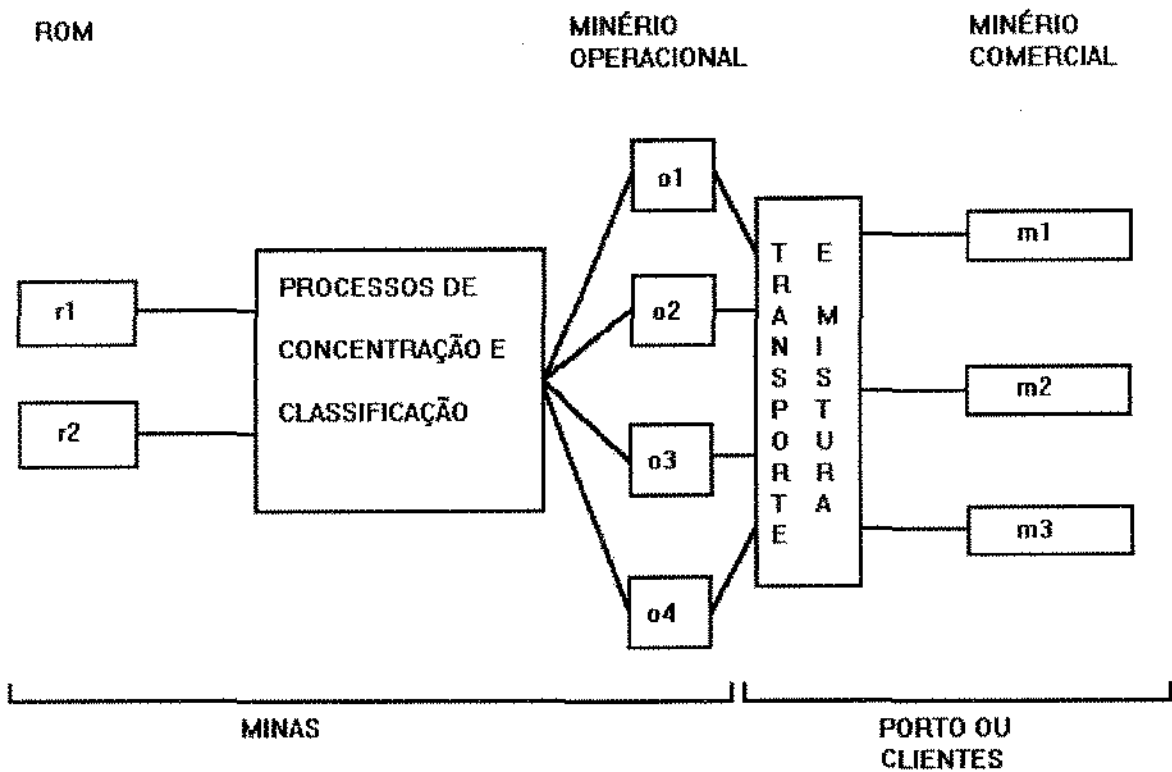


Figura 3: fluxo do minério desde o ROM até o minério comercial

4.1 - Propriedades físico-químicas

As propriedades mais importantes que são controladas no processamento do minério de ferro são as suas especificações químicas e granulométricas. Essas propriedades são expressas em percentagens em massa. Assim, a propriedade de uma mistura é a média ponderada (pela massa) das propriedades dos minérios componentes da mistura.

As especificações químicas mais relevantes são as de ferro (Fe), sílica (SiO_2), fósforo (P), alumínio (Al_2O_3), manganês (Mn), e umidade (H_2O). Um minério comercial típico, o SSF (Standard Sinter Feed), tem especificações mínimas de 63.5% de Fe, 4.9% de SiO_2 e 0.03% de P e máximas de 5.5% de SiO_2 , 0.05% de P, 1.3% de Al_2O_3 e 6.5% de H_2O . É importante notar que o que se encontra no minério é óxido de ferro; assim, uma especificação mínima de 63.5% em massa de ferro significa uma participação em massa de óxido de ferro bem maior que isto, já que estaremos somando o peso do ferro ao do oxigênio a ele combinado. Isso justifica por que a soma das especificações é bastante inferior que 100%.

As especificações granulométricas são definidas pela proporção de minério com granulometria acima ou abaixo de um nível de referência. Assim, se o valor da especificação $-0,15\text{mm}$ é 35.0, o valor da especificação $+0,15\text{mm}$ será 65.0 ($35.0 + 65.0 = 100.0\%$). Nesse exemplo, a interpretação que é dada é a de que se peneiramos uma amostra desse minério numa peneira com furo de diâmetro $0,15\text{mm}$, 35% em massa da amostra passa pelo furo. As especificações granulométricas mais utilizadas são $-0,15\text{mm}$, $+1,0\text{mm}$ e $+6,3\text{mm}$. O SSF tem especificações granulométricas máximas de 39% na faixa $-0,15\text{mm}$ e de 12.5% na faixa de $+6,3\text{mm}$.

4.2 - Minério ROM

O ROM é o minério extraído na frente de lavra e pronto para passar pelos processos de concentração e classificação. Esses processos visam à obtenção de especificações físico-químicas controladas nos minérios operacionais, já que as do ROM não são suficientemente uniformes. Geralmente o ROM passa por uma britagem primária antes de entrar nas usinas.

Os tipos básicos de ROM são o itabirito e a hematita, sendo o primeiro um minério mais fino e o segundo mais granuloso. Cada mina pode ter alguns tipos de itabirito ou de hematita, conforme variem as propriedades do minério nas suas frentes de lavra.

4.3 - Minérios operacionais

Os vários tipos de ROM podem passar por vários tipos de processos nas minas e ao fim desses processos (britagem, peneiramento, flotação, etc.), que variam em qualidade e intensidade conforme o minério que se queira produzir, o minério passa a ser chamado de minério operacional. Esses processos visam ao controle das propriedades físico-químicas do minério, que são limitadas por faixas definidas para cada tipo de minério operacional, e que devem ficar próximas a metas estabelecidas. Para efeito de planejamento, considera-se que o minério operacional tem sempre propriedades exatamente iguais às metas definidas para ele. Os minérios operacionais são utilizados como insumos para as pilhas de minério comercial.

De acordo com a sua granulometria, o minério operacional pode ser classificado como fino, superfino ou granulado. Os minérios superfinos são usados como insumos para as pilhas de minério que alimentam as usinas de pelotização, os finos como insumos para pilhas de minérios comerciais finos e os granulados como insumos para pilhas de minérios comerciais granulados.

O conceito de minério operacional é amplo, sendo considerado como operacional todo minério que pode ser utilizado como insumo para pilhas de minérios comerciais. Desse modo, o minério fino resultante do peneiramento dos minérios operacionais granulados que chegam ao porto, é considerado como operacional, e é utilizado como insumo para misturas de minérios comerciais finos.

O Sistema Sul da CVRD também compra minérios operacionais de outras mineradoras para compor as misturas de seus minérios comerciais, sendo uma meta a minimização dessas compras. Elas ocorrem, por dificuldades de construir misturas com especificações menos comuns com minérios operacionais próprios, ou por alguma dificuldade em produzir minérios operacionais próprios em quantidade suficiente para suprir toda a demanda de minérios comerciais de um período.

4.4 - Minérios comerciais

As especificações dos minérios demandados pelo mercado, raramente, são as mesmas dos minérios operacionais obtidos ao fim dos processos de concentração e classificação nas minas. Para atingi-las, recorre-se à mistura de minérios operacionais em quantidades e qualidades tais que as propriedades dessa mistura fiquem dentro dessas faixas

especificadas. Esses minérios produzidos para o mercado são chamados de minérios comerciais, e são classificados como finos, granulados ou pelotas.

As pelotas, produzidas nas usinas de pelotização, são o tipo de minério comercial de maior valor. Elas possuem propriedades físico-químicas uniformes e granulometria adequada para entrarem nos altos-fornos das usinas siderúrgicas.

Os minérios comerciais finos são geralmente utilizados nos processos de sinterização, que aglutinam partículas de minério fino e aumentam a sua granulometria, possibilitando o uso em altos-fornos. São produzidos através da mistura de minérios operacionais finos nos pátios do porto, ou das usinas siderúrgicas clientes.

Os minérios comerciais granulados não se tornam homogêneos através de mistura, exatamente por causa de sua granulometria. Um minério comercial granulado é produzido a partir de um só minério operacional granulado, ou pela mistura de dois ou três tipos de minérios operacionais granulados. O controle das especificações da mistura é feito pelas proporções dos minérios operacionais componentes, já que não é possível retirar da mistura uma amostra homogênea para análise.

5 - Planejamento de curto prazo do Sistema Sul

O planejamento das operações de curto prazo do sistema integrado mina-ferrovia-porto consiste, principalmente, em decidir o que será produzido nas minas (minérios operacionais), em cada dia de um horizonte de programação e o que será carregado nos trens com destino aos clientes e às pilhas no Porto de Tubarão nesse mesmo horizonte.

Os principais condicionantes relativos às minas são as regras de produção de minérios operacionais: alguns minérios, quando produzidos, implicam na produção simultânea obrigatória de outros minérios ou na impossibilidade de produção simultânea de outros minérios. Nas minas, são levadas em conta também restrições de capacidades diárias de processamento de minério ROM, de estocagem nos pátios e de carregamento de trens nos silos.

A ferrovia é considerada no problema, através das disponibilidades previstas de vagões e locomotivas em cada dia do horizonte de planejamento e da capacidade diária de circulação de trens, em cada trecho da malha ferroviária.

No porto, são observadas as capacidades de descarga de minério nos viradores de vagões, a capacidade de peneiramento de minério e as capacidades de estocagem de minério nos pátios. O controle das especificações físico-químicas dos minérios comerciais também é realizado no porto.

O planejamento de curto prazo do sistema integrado mina-ferrovia-porto tem origem na demanda de minérios comerciais. Esses minérios comerciais podem ser destinados aos clientes do mercado interno que recebem minério por via rodoviária ou ferroviária, ou ao Porto de Tubarão, onde estão localizadas as usinas de pelotização e de onde é embarcado minério para o mercado externo e para alguns clientes nacionais. A distinção usualmente feita pelos operadores do sistema considera como mercado interno só os clientes que recebem minério por via terrestre. Todo o minério embarcado em Tubarão é considerado como do mercado de exportações. Essa distinção será adotada daqui para a frente neste trabalho.

A demanda de curto prazo do mercado interno é consolidada em todo início de mês. Os programadores definem os tipos e volumes de minério comercial que serão entregues a cada cliente no mês, os minérios operacionais que vão compor esses minérios comerciais e as datas em que os lotes dos minérios operacionais serão entregues aos clientes. Essa decisão, a de que minério operacional enviar para qual pilha de minério comercial, em que quantidade e em que dia é a principal a ser tomada pelo planejamento integrado das unidades do Sistema Sul. O modo atual de planejamento de construção de pilhas para o mercado interno não dá flexibilidade de decisão ao sistema de planejamento integrado de curto prazo. Esse sistema simplesmente cumprirá o programa consolidado no início do mês e planejará a construção das pilhas em Tubarão, considerando assim obrigatória a entrega dos lotes de minérios operacionais ao mercado interno nos dias planejados. A demanda do mercado interno é de cerca de 20% da demanda total do sistema.

A demanda do mercado de exportações é definida a partir de um programa de embarques de navios. Esse programa lista todos os navios anunciados para o curto prazo, as datas previstas de chegada dos mesmos ao porto, os minérios comerciais que eles vão carregar e o volume desses carregamentos, dentre outras informações. Os minérios comerciais que participam desse mercado de exportações podem ser finos, granulados ou pelotas, da CVRD ou de outras mineradoras.

O programa de embarques de pelotas da CVRD condiciona a programação de produção das usinas. Essa programação define que tipos de pelotas serão produzidas em que usinas e em quais dias. É um problema de *scheduling* de produção: a partir dos estoques dos tipos de pelotas e do programa de embarques, os programadores decidem que pelotas produzir nas usinas, sabendo que cada usina só pode produzir alguns tipos de pelotas. Esse programa de produção de pelotas define o programa de construção das pilhas de alimentação das usinas, que indica os dias de início e término de construção das pilhas, suas

especificações físico-químicas (que dependem do tipo de pelota que será produzida com a pilha) e os volumes das pilhas, em toneladas. Cada usina possui duas pilhas de alimentação e, enquanto uma está sendo construída, a outra está sendo recuperada. O sistema de planejamento integrado de curto prazo terá como objetivo, no que se refere à produção de pelotas, programar a construção das pilhas de alimentação das usinas, observando as restrições de prazos, especificações e volumes dessas pilhas.

O programa de embarques de minérios finos e granulados define as datas previstas de chegada dos navios que carregarão esses tipos de minério, e em que volumes, dentre outras informações. Essas informações são utilizadas para elaborar-se o programa de construção de pilhas de minérios comerciais finos e granulados do mercado de exportações. No planejamento integrado de curto prazo é associada uma pilha para cada embarque previsto. O dia de término de construção da pilha é o dia anterior à data prevista de chegada do navio. O volume da pilha é o volume que o navio carregará e as especificações físico-químicas que a pilha deve atingir são as do tipo de minério comercial da pilha. No que se refere aos minérios comerciais finos e granulados do mercado de exportações os objetivos do sistema de planejamento integrado são determinar os dias de início de construção de pilhas, que são os dias a partir dos quais pode-se enviar minério para as pilhas no porto, e programar a construção dessas pilhas.

A modelagem matemática para o planejamento de curto prazo do sistema integrado foi desenvolvida em duas etapas, sendo que os resultados da primeira são utilizados como parâmetros da segunda.

A primeira etapa é um modelo de programação inteira que determina os dias de início de construção de pilhas de minérios comerciais finos do mercado de exportações. O

dia de início de construção de pilhas de minérios comerciais granulados do mercado de exportações é livre.

A segunda etapa do planejamento integrado é um modelo de programação linear que planeja, com detalhamento diário, a produção de minérios operacionais nas minas e a construção das pilhas de minérios comerciais no porto. O conjunto de restrições do sistema integrado é observado. O modelo observa as condições iniciais dos estoques nas minas e nos pátios do porto. Utiliza as decisões de dia de início de formação de pilha do modelo de programação inteira. A função objetivo possui termos que penalizam o término de construção da pilha após o dia previsto para esse término. Além das penalizações, a função objetivo busca construir as pilhas de minérios comerciais minimizando a soma dos custos marginais de produção dos minérios operacionais e de transporte na ferrovia.

A divisão do modelo em duas etapas, separando as variáveis de decisão inteiras das reais, é conveniente por se tratar de um problema de programação matemática de grande porte, com mais de 30000 variáveis reais. A modelagem do problema de programação inteira foi feita de modo a simplificar o processamento computacional, que utiliza o algoritmo *branch-and-bound*. A utilização do programa misto (completo) torna-se ineficaz para o equipamento disponível e é desinteressante por aumentar o tempo de processamento necessário para resolver o problema e também aumentar a necessidade de memória para armazenar a árvore de enumeração.

O Capítulo 2 apresenta os dois modelos utilizados para realizar o planejamento de curto prazo do sistema integrado de produção, transporte e embarque de minério.

Capítulo 2

Modelos do Planejamento de Curto Prazo

Neste capítulo apresentamos dois modelos: o primeiro é um modelo de programação inteira para determinar o período de operação de cada pilha de estoque de minérios comerciais finos no Porto de Tubarão; o segundo é um modelo de programação linear para complementar o planejamento integrado de curto prazo.

1 - Período de operação de pilha

O período de operação de uma pilha de minério comercial é o intervalo entre o dia de início de construção da pilha e dois dias após o dia previsto para a chegada do navio que vai embarcá-la. O dia previsto para a chegada do navio é o dia de término de construção da pilha, que é um parâmetro obtido do programa de embarques de navios no curto prazo. Os dois dias após o dia de término são uma folga para absorver eventuais atrasos dos navios e o tempo gasto para o seu carregamento. O dia de início de construção de pilha de minério comercial é obtido de modo diferente para os diferentes tipos de minérios comerciais. Esta seção descreve essas diferenças e apresenta um modelo para a determinação do dia de início de construção das pilhas de minérios comerciais finos.

1.1 - Estocagem de minério comercial no porto

As áreas de estocagem de minério comercial no porto são divididas por tipos de minério: finos, granulados e pelotas. Essa divisão é necessária porque a estocagem de minérios em áreas que não as de sua faixa granulométrica provoca a contaminação do lastro (piso do pátio de estocagem), e a troca de lastro deve ser sempre evitada.

A estocagem de minério granulado é feita em pilhas cônicas ou trapezoidais. São poucos os tipos de minério granulado e geralmente há pelo menos uma pilha de cada tipo de minério comercial granulado na área de estocagem de granulados. Isso acontece porque as minas têm pequena capacidade de estocagem de minérios granulados e quase sempre que se produz um minério operacional fino também é produzido um granulado associado. Para não se interromper a produção de minérios finos nas minas por falta de espaço de estocagem de granulados, usa-se transportar granulados para o porto, mesmo que não haja um navio programado para embarcá-lo. Assim, a área reservada para a estocagem de minérios granulados no porto é bem superior à que seria necessária para atender ao programa de embarques de curto prazo.

O modelo de programação linear de planejamento integrado, no que se refere à estocagem de minérios granulados no porto, considera que existe sempre uma pilha de cada tipo de granulado nos pátios de estocagem. Quando há um embarque de granulado, subtrai-se o volume embarcado do volume que a pilha tinha. A função objetivo possui uma penalização para pilhas com volume inferior ao programado para embarque, a partir do dia anterior à chegada do navio. Há também uma restrição que limita a soma dos estoques nas pilhas de granulados à capacidade de estocagem da área de granulados do porto.

O controle de estoque de pelotas nos pátios do porto não está sujeito ao modelo de planejamento de curto prazo, pois depende do programa de embarques e da programação de

produção das usinas. Assim, os programadores da produção das usinas precisam considerar os fluxos de minério e a capacidade de estocagem da área de pelotas. Os programadores de produção também determinam o dia de início de construção das pilhas de alimentação das usinas, como está descrito no Capítulo 1.

A estocagem de minérios comerciais finos é diferente: os processos de empilhamento e recuperação são utilizados para homogeneizar as propriedades físico-químicas da mistura de minérios operacionais. A construção das pilhas é feita em camadas horizontais e a recuperação em fatias verticais (Figura 4). Assim, cada fatia retirada da pilha tem propriedades próximas das propriedades médias da mistura. Entretanto, quando a primeira camada de minério é empilhada no pátio ela ocupa a área necessária para a construção da pilha completa.

O controle do volume de estoque de minérios comerciais finos no porto é feito considerando-se que, ao colocar-se a primeira camada de minério em uma pilha, todo o espaço que será ocupado por ela já está reservado. Isso implica a criação de variáveis inteiras no modelo de programação matemática de planejamento de curto prazo. Para evitar-se a criação de um programa misto com um número excessivamente grande de variáveis, como discutido no Capítulo 1, foi desenvolvido um modelo de programação inteira que determina o dia de início de formação de cada pilha de minério comercial fino. Os resultados deste modelo são utilizados como parâmetros do modelo de planejamento de curto prazo, que é um programa linear.

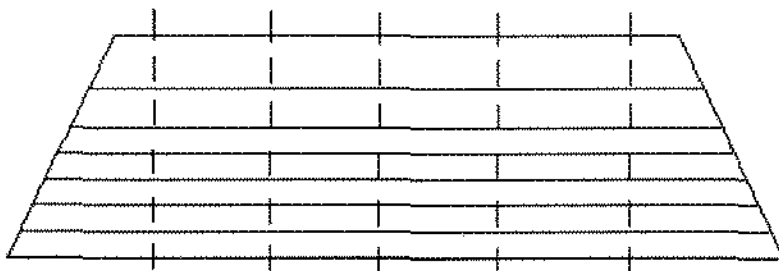


Figura 4: as pilhas de minérios finos são construídas em camadas e recuperadas em fatias

1.2 - Modelo

O controle do nível de estoque de minério na área de estocagem de minérios comerciais finos é feito por um modelo de decisão do dia de início de formação de pilhas de minérios comerciais finos. Este modelo considera reservado o espaço para a pilha completa desde o dia que ele sugere como o dia de início da pilha até dois dias após a data prevista para o seu embarque. Para cada dia, a soma de todos os volumes reservados não pode exceder a capacidade da área, em toneladas.

A função objetivo procura utilizar ao máximo o volume de estocagem disponível, antecipando os dias de início de formação de pilhas. Ela é uma maximização do número de dias disponíveis para a formação das pilhas, com pesos maiores para as pilhas de maior volume e maior dificuldade de construção. As pilhas difíceis de construir são as de minérios comerciais que têm pouca flexibilidade de mistura na sua composição e são compostos por minérios operacionais que têm restrição de volume de produção e de carregamento de trens. A mina de Córrego do Meio, por exemplo, só pode embarcar 0.5 lote de minério por dia. Para construir uma pilha com 5 lotes de minério de Córrego do Meio precisamos de no

mínimo 10 dias. Essa política foi escolhida porque é a que dá maior flexibilidade ao modelo seguinte, que é o de programação diária de carregamento de minérios das minas para o porto e para os clientes do mercado interno.

A seguir, está a descrição dos índices, conjuntos, variáveis, parâmetros e equações utilizados na construção do modelo. É importante frisar que todos os conjuntos apresentados são finitos, não sendo correto, nesse caso, interpretar as reticências como indicações de conjuntos infinitos.

Índices e conjuntos

$mf \in \{mf1, mf2, mf3, \dots\}$ conjunto dos minérios comerciais finos que são estocados no pátio de minérios finos do porto.

$p \in \{p1, p2, p3, \dots\}$ conjunto de índices de pilhas que servem para a diferenciação de pilhas de um mesmo minério comercial.

$d \in \{d0, d1, d2, \dots\}$ conjunto ordenado dos dias do horizonte de programação.

Variáveis

$Da(mf,p,d)$ variável binária (0-1) que indica se uma pilha mf,p está ou não aberta no dia d . As equações estão montadas de modo que, se a variável é igual a 1 para um determinado dia, ela também o será para todos os dias seguintes (vide 2º grupo de restrições).

Parâmetros

$Dt(mf,p)$ dia de término de construção da pilha mf,p .

$Emb(mf,p)$ volume final da pilha mf,p , em toneladas.

Fator(mf) fator de dificuldade de construção de pilhas do minério comercial mf .

Caparea capacidade de estocagem de minérios comerciais finos, no porto, em toneladas.

Função objetivo

$$\sum_{mf} \text{Fator}(mf) \times \sum_p \text{Emb}(mf,p) \times \sum_{\substack{d / \\ d \leq Dt(mf,p)}} \text{Da}(mf,p,d)$$

Restrições

$$\sum_{\substack{(mf,p) / \\ d \leq Dt(mf,p)+2}} \text{Emb}(mf,p) \times \text{Da}(mf,p,d) \leq \text{Caparea} \quad \forall d$$

$$\text{Da}(mf,p,d) \geq \text{Da}(mf,p,d-1) \quad \forall mf, p, d / d > d_0$$

1.3 - Dia de início de construção da pilha

A variável $\text{Da}(mf,p,d)$, do modelo de início de construção das pilhas (programação inteira), é utilizada para determinar o parâmetro $\text{Di}(mf,p)$, do modelo do planejamento integrado de curto prazo (programação linear). O parâmetro $\text{Di}(mf,p)$, que é o dia de início

de formação da pilha de minério fino mf,p , é obtido pela expressão abaixo, onde $card(d)$ é o número de elementos do conjunto de dias:

$$Di(mf,p) = card(d) - \sum_d Da(mf,p,d) \quad \forall mf,p$$

2 - Planejamento integrado de curto prazo

O planejamento de curto prazo do sistema integrado de produção, transporte e embarque de minério consiste basicamente em programar a produção de minérios operacionais nas minas e a construção das pilhas de minérios comerciais no porto, que significa planejar que minérios operacionais devem ser embarcados nas minas, para que pilhas de minérios comerciais, em que quantidades e em que dias para que as pilhas de minérios comerciais sejam construídas com volumes, especificações físico-químicas, prazos e custos adequados. O programa de carregamento de minérios operacionais para os clientes do mercado interno será considerado inflexível, como discutido no Capítulo 1.

A metodologia matemática utilizada para o planejamento será a programação linear, e este capítulo apresenta o modelo desenvolvido para representar o problema, que conta com as variáveis de decisão necessárias, com restrições operacionais das minas, da ferrovia e do porto, de quantidade e qualidade dos minérios comerciais e com uma função objetivo que direciona a solução para as condições mais favoráveis de quantidades, qualidades, prazos e custos das pilhas de minérios comerciais.

A apresentação dos elementos utilizados na modelagem (índices, conjuntos, variáveis, parâmetros, coeficientes) será realizada à medida da necessidade, durante a descrição das

equações que representam as restrições de cada etapa do planejamento. A seguir, serão apresentadas as definições de matriz booleana e vetor booleano e também serão apresentados alguns elementos básicos, que são importantes para o entendimento do desenvolvimento de toda a modelagem do sistema integrado. Nesse modelo todos os conjuntos também devem ser entendidos como finitos.

Matriz booleana - uma matriz $B(i,j,k,...,z)$ é booleana quando atribui um valor verdadeiro (V) ou falso (F) a cada um dos seus elementos (posições). Um **vetor booleano** é uma matriz booleana unidimensional.

Índices e conjuntos

$o \in \{o1, o2, o3, \dots\}$	conjunto dos minérios operacionais.
$m \in \{m1, m2, m3, \dots\}$	conjunto dos minérios comerciais.
$p \in \{p1, p2, p3, \dots\}$	conjunto de índices de pilha de minério comercial.
$d \in \{d0, d1, d2, \dots\}$	conjunto ordenado de dias do horizonte de planejamento.
$pr \in \{pr1, pr2, pr3, \dots\}$	conjunto das propriedades físico-químicas controladas no minério de ferro.
$mp(m,o)$	matriz booleana dos minérios operacionais que podem ser usados na composição de cada minério comercial.

O conjunto de índices de pilha existe para diferenciar pilhas de um mesmo minério comercial construídas no horizonte de planejamento. Assim, se duas pilhas do minério comercial $m1$ forem construídas no horizonte de planejamento, uma será identificada como $m1,p1$ e a outra como $m1,p2$. A matriz booleana $mp(m,o)$ lista, para cada minério comercial, todos os minérios operacionais que podem ser utilizados para a construção de suas pilhas. É importante observar que o conjunto mf dos minérios comerciais que são estocados no pátio de minérios finos do porto, é um subconjunto do conjunto m , que é o conjunto de todos os minérios comerciais.

Variáveis

$X(o,m,p,d)$ volume do minério operacional o carregado para a pilha p do minério comercial m no dia d .

Parâmetros

$Di(m,p)$ dia de início de construção da pilha m,p .

$Dt(m,p)$ dia de término de construção da pilha m,p .

$Emb(m,p)$ volume desejável de minério comercial na pilha m,p .

As pilhas de minério comercial m,p construídas no horizonte de planejamento têm três atributos principais: o dia de início de construção, que é o dia a partir do qual o minério pode chegar para a pilha no cliente; o dia de término de construção, que é o dia previsto para a chegada do navio que vai embarcar a pilha, e o volume que a pilha deve atingir ao fim da construção, preferencialmente até um dia antes do dia de término de construção.

A variável $X(o,m,p,d)$ é utilizada em todas as restrições a partir do carregamento do minério nas minas. As variáveis necessárias para a apresentação da modelagem do processo de produção de minérios operacionais são apresentadas na seção de restrições das minas.

2.1 - Restrições das minas

Nas minas ocorrem a extração do minério ROM, o processamento nas usinas, do qual resultam os minérios operacionais, a estocagem desses minérios operacionais e o carregamento dos trens. Nesta seção, serão apresentadas as restrições referentes às minas, exceto as de carregamento de trens, que serão consideradas na seção de restrições da ferrovia.

Numa mina podem funcionar um ou mais circuitos de processamento de minério. Os circuitos possuem processos de concentração e classificação, sendo que em alguns casos só de classificação. As restrições de circuitos diferentes são análogas, portanto serão apresentadas as restrições características de um único circuito. As restrições das várias minas do sistema, ou dos vários circuitos de uma mina, constituem uma repetição das restrições desse circuito padrão. Nesta seção de restrições da mina, em particular, toda vez que se faz referência a qualquer conjunto, exceto os conjuntos m (minérios comerciais), p (índices de pilhas) e d (dias), deve-se considerar somente o subconjunto dos elementos que pertencem ao circuito que está sendo apresentado. Cada elemento desses conjuntos pertence a um só dos subconjuntos, significando assim que ele participa de um só dos circuitos.

2.1.1 - Produção de minério ROM

Num circuito podem ser processados um ou mais tipos de ROM. Quando acontece o processamento simultâneo de alguns tipos de ROM, o circuito é alimentado com proporções fixas desses tipos. O conjunto de equações a seguir define a quantidade de cada tipo de ROM que deve ser processada em cada dia num circuito, seguindo as limitações de capacidade de processamento. Para todos os outros circuitos de produção, ocorre uma repetição das formas das equações, havendo apenas uma mudança de parâmetros e dos elementos dos conjuntos, já que cada tipo de ROM só pode ser processado num circuito. Como a alimentação do circuito é feita com proporções fixas dos tipos de ROM, o equacionamento escolhe um tipo de ROM como referência, e calcula a produção dos outros tipos de ROM em função da produção desse ROM de referência. Nesse circuito padrão o ROM de referência é o r_1 e em cada um dos outros circuitos o ROM de referência é um tipo de ROM pertencente ao circuito em questão.

Índices e conjuntos

$r \in \{r_1, r_2, r_3, \dots\}$ conjunto dos tipos de ROM do circuito.

Variáveis

$\text{Prodrom}(r,d)$ volume do minério r processado no dia d .

Parâmetros

$\text{Caprom}(d)$ capacidade de processamento do r_1 no dia d .

$Proprom(r)$ proporção de utilização dos minérios r_2, r_3, \dots , em relação a r_1 , na alimentação do circuito.

Restrições

$$Prodrom(r_1, d) \leq Caprom(d) \quad \forall d$$

$$Prodrom(r, d) = Proprom(r) \times Prodrom(r_1, d) \quad \forall d, r / r \neq r_1$$

2.1.2 - Produção dos minérios operacionais

As usinas de concentração de minério são sistemas contínuos de produção. Os minérios ROM que alimentam as usinas são desmembrados em minérios intermediários e rejeito, e esses minérios intermediários são combinados através de misturas que ocorrem internamente nas usinas, formando os minérios operacionais. O desmembramento do ROM em minérios intermediários e rejeito se dá em proporções consideradas fixas e definidas numa matriz de desmembramentos.

Após o desmembramento dos tipos de ROM do circuito em minérios intermediários, ocorre a combinação desses minérios intermediários em minérios operacionais. Para descrever esse processo são necessários dois novos conceitos, o de configurações de produção e o de grupos de minérios operacionais.

Configurações de produção são os possíveis estados de produção do circuito, isto é, as diferentes formas possíveis de utilização dos minérios intermediários para produzir os grupos de minérios operacionais. As diferentes configurações de produção preservam as proporções de alimentação do circuito com os diversos tipos de ROM desse circuito, e o processamento de cada tipo de ROM do circuito, num dia, é igual à soma dos processamentos desse tipo de ROM em cada uma das configurações existentes nesse circuito nesse dia. Analogamente, a produção de cada tipo de minério intermediário em cada configuração, em cada dia, é obtido pelo produto da matriz de desmembramentos de ROM em minérios intermediários pelos volumes dos tipos de ROM processados na configuração no dia.

Grupos de minérios operacionais de um circuito são subconjuntos dos minérios operacionais desse circuito. A divisão dos minérios operacionais em grupos é tal que, para uma dada configuração de produção, cada minério operacional do circuito pertence a no máximo um grupo. E em configurações de produção diferentes, a divisão dos minérios operacionais do circuito em grupos é feita de forma diferente. Assim, os minérios operacionais que pertencem ao grupo **g1** da configuração de produção **cf1** não são necessariamente os mesmos do grupo **g1**, configuração **cf2**.

Numa dada configuração de produção, a alocação dos minérios intermediários para a produção de minérios operacionais é tal que, para cada minério intermediário, a soma das proporções alocadas desse minério intermediário para os grupos de minérios operacionais da configuração é igual a 1. Assim, para um dado grupo de minérios operacionais de uma configuração, a soma das produções desses minérios nessa configuração num dia é igual à soma dos minérios intermediários alocados para essa configuração nesse dia. Para o sistema, é indiferente qual dos minérios operacionais do grupo está sendo produzido na configuração. Na verdade, os minérios operacionais de um grupo são sempre muito semelhantes. Eles

diferem basicamente na intensidade de um processo químico ou físico a que foram submetidos. A figura 5 ilustra o processo de desmembramento de ROM em minérios intermediários e rejeito e a combinação desses minérios intermediários em minérios operacionais, para uma dada configuração de produção.

Como um minério operacional pertence a no máximo um grupo em cada configuração, o volume desse minério operacional produzido num dia é igual à soma dos volumes produzidos desse minério operacional em todas as configurações no dia.

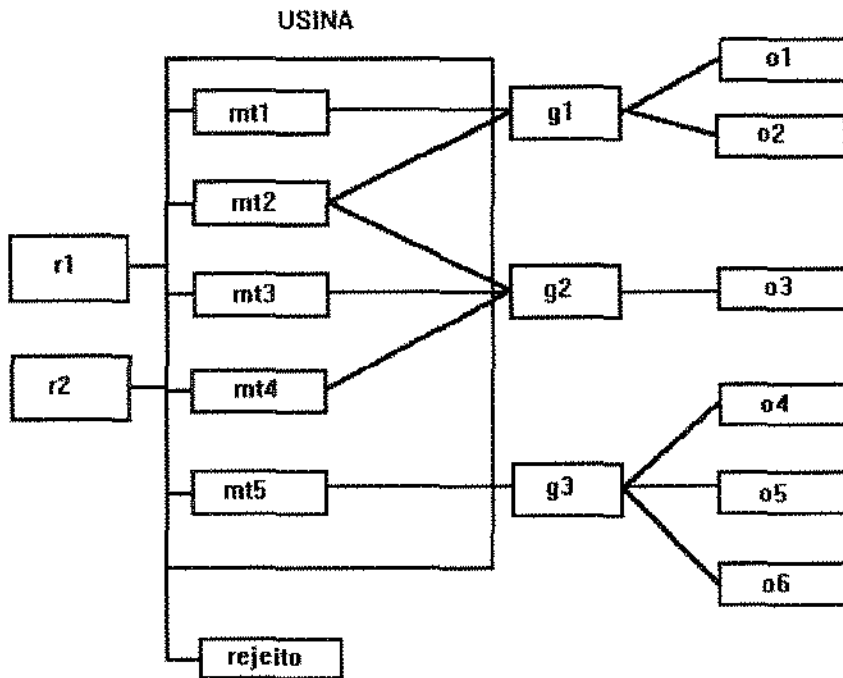


Figura 5: fluxo do ROM até os minérios operacionais

A seguir está exposto o desenvolvimento da modelagem que representa a produção de minérios operacionais.

Índices e conjuntos

$cf \in \{cf1, cf2, \dots\}$ conjunto de configurações possíveis de operação da usina.

$g \in \{g1, g2, \dots\}$ grupos de minérios operacionais de cada configuração.

$mt \in \{mt1, mt2, \dots\}$ conjunto de minérios intermediários.

$grm(cf, g, o)$ matriz booleana dos minérios operacionais pertencentes ao grupo g da configuração cf .

Variáveis

$Romconf(r, cf, d)$ volume do minério r processado na configuração cf no dia d .

$Prodint(mt, cf, d)$ volume do minério intermediário mt produzido na configuração cf no dia d .

$Mopconf(o, cf, d)$ volume do minério operacional o produzido na configuração cf no dia d .

$Prodmop(o, d)$ volume do minério operacional o produzido no dia d .

Parâmetros

$Dsmb(r, mt)$ matriz de desdobramento dos minérios ROM em minérios intermediários. Para cada minério ROM a soma dos

desdobramentos é igual a 1. Isto é,

$$\sum_{mt} Dsmb(r, mt) = 1 \quad \forall r$$

$Aloc(g, cf, mt)$ matriz de alocações dos minérios intermediários aos grupos de minérios operacionais para cada configuração. Numa dada configuração, a soma das alocações de cada minério

intermediário aos grupos é igual a 1. Isto é,

$$\sum_g Aloc(g, cf, mt) = 1 \quad \forall cf, mt$$

Restrições

$$Romconf(r, cf, d) = Proprom(r) \times Romconf(r1, cf, d) \quad \forall r, cf, d$$

$$Prodrom(r, d) = \sum_{cf} Romconf(r, cf, d) \quad \forall r, d$$

$$Prodint(mt, cf, d) = \sum_r Dsmb(r, mt) \times Romconf(r, cf, d) \quad \forall mt, cf, d$$

$$\sum_{\substack{o / \\ grm(cf, g, o)}} Mopconf(o, cf, d) = \sum_{mt} Aloc(g, cf, mt) \times Prodint(mt, cf, d) \quad \forall g, cf, d$$

$$Prodmap(o, d) = \sum_{cf} Mopconf(o, cf, d) \quad \forall o, d$$

2.1.3 - Estocagem dos minérios operacionais

Após a produção nas usinas de concentração e antes do carregamento nos trens, o minério é estocado em pátios localizados nas minas. Como no porto, a estocagem de minérios granulados e finos é feita em áreas diferentes. Assim, para cada área de estocagem, está associado um conjunto de minérios que são estocados nessa área. Cada minério pode ser estocado em no máximo uma área e a soma dos estoques de minérios operacionais de cada área não pode superar a capacidade de estocagem. O estoque de minério é calculado numa equação de balanço de massa: o estoque ao fim de um dia é igual ao do fim do dia anterior, somado à produção do dia, e subtraído do minério enviado para as pilhas de minério comercial. A seguir, é feita a descrição das equações de estocagem de minérios operacionais.

Índices e conjuntos

$st \in \{st1, st2, \dots\}$ conjunto das áreas de estocagem.

$armp(st,o)$ matriz booleana dos minérios operacionais que são estocados na área de estocagem st .

Variáveis

$E_{mina}(o,d)$ estoque do minério operacional o no dia d .

Parâmetros

$E_{0mina}(o)$ estoque do minério operacional o ao final do dia d_0 .

$Caparea(st,d)$ capacidade de estocagem da area st no dia d .

Restrições

$$E_{\text{mina}}(\text{o}, \text{d}0) = E_{\text{mina}}(\text{o}) \quad \forall \text{o}$$

$$E_{\text{mina}}(\text{o}, \text{d}) = E_{\text{mina}}(\text{o}, \text{d} - 1) + \text{Prod}_{\text{mop}}(\text{o}, \text{d}) - \sum_m \sum_p X(\text{o}, \text{m}, \text{p}, \text{d}) \quad \forall \text{o}, \text{d}$$

$$\sum_{\substack{a \\ \text{armp}(\text{st}, \text{o})}} E_{\text{mina}}(\text{o}, \text{d}) \leq \text{Cap}_{\text{area}}(\text{st}, \text{d}) \quad \forall \text{st}, \text{d}$$

2.2 - Restrições da ferrovia

A ferrovia, responsável pelo transporte do minério ao porto e às siderúrgicas, possui uma série de capacidades operacionais que precisam ser observadas no modelo de planejamento integrado. São restrições da ferrovia a capacidade de carregamento de trens nos pontos de embarque, a disponibilidade de vagões e locomotivas e a capacidade de circulação de trens nos vários trechos da malha. O descarregamento do minério nos viradores de vagões no porto é considerado na seção de restrições do porto.

2.2.1 - Carregamento dos trens

Os trens de minérios operacionais são carregados em pontos de embarque de minério localizados nas próprias minas ou em pontos que servem a diversas minas, sendo nesse caso o transporte do minério das minas ao ponto de embarque geralmente realizado de caminhão. A

capacidade de carregamento dos pontos de embarque é medida em número de lotes de oitenta vagões de minério por dia. A seguir está descrita a restrição de carregamento de trens.

Índices e conjuntos

$b \in \{b_1, b_2, \dots\}$ conjunto dos pontos de embarque.

$mob(b,o)$ matriz booleana dos minérios operacionais o que são embarcados no ponto b .

Parâmetros

$Cl(o)$ peso de um lote de 80 vagões do minério o .

$Clot(b,d)$ capacidade de carregamento do ponto de embarque b no dia d .

Restrições

$$\sum_{\substack{o / \\ mob(b,o)}} \sum_m \sum_p X(o,m,p,d) / Cl(o) \leq Clot(b,d) \quad \forall b, d$$

2.2.2 - Disponibilidade de vagões e locomotivas

A capacidade de transporte de minério na ferrovia é limitada pelas frotas disponíveis de vagões e locomotivas. O transporte de minério é realizado dos pontos de carregamento

para os clientes, porto ou siderúrgicas, e a cada par ponto de carregamento-cliente estão associados um ciclo para vagões e outro para locomotivas. Um ciclo é o tempo necessário para uma viagem de ida e volta do ponto de carregamento ao destino, medido em dias. As locomotivas têm ciclos mais curtos que os vagões porque, ao chegarem ao cliente, elas são desacopladas da composição, são acopladas a outros vagões já descarregados e partem para uma nova viagem. Obviamente, os vagões só ficam disponíveis para uma nova viagem após o descarregamento. As composições, geralmente, viajam com um lote de 80 vagões e uma locomotiva ou dois lotes de 80 vagões e duas locomotivas. Em alguns casos, quando há trechos de subida no percurso ponto de carregamento-cliente, utiliza-se mais de uma locomotiva por lote de 80 vagões. A cada cliente, estão associados os minérios comerciais que têm pilhas construídas nos seus pátios. Nunca um minério comercial pode ser destinado a dois clientes diferentes, porque os minérios comerciais do mercado interno são específicos para cada siderúrgica e os de exportação são todos destinados ao porto, que na programação de construção de pilhas é considerado como um grande cliente.

Índices e conjuntos

$n \in \{n_1, n_2, n_3, \dots\}$ conjunto dos clientes.

$dsg(n,m)$ matriz booleana dos minérios comerciais que são destinados ao cliente n .

Parâmetros

$Cv(o)$ peso de um vagão do minério o ($Cv(o) = Cl(o)/80$).

$Ciclov(b,n)$ ciclo para vagões entre o ponto de carregamento b e o destino n .

$Ciclov(b,n)$ ciclo para locomotivas entre o ponto de carregamento **b** e o destino **n**.

$Lclt(b,n)$ número de locomotivas por lote de 80 vagões utilizadas para o transporte entre o ponto de carregamento **b** e o destino **n**.

$Cvag(d)$ disponibilidade de vagões no dia **d**.

$Cloc(d)$ disponibilidade de locomotivas no dia **d**.

Restrições

$$\sum_o \sum_m \sum_p \sum_{\substack{b / \\ mob(b,o)}} \sum_{\substack{n / \\ dsq(n,m)}} (X(o,m,p,d) / Cv(o)) \times Ciclov(b,n) \leq Cvag(d) \quad \forall d$$

$$\sum_o \sum_m \sum_p \sum_{\substack{b / \\ mob(b,o)}} \sum_{\substack{n / \\ dsq(n,m)}} [(X(o,m,p,d) / Cl(o)) \times Lclt(b,n) \times Ciclov(b,n)] \leq Cloc(d) \quad \forall d$$

2.2.3 - Circulação dos trens nos trechos da ferrovia

Para definirmos um trecho numa ferrovia são necessárias três entidades básicas: os pontos de carregamento, os clientes (pontos de descarga de minério), e os pontos de ramificação da ferrovia. Todas essas três entidades são extremidades dos trechos da ferrovia. Partindo-se de uma extremidade e tomando-se uma direção na ferrovia, o trecho só se encerra quando se atinge alguma dessas entidades, que passa a ser a outra extremidade do

trecho. Com essa definição, concluímos que o número de trens que passa em qualquer ponto do trecho num dia é o mesmo, já que entre as duas extremidades do trecho não é possível que um trem entre ou saia da estrada de ferro. Para que esse balanço seja exato, é preciso considerar o caso dos trens que já entraram no trecho e ainda não atingiram a outra extremidade. É possível contabilizá-los como se já tivessem saído do trecho ou como se ainda não tivessem entrado.

A capacidade de via de um trecho, que é o número de trens que podem circular nesse trecho por dia, é uma restrição da ferrovia. No caso do transporte de minério na EFVM, os trens saem vazios dos clientes, são carregados nos pontos de embarque e voltam cheios para os clientes. Desse modo, consideramos que, em cada trecho, o número de trens que trafegam num sentido é igual ao dos que trafegam em sentido contrário em cada dia. A circulação de trens é então calculada como o número de trens que trafegam em um dos sentidos do trecho no dia. Para efetuar esse cálculo é necessário saber para cada par ponto de carregamento-cliente quais os trechos que pertencem ao percurso. É necessário também saber para cada trecho e para cada par ponto de carregamento-cliente qual o tamanho das composições: num trecho, dependendo de onde o minério tenha sido carregado e de para onde ele está indo, as composições podem ter 0.5, 1 ou 2 lotes de 80 vagões.

Índices e conjuntos

$t \in \{t_1, t_2, t_3, \dots\}$

conjunto dos trechos da ferrovia.

$way(n,b,t)$

matriz booleana dos trechos t que pertencem ao percurso do ponto de carregamento b ao destino n .

Parâmetros

$Lotr(t,b,n)$ número de lotes por trem no trecho t para minério carregado em b e com destino a n .

$Ctrecho(t,d)$ número de trens que podem circular em cada sentido do trecho t no dia d .

Restrições

$$\sum_o \sum_m \sum_p \sum_{\substack{b / \\ mob(b,o)}} \sum_{\substack{n / \\ [dsg(n,m) \wedge \\ way(n,b,t)]}} [X(o,m,p,d) / (Cl(o) \times Lotr(t,b,n))] \leq Ctrecho(t,d) \quad \forall t, d$$

2.3 - Restrições do porto

No porto, são construídas as pilhas de minérios comerciais para o mercado de exportações. Os minérios operacionais são descarregados nos viradores de vagões e são destinados ou às pilhas de minérios comerciais nos pátios do porto, ou às pilhas de alimentação das usinas de pelotização, ou às unidades de peneiramento no porto. As pilhas de minério comercial, depois de construídas, são recuperadas e embarcadas nos navios.

Do conjunto de operações realizadas no porto (descarregamento de trens, peneiramento, transporte em esteiras, recirculação de minérios, empilhamento e recuperação, carregamento de navios, etc.), só uma parte está presente no modelo de programação linear de planejamento integrado. Mais precisamente, estão presentes as

restrições referentes às rotas de descarregamento de trens, ao peneiramento e à capacidade de estocagem dos pátios de minério comercial.

2.3.1 - Descarregamento dos minérios operacionais

O descarregamento dos minérios operacionais é realizado nos viradores de vagões. O porto possui quatro viradores e cada um tem uma capacidade nominal de descarga de um lote de 80 vagões por hora. Saindo dos viradores, o minério segue para uma entre cinco rotas possíveis dentro do porto. Cada virador só serve a um subconjunto dessas cinco rotas. Essas rotas são a da área de estocagem de minérios finos, a de granulados, a rota das instalações de peneiramento, a de um grupo de usinas de pelotização e a do restante das usinas de pelotização. O minério operacional, quando é carregado nos pontos de embarque, já está destinado a uma pilha de minério comercial **m,p**. Cada tipo de minério comercial **m** no porto recebe minério operacional sempre através da mesma rota, dentre as cinco possíveis. O minério que é carregado nas minas em um dia, geralmente chega ao porto no dia seguinte. O minério que é recirculado no porto, e que também ocupa as rotas de descarga, obviamente sai de uma posição para outra dentro do porto no mesmo dia.

A restrição de descarga nos viradores é expressa em número de lotes que podem ser descarregados para cada uma das cinco rotas por dia, e também, em número de lotes que podem ser descarregados para as combinações das rotas, duas a duas. Assim, se a rota R1 comporta uma descarga d_1 em um dia e a rota R2 uma descarga d_2 , a capacidade de descarga da combinação R1,R2 pode ser menor que d_1+d_2 , já que algum virador ou esteira de transporte de minério pode servir a ambas as rotas.

As restrições lineares de capacidade de descarga não são o método adequado de se buscar uma descarga eficiente. A capacidade instalada de descarga é bem maior que a demanda, que é de um pouco mais que trinta lotes por dia. O problema real é o de seqüenciamento de chegada de lotes ao porto que, se não for bem planejado, pode fazer com que vários lotes cheguem simultaneamente ao porto para uma mesma rota. Isso implica um tempo grande de espera dos vagões no porto para descarga (retenção de vagões), o que é indesejável.

Índices e conjuntos

$rt \in \{rt_1, rt_2, \dots\}$ conjunto de rotas de transporte no porto.

$prt(rt, m)$ matriz booleana dos minérios comerciais do porto m que recebem minério através da rota rt .

$minas(o)$ vetor booleano dos minérios operacionais que chegam ao porto pela ferrovia.

$port(o)$ vetor booleano dos minérios operacionais que são recirculados no porto.

Parâmetros

$Caprot(rt_i, rt_k)$ capacidade de descarga, em número de lotes por dia, na rota combinada rt_i, rt_k .

Restrições

$$\sum_{\substack{o / \\ \text{minas}(o)}} \sum_{\substack{m / \\ [\text{prt}(rt_i, m) \vee \\ \text{prt}(rt_k, m)]}} \sum_p X(o, m, p, d-1) / \text{Cl}(o) +$$

$$\sum_{\substack{o / \\ \text{port}(o)}} \sum_{\substack{m / \\ [\text{prt}(rt_i, m) \vee \\ \text{prt}(rt_k, m)]}} \sum_p X(o, m, p, d) / \text{Cl}(o) \leq \text{Caprot}(rt_i, rt_k)$$

$$\forall rt_i, rt_k, d$$

2.3.2 - Peneiramento de minérios operacionais granulados

Os minérios operacionais granulados que chegam ao porto ou são empilhados diretamente nas pilhas de minérios comerciais granulados ou passam pelas peneiras antes do empilhamento na área de estocagem de granulados. Todos os minérios operacionais que vão para as pilhas de minérios comerciais granulados da CVRD, e para algumas pilhas de minérios comerciais granulados de terceiros, são peneirados. O peneiramento pode ser realizado em uma ou duas etapas: separa-se o fino do granulado e, para alguns minérios, há a produção de um granulado intermediário. Ver figura 6.

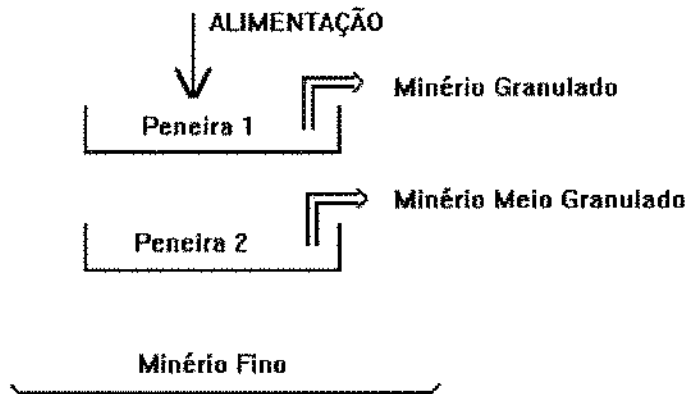


Figura 6: peneiramento do minério

O minério fino (FNPT) e o granulado intermediário (GRPT) resultantes do peneiramento são elementos do conjunto dos minérios operacionais que são usados na construção de pilhas de minérios comerciais. As equações de balanço de massa e de limitação de estocagem definidas para os minérios operacionais produzidos nas minas também são usadas para eles. Para cada tipo de minério operacional granulado que é peneirado, conhece-se a proporção que fica acima e abaixo da peneira e, quando há duas fases de peneiramento, quanto de minério fica em cada fase.

Conjuntos

ofctu (o) vetor booleano dos minérios operacionais que são peneirados no porto.

Parâmetros

Propfino1(o) proporção do minério que alimenta o sistema de peneiras que passa através da peneira 1.

Propfino2(o) proporção do minério que alimenta o sistema de peneiras que é retido na peneira 2.

Restrições

$$\text{Prodmap}(\text{FNPT}, \mathbf{d}) = \sum_{\substack{o / \\ \text{ofctu}(o)}} \sum_m \sum_p [\text{Propfino1}(o) - \text{Propfino2}(o)] \times \mathbf{X}(o, m, p, \mathbf{d} - 1) \quad \forall \mathbf{d}$$

$$\text{Prodmap}(\text{GRPT}, \mathbf{d}) = \sum_{\substack{o / \\ \text{ofctu}(o)}} \sum_m \sum_p \text{Propfino2}(o) \times \mathbf{X}(o, m, p, \mathbf{d} - 1) \quad \forall \mathbf{d}$$

2.3.3 - Estocagem de minério no porto

No porto são estocados minérios comerciais finos, granulados, pelotas e minérios operacionais resultantes do peneiramento. O estoque dos minérios operacionais do peneiramento é controlado pelas mesmas equações de limites de estocagem de minérios operacionais da seção de restrições das minas. O estoque de minérios comerciais finos é

controlado pelo modelo de programação inteira, descrito no Capítulo 1. O estoque de pelotas não é controlado por esse modelo matemático de planejamento integrado das operações das unidades do Sistema Sul, já que o programa de produção das usinas de pelotização não está sendo incluído no planejamento integrado. A modelagem descrita a seguir é utilizada para o controle do estoque de minérios comerciais granulados nos pátios do porto.

A estocagem de minérios comerciais granulados é limitada pela capacidade de estocagem do pátio de granulados do porto. Como não há necessidade de homogeneização de mistura de minérios, ao contrário das pilhas de minérios comerciais finos, o modelo de programação linear considera que existe uma única pilha de cada tipo de minério comercial granulado. Assim, o modelo considera que, para cada tipo de minério, sempre o minério vindo das minas é descarregado numa pilha e depois recuperado da mesma pilha para o carregamento dos navios. No modelo, essa pilha única que é construída para cada tipo de granulado é a de índice **p10**. Os índices diferentes de **p10** são usados para indicar os embarques previstos de granulados e os volumes relativos a esses embarques são descontados das pilhas com índice **p10**. Para a contabilização do estoque de minério no porto, considera-se que o minério que vai ser embarcado num navio ocupa a pilha até dois dias após a data prevista de chegada do navio que vai embarcá-lo. Como a variável de estoque no porto é declarada não negativa e é possível que uma pilha não tenha volume suficiente no prazo esperado para ela, foi criada uma variável de folga para completar o volume de minério na equação de balanço de estoque no porto. Essa variável de folga, que também é não negativa, é penalizada na função objetivo a partir do dia anterior ao dia previsto para a chegada do navio que vai carregar esse minério comercial granulado.

Conjuntos

$grpt(m)$ vetor booleano dos minérios comerciais que são estocados na área de granulados do porto.

Variáveis

$E_{porto}(m,d)$ estoque no porto da pilha do minério comercial granulado m no dia d .

$Folgap(m,d)$ variável de folga para o estoque no porto da pilha do minério comercial m no dia d .

Parâmetros

$Argr(d)$ capacidade de estocagem da área de granulados do porto no dia d .

$D(m,p,d)$ parâmetro que identifica o dia em que uma pilha de minério comercial m,p deixa de ser contabilizada do estoque do porto.

$D(m,p,d) = 1$ se $d = Dt(m,p)-1$;

$D(m,p,d) = 0$ se $d \neq Dt(m,p)-1$.

$E_{0porto}(m)$ estoque no porto do minério comercial granulado m no dia $d0$.

Restrições

$$E_{\text{porto}}(m, d) = E_{\text{porto}}(m, d-1) +$$

$$\sum_{\substack{o / \\ [\text{minas}(o) \wedge \\ \text{mp}(m,o)]}} [1 - \text{Propfno1}(o)] \times X(o, m, p10, d-1) + \sum_{\substack{o / \\ [\text{port}(o) \wedge \\ \text{mp}(m,o)]}} X(o, m, p10, d) +$$

$$\text{Folgap}(m, d) - \text{Folgap}(m, d-1) - \sum_{\substack{p / \\ p \neq p10}} D(m, p, d) \times \text{Emb}(m, p)$$

$$\forall m, d / \text{grpt}(m)$$

$$E_{\text{porto}}(m, d0) = E_{\text{porto}}(m)$$

$$\forall m / \text{grpt}(m)$$

$$\sum_{\substack{m / \\ \text{grpt}(m)}} \sum_p E_{\text{porto}}(m, d) + \sum_{\substack{m / \\ \text{grpt}(m)}} \sum_{\substack{p / \\ p \neq p10}} \sum_{l=d-4}^{d-1} D(m, p, l) \times \text{Emb}(m, p) \leq \text{Argr}(d)$$

$$\forall d$$

2.4 - Restrições de qualidade e quantidade de minérios comerciais

As pilhas de minérios comerciais do mercado interno têm suas restrições de especificações físico-químicas e de quantidade de minério observadas quando se faz o programa de lotes para o mercado interno, que é seguido no modelo de planejamento integrado das operações das minas, da ferrovia e do porto. As pilhas do mercado de exportação, que são construídas no porto, têm suas restrições controladas no programa linear de planejamento integrado. Esta seção descreve essas restrições.

2.4.1 - Volume das pilhas de minérios comerciais

No porto são construídas as pilhas de minérios comerciais finos e granulados do mercado de exportação e as pilhas de insumo para as usinas de pelotização. A restrição de volume de minério nas pilhas de granulados é controlada pelas equações de estoques de minérios comerciais no porto. Nessas equações, as variáveis **Folgap(m,d)** completam os volumes das pilhas que não tiverem quantidade suficiente de minério nos dias previstos. Essa variáveis são penalizadas na função objetivo. As pilhas de minérios finos e de alimentação das usinas de pelotização construídas no porto devem atingir um volume entre 100 e 110% do volume previsto para embarque. Essa folga é importante na programação linear para que uma pilha com construção já iniciada e propriedades físico-químicas fora das faixas especificadas, tenha chance maior de atingir as especificações ao final da construção. Como é possível que não se complete uma pilha no horizonte de planejamento, foram criadas variáveis de folga para evitar infactibilidades no programa linear devido às restrições de exigência de volume. Essas variáveis de folga também são penalizadas na função objetivo.

Conjuntos

$prf(m)$ vetor booleano dos minérios comerciais do porto não granulados.

Variáveis

$Folgaq(m,p)$ variável de folga para o volume da pilha p do minério comercial m ao fim do horizonte de planejamento.

Parâmetros

$Qzero(m,p)$ volume da pilha p do minério comercial m no dia $d0$.

Restrições

$$Emb(m,p) \leq \sum_{\substack{o / \\ \{minas(o) \wedge \\ mp(m,o)\}}} \sum_{\substack{d / \\ d \geq Dt(m,p)}} X(o,m,p,d-1) +$$

$$\sum_{\substack{o / \\ \{port(o) \wedge \\ mp(m,o)\}}} \sum_{\substack{d / \\ d \geq Dt(m,p)}} X(o,m,p,d) + Qzero(m,p) + Folgaq(m,p,d)$$

$$\leq 1.1 \times Emb(m,p)$$

$$\forall m,p,d / prf(m) \wedge d \geq Dt(m,p)-1$$

2.4.2 - Compra de minério de terceiros

A CVRD também compra minério de outras mineradoras para construir suas pilhas de minérios comerciais. Isso acontece porque a companhia não dispõe sempre de minério próprio para completar suas pilhas de minérios comerciais nas especificações e volumes adequados. Esses fornecedores, porém, não dispõem de minério em volume ilimitado. Existe uma restrição de uso mensal de minérios de terceiros para a construção de pilhas próprias.

Conjuntos

terc(o)	vetor booleano dos minérios operacionais de terceiros utilizados na construção de pilhas próprias.
rd(m)	vetor booleano dos minérios comerciais da CVRD do mercado de exportações.

Parâmetros

Maxcomp(o)	limite de compra do minério operacional o num período de 30 dias.
------------	---

Restrições

$$\sum_{\substack{m / \\ rd(m)}} \sum_p \sum_d X(o, m, p, d) \leq \text{Maxcomp}(o) \times \text{card}(d) / 30 \quad \forall o / \text{terc}(o)$$

2.4.3 - Qualidade das pilhas de minérios comerciais

As restrições de qualidade das pilhas de minérios comerciais são as de limites de especificações físico-químicas. Um minério comercial pode ter um limite mínimo, um máximo, ambos ou nenhum para cada uma das especificações físico-químicas existentes. A formulação das restrições considera que as pilhas podem ter um volume inicial no primeiro dia do horizonte de planejamento. As propriedades desse volume inicial são contabilizadas na qualidade da pilha ao final de sua construção.

É possível que se utilize a formulação das restrições de qualidade para a criação de restrições adicionais no modelo, como, por exemplo, a exigência de um mínimo e um máximo de participação de um determinado minério operacional na construção das pilhas de um minério comercial. Nesse caso, deve-se criar um elemento fictício no conjunto das propriedades físico-químicas e atribuir valor 1 para o parâmetro $\text{Teor}(\mathbf{o}, \mathbf{pr})$ para o minério operacional em questão e 0 para os outros minérios operacionais. Em seguida, deve-se atribuir as proporções limites desse minério operacional nas pilhas do minério comercial aos parâmetros $\text{Alfa}(\mathbf{m}, \mathbf{pr})$ e $\text{Beta}(\mathbf{m}, \mathbf{pr})$, que limitam inferior e superiormente os valores da propriedade \mathbf{pr} nas pilhas do minério \mathbf{m} . Esse artifício é utilizado, por exemplo, para controlar a participação dos minérios operacionais nas pilhas de minérios comerciais granulados. No caso dos minérios granulados, como descrito no Capítulo 1, o controle das especificações é feito através do controle das proporções dos minérios operacionais nas pilhas de minérios comerciais.

Conjuntos

$\text{min}(\mathbf{m}, \mathbf{pr})$ matriz booleana das especificações \mathbf{pr} que têm limites mínimos para o minério comercial \mathbf{m} .

$\text{max}(\mathbf{m}, \mathbf{pr})$ matriz booleana das especificações \mathbf{pr} que têm limites máximos para o minério comercial \mathbf{m} .

Parâmetros

$\text{Teor}(\mathbf{o}, \mathbf{pr})$ teor da especificação \mathbf{pr} no minério operacional \mathbf{o} .

$\text{Alfa}(\mathbf{m}, \mathbf{pr})$ teor mínimo da especificação \mathbf{pr} no minério comercial \mathbf{m} .

Beta(m,pr) teor máximo da especificação pr no minério comercial m.

$Q_0(m,p)$ volume inicial (no dia d0) da pilha m,p de minério comercial.
Para minérios granulados temos $Q_0(m,p10) = E_0\text{porto}(m)$.

$Teor_0(m,p,pr)$ teor inicial da propriedade pr na pilha m,p de minério comercial.

Restrições

$$\sum_{\substack{o / \\ mp(m,o)}} \sum_{\substack{d / \\ d \geq Di(m,p)-1}} [Teor(o,pr) \times X(o,m,p,d)] + Teor_0(m,p,pr) \times Q_0(m,p) \geq$$

$$Alfa(m,pr) \times \left\{ \sum_{\substack{o / \\ mp(m,o)}} \sum_{\substack{d / \\ d \geq Di(m,p)-1}} [X(o,m,p,d)] + Q_0(m,p) \right\}$$

$$\forall m, p, pr / \min(m,pr) \wedge prf(m)$$

$$\sum_{\substack{o / \\ mp(m,o)}} \sum_{\substack{d / \\ d \geq Di(m,p)-1}} [Teor(o,pr) \times X(o,m,p,d)] + Teor_0(m,p,pr) \times Q_0(m,p) \leq$$

$$Beta(m,pr) \times \left\{ \sum_{\substack{o / \\ mp(m,o)}} \sum_{\substack{d / \\ d \geq Di(m,p)-1}} [X(o,m,p,d)] + Q_0(m,p) \right\}$$

$$\forall m, p, pr / \max(m,pr) \wedge prf(m)$$

$$\sum_{\substack{o / \\ mp(m,o)}} \sum_d \{ \text{Teor}(o,pr) \times [1 - \text{Propfino}(o)] \times X(o,m,p10,d) \} +$$

$$\text{Teor}_o(m,p10,pr) \times Q_o(m,p10) \geq$$

$$\text{Alfa}(m,pr) \times \left\{ \sum_{\substack{o / \\ mp(m,o)}} \sum_d [1 - \text{Propfino}(o)] \times X(o,m,p10,d) + Q_o(m,p10) \right\}$$

$$\forall m, pr / \min(m,pr) \wedge \text{grpt}(m)$$

$$\sum_{\substack{o / \\ mp(m,o)}} \sum_d \{ \text{Teor}(o,pr) \times [1 - \text{Propfino}(o)] \times X(o,m,p10,d) \} +$$

$$\text{Teor}_o(m,p10,pr) \times Q_o(m,p10) \leq$$

$$\text{Beta}(m,pr) \times \left\{ \sum_{\substack{o / \\ mp(m,o)}} \sum_d [1 - \text{Propfino}(o)] \times X(o,m,p10,d) + Q_o(m,p10) \right\}$$

$$\forall m, pr / \max(m,pr) \wedge \text{grpt}(m)$$

2.5 - Função objetivo

A função objetivo do modelo de planejamento integrado direciona a solução do problema para as condições adequadas de prazos e custos das pilhas de minérios comerciais. A penalização pelo atraso na construção de uma pilha de minério comercial tem ordem de grandeza superior à dos custos de construção da pilha. Isso significa que é preferível construir uma pilha utilizando minérios operacionais caros a atrasar a construção dessa pilha.

A função objetivo é uma soma de três termos, Z_1 , Z_2 e Z_3 , que são constituídos de penalizações e custos de construção de pilhas de minérios comerciais. O problema é de minimização da função objetivo. Os termos são apresentados a seguir.

2.5.1 - Penalização pelo atraso

A penalização pelo atraso é computada em dois termos diferentes: um para as pilhas únicas de minérios comerciais granulados do porto e outro para as pilhas de minérios não granulados do porto. Esses dois conjuntos englobam todos os minérios comerciais do mercado de exportações. Como o mercado interno não está sujeito ao modelo de planejamento integrado, e o programa de lotes para esse mercado é previamente decidido, não há variáveis de decisão relativas a ele. Conseqüentemente, para o mercado interno, não há variáveis a serem penalizadas.

A penalização é maior para os atrasos mais longos e de maior volume. Minérios comerciais diferentes têm penalizações diferentes. As pilhas de alimentação das usinas, por exemplo, têm as penalizações de maior ordem de grandeza, já que, se as pilhas não forem construídas nos prazos certos, as usinas param por falta de minério para processar.

Pilhas diferentes de um mesmo minério comercial podem ter penalizações diferentes. Isso acontece, principalmente, quando são criadas demandas fictícias de minérios comerciais para o último dia do horizonte de planejamento. Essas demandas fictícias têm por objetivo forçar um regime uniforme de transporte de minério para o porto. Sem as demandas fictícias, o modelo matemático operaria com uma demanda de minério bastante aliviada nos últimos dias do horizonte de planejamento. Uma distorção na demanda de minério do

sistema, caindo fortemente ao fim do planejamento, prejudicaria a validade da solução obtida pelo modelo. Uma penalização menor para as pilhas de demandas fictícias evita que o modelo programe atrasos para demandas reais e atenda em dia demandas fictícias.

Parâmetros

Penal(m,p) coeficiente de penalização para cada tonelada atrasada, em cada dia de atraso, da pilha **p** do minério comercial **m**.

Restrição

$Z_1 =$

$$\sum_{\substack{m / \\ \text{prf}(m)}} \sum_p \sum_{\substack{d / \\ d \geq Dt(m,p)-1}} \text{Penal}(m,p) \times \text{Folgaq}(m,p,d) + \sum_{\substack{m / \\ \text{grpt}(m)}} \sum_d \text{Penal}(m,p10) \times \text{Folgap}(m,d)$$

2.5.2 - Estoque final de minérios operacionais

Da mesma forma que se busca evitar a queda no transporte de minérios nos últimos dias do horizonte de planejamento, com a criação das demandas fictícias de minérios comerciais, é necessário evitar a queda da produção de minérios operacionais, assim como a queda nos estoques desses minérios, ao fim do planejamento.

O artifício utilizado para atingir esse objetivo é declarar os estoques desejáveis de minérios operacionais ao fim do horizonte de planejamento, e penalizar, na função objetivo, o valor absoluto da diferença entre o estoque obtido e o planejado. Os estoques desejáveis

de minérios operacionais, no fim do horizonte de planejamento, são estimados em função da demanda prevista de minérios comerciais para além desse horizonte. O fator de penalização para estoques finais diferentes dos planejados não é o mesmo para todos os minérios operacionais. A ordem de grandeza da penalização pelo estoque final de minério operacional diferente do planejado é intermediária entre as ordens de grandeza da penalização por atraso e do custo de construção da pilha.

Conjuntos

$stq(o)$ vetor booleano dos minérios operacionais o para os quais se deseja controlar o estoque ao final do horizonte de planejamento.

Variáveis

$Folmina(o)$ variável de folga para o estoque do minério operacional o no dia df , último dia do horizonte de planejamento. $Folmina(o) \geq 0$.

$Excmina(o)$ variável de excesso para o estoque do minério operacional o no dia df . $Excmina(o) \geq 0$.

Parâmetros

$Estd(o)$ estoque desejável do minério operacional o no dia df .

$Fmop(o)$ fator de penalização para o valor absoluto de cada tonelada de diferença entre o estoque obtido e o desejável do minério operacional o no dia df .

Restrições

$$E_{\text{mina}}(o, df) + F_{\text{olmina}}(o) - E_{\text{xmina}}(o) = E_{\text{std}}(o) \quad \forall o / \text{stq}(o)$$

$$Z_2 = \sum_{\substack{o / \\ \text{stq}(o)}} F_{\text{mop}}(o) \times [F_{\text{olmina}}(o) + E_{\text{xmina}}(o)]$$

2.5.3 - Custo de construção das pilhas

O custo de construção das pilhas de minérios comerciais do mercado de exportações engloba dois fatores: o custo dos minérios operacionais utilizados e o custo de transporte desses minérios ao porto.

O custo dos minérios operacionais utilizados só é computado para os minérios comerciais da CVRD. A proporção de participação de minérios operacionais nas pilhas de minérios comerciais de terceiros é decidida pelas companhias que os produzem. Essas proporções estão presentes nas restrições de especificações, como elementos fictícios do conjunto de propriedades físico-químicas. Para os minérios operacionais produzidos pela CVRD, o custo computado é o custo marginal de produção. Para os minérios comprados de terceiros, o custo computado é o preço cobrado pelo minério.

O custo de transporte também só considera o minério transportado para o mercado de exportações, já que o custo de transporte para o mercado interno é função do programa

de lotes para esse mercado, que é planejado independentemente do modelo matemático. Como todo o minério do mercado de exportações é transportado para o porto, e cada minério operacional é sempre embarcado no mesmo ponto de carregamento, é utilizado um único parâmetro de custo de transporte para cada minério operacional. O custo computado é o custo marginal de transporte.

Parâmetros

Custo(o)	custo do minério operacional o.
Custotr(o)	custo marginal de transporte do minério operacional o, desde o seu ponto de carregamento, até o Porto de Tubarão.

Restrição

$Z_3 =$

$$\sum_o \sum_{\substack{m / \\ rd(m)}} \sum_p \sum_d \text{Custo}(o) \times X(o, m, p, d) + \sum_o \sum_{\substack{m / \\ [prf(m) \vee \\ grt(m)]}} \sum_p \sum_d \text{Custotr}(o) \times X(o, m, p, d)$$

Capítulo 3

Implementação Computacional

A implementação computacional dos modelos associados ao problema real é excessivamente extensa. Desta forma, é abordado um problema reduzido para facilitar a discussão deste capítulo. Assim, na primeira seção, são apresentados os elementos principais e os resultados de um problema reduzido de planejamento das operações diárias do sistema integrado. Os dados integrais desse problema reduzido, que incluem os códigos em GAMS das equações dos modelos e os elementos (conjuntos, parâmetros, etc) utilizados na modelagem, estão no Apêndice A. Os códigos apresentados no Apêndice A contêm algumas restrições e conjuntos que não foram mencionados no Capítulo 2. Esses elementos não apresentados ou representam realidades menos importantes do sistema, ou foram incluídos nos códigos para melhorar a eficiência computacional dos problemas de programação matemática, através de, por exemplo, redução do número de variáveis.

A segunda seção deste capítulo apresenta duas variações em torno do problema reduzido, analisando os seus efeitos sobre o planejamento, segundo os resultados dos programas. Isto ilustra as potencialidades de análise de cenários diversos a partir dos modelos desenvolvidos. Na terceira seção são apresentados alguns elementos da implementação computacional de um problema de tamanho real.

1 - Problema reduzido

1.1 - Descrição

O problema reduzido requer a construção de oito pilhas de minérios comerciais nos pátios do porto, num período de dez dias, além do envio de três lotes para o mercado interno. Os minérios comerciais do porto são de seis tipos diferentes, e são utilizados dezesseis tipos de minérios operacionais, da CVRD ou de terceiros, para a construção dessas pilhas.

Os dados da demanda de minérios comerciais no porto estão na tabela 1. É importante observar que os dias de início de formação de pilhas de insumo para pelota são fixos, enquanto que para as pilhas de minério fino eles são determinados pelo modelo de dia de início de formação de pilha. Para os minérios granulados, não há dia de início de formação de pilha.

Minério Comercial	Tipo de Minério	Dia de Início	Dia de Término	Volume do Embarque (toneladas)
FE02	insumo para pelota	0	2	6726
FM15	insumo para pelota	2	4	22000
FF08	insumo para pelota	5	9	114000
SFCO	fino	-	3	30000
SSF	fino	-	5	60000
SFCO	fino	-	9	30000
SSF	fino	-	10	50000
NBCA	granulado	-	10	40000

Tabela 1: demanda de minérios comerciais

As capacidades de estocagem de minérios finos e granulados no porto são consideradas ambas iguais a 100.000 toneladas. As restrições de peneiramento de minérios granulados e de descarga nos viradores de vagões também estão no problema reduzido.

A ferrovia é observada simplificada: existem dois pontos de carregamento, JP e CE, e um destino, o Porto de Tubarão, já que a única usina siderúrgica que recebe minério no problema é vizinha ao porto. Em João Paulo (JP) a capacidade de carregamento é de 5.5 lotes/dia, e em Conceição (CE), 2.5. Cada trecho tem uma capacidade de circulação de quatro trens por dia em cada sentido, e os trens circulam com dois lotes de oitenta vagões nos trechos, à exceção do trecho CE-DD, onde os trens circulam com apenas um lote. São

utilizadas disponibilidades de vagões e locomotivas de, respectivamente, 1212 e 11. A figura 7 apresenta o esquema da ferrovia simplificada.

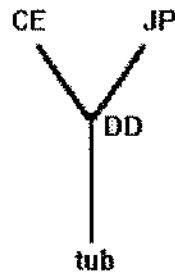


Figura 7: esquema da ferrovia no problema reduzido

As minas utilizadas no problema são as do Cauê, que carrega os seus lotes no ponto de João Paulo, e de Conceição. No ponto de carregamento de Conceição, além dos minérios operacionais produzidos nesta mina, é carregado o único minério operacional de terceiros disponível para compra nesse problema reduzido.

O circuito do Cauê é alimentado com dois tipos de ROM, a hematita e o itabirito, com volumes diários máximos de, respectivamente, 7000 e 35000 toneladas. Esses tipos de ROM são desmembrados em seis tipos de minérios intermediários, além do rejeito. Os minérios intermediários são alocados a nove tipos de minérios operacionais, em três configurações de produção possíveis. No Cauê existem duas áreas de estocagem, uma de 100000 toneladas de minério e outra de 50000 toneladas.

O circuito de Conceição também é alimentado com dois tipos de ROM, a hematita e o itabirito. O processamento máximo diário de hematita é de 6000 toneladas e o de itabirito de 13200 toneladas, e dessa alimentação da usina de concentração resultam cinco tipos de minérios intermediários, mais o rejeito. Os minérios intermediários são alocados a cinco tipos de minérios operacionais, em três configurações de produção diferentes. Os pátios de Conceição têm capacidade de estocagem de 45000 e 40000 toneladas de minério.

1.2 - Resultados

A primeira etapa do planejamento do sistema integrado é o modelo de decisão de dia de início de formação de pilhas de minério fino no porto. A demanda no período de estudo, listada na tabela 1, é de quatro pilhas de minério fino. A tabela 2 lista os resultados do modelo.

Minério Comercial	Dia de Início	Dia de Término	Volume do Embarque (toneladas)
SFCO	0	3	30000
SSF	0	5	60000
SFCO	6	9	30000
SSF	8	10	50000

Tabela 2: resultados da programação inteira

A segunda etapa do planejamento integrado é o programa linear que planeja a produção de minérios operacionais na mina e o carregamento desses minérios operacionais para as pilhas de minérios comerciais, no porto ou nas usinas siderúrgicas.

Os relatórios do Apêndice B descrevem em detalhe os resultados da programação. Neste cenário, todas as pilhas são construídas no prazo pedido. As tabelas a seguir, que são um resumo dos relatórios do Apêndice B, descrevem os principais resultados da programação linear.

Na tabela 3 é apresentado um resumo do relatório 1. Ela informa a quantidade inicial de minério nas pilhas de minérios comerciais, o volume de cada minério operacional enviado para cada pilha de minério comercial e os volumes finais das pilhas. O relatório completo informa também os dias da descarga dos minérios operacionais nas pilhas dos comerciais. É importante lembrar, como descrito na seção 2.3.3 do Capítulo 2, que para os minérios comerciais granulados (também para o mercado interno) é construída uma única pilha de cada tipo de minério, e os carregamentos dos navios são subtraídos dessas pilhas. Por convenção essas pilhas são as de índice 10.

Minério Comercial- FF08					
Q ₀	Pilha	Minérios Operacionais			
0	P1	PFCA	PXCA	PFCE	PFCP
Total: 114000		4402	62071	41827	5700
Minério Comercial- FM15					
Q ₀	Pilha	Minérios Operacionais			
0	P1	PECA	PXCA		
Total: 22000		13750	8250		
Minério Comercial- FE02					
Q ₀	Pilha	Minérios Operacionais			
0	P1	PXCA	PECE		
Total: 6726		5605	1121		
Minério Comercial- SSF					
Q ₀	Pilha	Minérios Operacionais			
0	P1	SECA	F3CA	SECE	FCTU
Total: 60000		13010	10472	34772	1745
Minério Comercial- SSF					
Q ₀	Pilha	Minérios Operacionais			
0	P2	SECA	F3CA	SECE	FCTU
Total: 50000		3923	9854	34837	1386

Tabela 3: planejamento de construção de pilhas de minério comercial - parte 1

Minério Comercial- SFCO					
Q ₀	Pilha	Minérios Operacionais			
13933	P1	SECA	FCTU		
Total: 30000		14053	2014		
Minério Comercial- SFCO					
Q ₀	Pilha	Minérios Operacionais			
0	P2	SECA	FCTU		
Total: 30000		26284	3716		
Minério Comercial- NBCA					
Q ₀	Pilha	Minérios Operacionais			
6000	P10	NBCA			
Total: 40000		34000			
Minério Comercial- CST					
Q ₀	Pilha	Minérios Operacionais			
0	P10	SECA	SFCA		
Total: 18000		12000	6000		

Tabela 3 - parte 2

A tabela 4, que resume o relatório 2, informa as qualidades físico-químicas finais das pilhas de minérios comerciais construídas, além dos limites especificados para as propriedades físico-químicas desses minérios comerciais. O relatório completo informa também a evolução dessas qualidades durante a construção da pilha.

Minério Comercial - FF08								
Volume Final	Pilha	Propriedades						
114000	P1	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn			
Especificação final		1.70	0.02	0.29	0.06			
Especificação mínima		1.70	0.01		0.06			
Especificação máxima		2.33	0.03	0.59	0.13			
Minério Comercial - FM15								
Volume Final	Pilha	Propriedades						
22000	P1	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn			
Especificação final		0.75	0.02	0.25	0.05			
Especificação mínima		0.65						
Especificação máxima		0.75	0.03	0.55	0.08			
Minério Comercial - FE02								
Volume Final	Pilha	Propriedades						
6726	P1	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn			
Especificação final		1.20	0.02	0.26	0.05			
Especificação máxima		1.20	0.03	0.55	0.10			

Tabela 4: qualidade das pilhas de minério comercial - parte 1

Minério Comercial - SSF									
Volume Final	Pilha	Propriedades							
60000	P1	Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	H ₂ O	-0.15	+6.3	
Especificação final		65.11	5.32	0.03	0.81	6.41	30.37	5.50	
Especificação mínima		63.50	2.90	0.03	0.70	5.10	30.00	5.50	
Especificação máxima			5.50	0.05	1.30	6.50	39.00	12.50	
Minério Comercial - SSF									
Volume Final	Pilha	Propriedades							
50000	P2	Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	H ₂ O	-0.15	+6.3	
Especificação final		65.07	5.45	0.03	0.78	6.50	31.24	5.50	
Especificação mínima		63.50	2.90	0.03	0.70	5.10	30.00	5.50	
Especificação máxima			5.50	0.05	1.30	6.50	39.00	12.50	
Minério Comercial - SFCO									
Volume Final	Pilha	Propriedades							
30000	P1	Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	H ₂ O	-0.15	+6.3	+1.0
Especificação final		65.25	4.50	0.03	0.88	6.10	27.09	6.18	51.00
Especificação mínima		64.30	4.25						51.00
Especificação máxima			4.75	0.03	1.15	7.50	28.00	11.00	
Minério Comercial - SFCO									
Volume Final	Pilha	Propriedades							
30000	P2	Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	H ₂ O	-0.15	+6.3	+1.0
Especificação final		65.35	4.41	0.03	0.98	5.77	26.08	5.22	51.00
Especificação mínima		64.30	4.25						51.00
Especificação máxima			4.75	0.03	1.15	7.50	28.00	11.00	

Tabela 4 - parte 2

O relatório 3 informa o programa diário de produção de minérios operacionais nas minas. A tabela 5, que resume o relatório 3, contém a produção planejada de cada minério operacional no período de estudo, que é a soma das produções planejadas em cada um dos dias desse período.

Mina	Minérios Operacionais (toneladas)							Total
Cauê	PECA	PFCA	PXCA	SECA	SFCA	F3CA	NBCA	
	22121	9990	66826	63271	10800	34027	21375	228409
Conceição	PFCE	PECE	SECE					
	53986	5623	65509					125118

Tabela 5: planejamento de produção de minérios operacionais

O relatório 4 informa o programa de embarque de minérios operacionais em cada dia do período de estudo, para cada ponto de carregamento. A tabela 6, que resume o relatório 4, informa o embarque planejado para todo o período.

Ponto de Embarque	Minérios Operacionais (toneladas)							Total
	JP	PECA	PFCA	PXCA	SECA	SFCA	F3CA	
	13750	4402	75926	69271	6000	20327	45333	235009
CE	PFCE	PECE	SECE	PFCP				
	41827	1121	69609	5700				118257

Tabela 6: planejamento de embarque de minério operacional

O relatório 5 informa a evolução dos estoques de minérios operacionais nas minas ao longo do período de estudo, agrupando esses minérios por áreas de estocagem. A tabela 7 mostra os estoques de minérios operacionais no último dia do período de estudo.

Mina	Minérios Operacionais							
CA	finos e superfinos							NBCA
Dia	PECA	PFCA	PXCA	SECA	SFCA	F3CA	Total	NBCA
D10	18571	18587	2500	0	7900	16300	63858	3922
Mina	Minérios Operacionais							
CE	finos		superfinos					
Dia	SECE	Total	PFCE	PECE	Total			
D10	1200	1200	12159	11202	23361			

Tabela 7: planejamento de estoque de minério operacional

O relatório 6 acompanha a evolução dos estoques de minérios comerciais nos pátios de finos e granulados do porto ao longo dos dias do período de estudo. No caso do pátio de finos, o relatório informa o estoque real de minério no dia, mas também o volume de estocagem bloqueado, que indica qual o espaço efetivamente disponível para novas pilhas. A tabela 8, que resume o relatório 6, mostra os estoques no porto num dia intermediário do período de estudo, o dia D7.

Pátio	Minério Comercial					
Finos	SSF		SFCO			
Dia	P1	P2	P1	P2	Total	Total bloq.
D7	60000	0	0	22477	82477	90000
Pátio	Minério Comercial					
Granulados	NBCA					
Dia	P10				Total	
D7	27527				27527	

Tabela 8: planejamento de estoque de minério comercial

O relatório 7 contém informações referentes ao planejamento do uso dos recursos de transporte da ferrovia. Ele informa, para cada um dos dias do período de estudo, a utilização de vagões, locomotivas, os ciclos médios ponderados de vagões e locomotivas e o número de trens que circulam no trecho **DD - tub**, que é o mais intensivamente utilizado no sistema. Ciclos médios ponderados de vagões e locomotivas são médias dos ciclos de vagões e

locomotivas referentes aos pares origem - destino, ponderados pelos números de vagões e locomotivas alocados a esses pares. A tabela 9, que resume o relatório 7, apresenta os resultados desse relatório para o dia D7, um dia intermediário do período de estudo.

Dia	Vagões Utilizados	Locomotivas Utilizadas	Ciclo Médio de Vagões	Ciclo Médio de Locomotivas	Trens no trecho DD - tub
D7	1004	11,0	1,94	1,70	3,23

Tabela 9: utilização dos recursos ferroviários

A frota de locomotivas é um recurso utilizado no limite máximo em oito dos dez dias da programação. A mina do Cauê funciona no limite máximo de produção em sete dias, enquanto que a de Conceição funciona no limite em oito dias.

Os custos atribuídos aos minérios de Conceição nesse problema reduzido são inferiores aos do Cauê, o que justifica a preferência do modelo pelo minério de Conceição. No ponto de Conceição são carregadas 118257 toneladas de minério, enquanto que em João Paulo são carregadas 235009 toneladas de minério, como se vê no relatório 4.

2 - Variações do problema

2.1 - Manutenção da via

A primeira variação de cenário em torno do problema reduzido é uma redução na capacidade de circulação de trens no trecho **DD - tub**, de quatro para dois trens por dia, no quarto e no oitavo dias do período de estudo, simulando-se uma necessidade de manutenção da via.

2.1.1 - Resultados

A capacidade de circulação de trens na ferrovia não é dado de entrada do modelo de dia de início de formação de pilhas de minérios comerciais finos. Portanto, uma variação nessa capacidade não afeta os resultados desse modelo, permanecendo válidos para esse cenário os dias de início gerados na seção anterior. Os resultados desse cenário estão no Apêndice C.

Neste segundo cenário pode-se observar, através do relatório 1, que houve atraso de um dia na construção da segunda pilha de SFCO. Este atraso é indicado no relatório com um asterisco ao lado do dia D10, que é posterior ao dia de término de construção da pilha. A segunda pilha do SSF não foi integralmente construída: até o fim do período de estudo ela só atingiu 36551 toneladas, contra uma demanda de 50000.

Nos relatórios 3, de planejamento de produção nas minas, e 4, de planejamento de carregamento de minério, observa-se uma inversão em relação ao cenário anterior. Há um aumento do carregamento de minério em João Paulo, e conseqüentemente de produção em Cauê, e diminuição da produção e carregamento de minério em Conceição.

Uma boa interpretação para esses resultados pode ser desenvolvida observando o relatório 7 para os dois cenários. No primeiro, onde há possibilidade de construção das pilhas sem atraso, o modelo prefere, até onde é possível, utilizar minério de Conceição, o mais barato. No segundo, onde o atraso é inevitável, o modelo tenta minimizá-lo, já que a parcela referente ao atraso é a de maior ordem de grandeza na função objetivo. O modelo utiliza então bastante minério do Cauê, de onde os ciclos ao porto são mais curtos nesse problema reduzido, mas de onde o minério é mais caro. No relatório 7 observa-se uma redução dos ciclos médios de vagões e locomotivas no segundo cenário em relação ao primeiro. É interessante observar-se também que o número de trens no trecho crítico mais freqüente no primeiro caso foi 3.23, contra 3.34 no segundo.

2.2 - Inclusão de nova pilha na demanda

Este novo cenário é uma variação em torno do primeiro. A mudança é a inclusão de uma nova pilha na demanda de minério comercial. Essa nova pilha é do minério SSF, tem dia de término 10 e volume demandado de 15000 toneladas.

2.2.1 - Resultados

Esse novo cenário, que possui mudança na demanda de minério fino, requer uma nova execução do modelo de dia de início de formação de pilhas de minérios comerciais finos. Os resultados desse modelo estão listados na tabela 10.

Minério Comercial	Dia de Início	Dia de Término	Volume do Embarque (toneladas)
SFCO	0	3	30000
SSF	0	5	60000
SFCO	6	9	30000
SSF	8	10	50000
SSF	8	10	15000

Tabela 10: resultados da programação inteira após acréscimo na demanda

Os resultados da programação linear referentes a este cenário estão no Apêndice D. Do relatório 1 conclui-se que todas as pilhas são construídas nos prazos e volumes requeridos. Observando-se os relatórios 3 e 4 verifica-se aumento de produção e de embarque de minério em ambas as minas. No relatório 5 há uma informação importante: o estoque de superfinos em Conceição termina no limite de estocagem, enquanto que o de finos termina vazio. O modelo utiliza ao máximo o minério fino disponível em Conceição, que é o mais barato nesse problema reduzido.

3 - Problema de tamanho real

A execução do modelo com dados reais para uma programação de 30 dias solicitou a construção de 114 pilhas de minérios comerciais (pilhas de insumo para as usinas de pelotização e pilhas de finos e granulados no porto) nesse período de planejamento.

A seguir são apresentadas algumas informações dessa execução. A máquina utilizada foi um computador IBM Risc/6000 com microprocessador PowerPC e 64Mb de memória RAM.

3.1 - Programa inteiro

O programa inteiro tem 1629 equações, 1520 variáveis e 8123 elementos diferentes de zero na matriz de coeficientes. O pré-processamento realizado pelo OSL (eliminação de restrições redundantes) reduziu o número de equações para 964 e o de elementos na matriz para 4071. O algoritmo encontrou uma solução inteira com 1892 iterações, em 31 segundos de processamento. Foi utilizada uma tolerância relativa (quociente da diferença entre o limitante superior do valor da função objetivo e o valor dessa função, pelo limitante da função) de 10%. Nesse programa inteiro não é importante a obtenção de solução ótima, é apenas necessário a geração de um escalonamento de dias de início de formação de pilhas de minérios comerciais finos no porto.

3.2 - Programa linear

A execução do programa linear é mais extensa. O programa tem 11797 linhas, 30371 colunas e 676161 elementos na matriz de coeficientes. O pré-processamento reduziu o número de linhas para 7632 e o de elementos na matriz para 489168. O OSL requisitou 74Mb de memória RAM para rodar as suas rotinas (na falta de memória RAM disponível, é utilizada memória do disco rígido).

Os coeficientes da matriz variaram de 0.0001 a $1.0 \cdot 10^{10}$ (antes do escalonamento). Após o escalonamento, de 0.0004 a 1.0. Não há informação disponível sobre as variações por linhas. Foi utilizada tolerância de $1.0 \cdot 10^{-7}$ para a execução desse programa (valores com módulo inferior a esse número são considerados iguais a zero). O programa foi executado em 14089 iterações do algoritmo simplex, com tempo de execução de 63 minutos.

Capítulo 4

Conclusões e Comentários

A descrição do problema no Capítulo 1 e a apresentação dos modelos no Capítulo 2 indicam que o problema de planejamento de curto prazo do sistema integrado de produção, transporte e embarque de minério é uma variação sofisticada do problema de formulação de misturas.

A necessidade de programar-se integradamente a produção de minérios operacionais e a construção das pilhas de minérios comerciais, e observar-se as capacidades de transporte e a evolução dos prazos para construção das pilhas, inviabiliza uma programação detalhada das operações de curto prazo sem o uso de modelos de programação matemática. A programação de curto prazo atualmente feita utiliza apenas as facilidades de planilhas, não possuindo mecanismos de otimização. Além disso, esse programa de curto prazo observa apenas a viabilidade de realização do programa mensal agregado, sem levar em conta a evolução do programa ao longo do mês. Assim, um programa mensal agregado viável pode implicar em atrasos na construção de pilhas, ou pode até ser inviável quando for detalhado ao longo do período de planejamento.

As tentativas anteriores de geração do planejamento integrado de curto prazo esbarraram em limitações metodológicas: exigiam o fornecimento por parte do usuário de uma "árvore de produto" para os minérios comerciais, que seria a composição desses minérios comerciais em proporções de minérios operacionais. Isso fixava a composição de comerciais por operacionais, impedindo a busca de misturas alternativas dos operacionais. Além disso, exigia uma revisão freqüente da "árvore de produto". A programação linear,

amplamente utilizada em problemas de formulação de misturas, revelou-se um método bastante eficaz para representar o problema. Como os coeficientes utilizados na modelagem são constantes no curto prazo, também a programação linear fica bem adaptada nesse sentido, já que os resultados da programação são implementáveis, não estando sujeitos a variações dos coeficientes dos modelos. Mudanças de cenários que requeiram reprogramação no curto prazo são respondidas com execuções dos modelos com as novas características. Como visto no desenvolvimento das restrições no Capítulo 2, inexistem não-linearidades no problema.

Os modelos geram ganhos nos fins que motivaram o seu desenvolvimento: a programação integrada de curto prazo das unidades do sistema e a minimização dos custos variáveis de produção e transporte de minério. As experimentações realizadas indicam que há possibilidade de composição dos minérios comerciais a partir de operacionais mais baratos.

Além desses benefícios, a utilização dos modelos tem proporcionado informações válidas para diversas aplicações, dentre outras:

- a observação da utilização dos recursos ao longo do período de planejamento permite a programação mais eficiente das manutenções;
- identificação antecipada dos motivos de atrasos na construção de pilhas, permitindo o desencadeamento de ações que objetivem minimizar esses atrasos.

A evolução do desenvolvimento do sistema de planejamento integrado requer o aprofundamento da comunicação dos modelos matemáticos com os bancos de dados da companhia, além do desenvolvimento de interfaces para a utilização e alimentação dos

modelos por usuários distintos, mas conectados numa mesma rede. Do ponto de vista da modelagem, é apropriado realizar-se uma análise das penalizações utilizadas na função objetivo do programa linear, que, se reduzidas, podem melhorar a precisão das soluções obtidas.

Desse modo, esse trabalho alcança o objetivo proposto, que é o de realizar o planejamento de curto prazo do sistema integrado de produção, transporte e embarque de minério, que consiste na programação diária de produção de minérios operacionais nas minas e na programação diária de carregamento de minérios operacionais para as pilhas de minérios comerciais.

Apêndice A

Códigos dos Modelos

1 - Programa inteiro

SETS

```
O      /PECA, PFCA, PXCA, SECA, SFCA, SACA, F3CA, FACA, NBCA,  
        PFCE, PECE, SACE, SICE, SECE,  
        FCTU,  
        PFCEP/;
```

SETS

```
SHARK(O) /FCTU/
```

```
VAL(O)  /PECA, PFCA, PXCA, SECA, SFCA, SACA, F3CA, FACA, NBCA,  
        PFCE, PECE, SACE, SICE, SECE,  
        FCTU/;
```

SETS

```
M      /CFF08, CFM15, CFE02,  
        CNBCA,  
        CCST,  
        CSSF, CSFCO/  
AREAS  /AREAFINOS, AREAGRAN/  
R      /HEMATCE, ITABCE,  
        ITABCA, HEMATCA/  
N      /TUB, CST/  
P      /P1*P15/  
SUBP(P) /P10/  
RT     /FINOS, PENEIRA, SUPEL, NIBRASCO, GRAN/  
B      /JP, CE/  
T      /TUDD, DDJP, DDCE /  
D      /D0*D10/;  
ALIAS (D, DAY) ;  
ALIAS (RT, RTI, RTK) ;
```

SETS

```
DSG (N, M)
```

```
/TUB. (CFF08, CFM15, CFE02,  
        CNBCA,  
        CSSF, CSFCO)  
CST. (CCST)  /;
```

SETS

CONAREA (AREAS, M)

/AREAFINOS. (CSSF, CSFCO)
AREAGRAN. (CNBCA) /;

SETS

PILCON (M) /CNBCA, CCST /;

SETS

MERINT (M) /CCST /;

SETS

PILCON2 (M, P) ;
PILCON2 (M, P) = YES\$(PILCON (M) * (NOT SUBP (P))) ;

PARAMETER CAPAREA (AREAS)

/AREAFINOS 100000
AREAGRAN 100000 /;

SETS

MP (M, O)

/ CFF08. (PECE, PFCE, PECA, PXCA, PFCA, PFCEP)
CFM15. (PECE, PFCE, PECA, PXCA, PFCA)
CFE02. (PECE, PFCE, PECA, PXCA, PFCA)
*
* CCST. (SFCA, SECA)
*
* CNBC. (NBCA)
*
* CSSF. (SFCA, SECE,
F3CA, FCTU, SECA)
* CSFCO. (SFCA, SECE,
F3CA, FCTU, SECA) /;

SETS

MOB (B, O)

/JP. (F3CA, SACA, SFCA, SECA, FACA, PECA, PFCA, PXCA,
NBCA)
CE. (SACE, SECE, SICE, PFCE, PECE, PFCEP) /;

SETS

PRT (RT, M)

/SUPEL . (CFM15, CFE02)

*

NIBRASCO . (CFF08)

*

PENEIRA . (CNBCA)

*

FINOS . (CSSF, CSFCO) /;

SCALARS

PENAL	/	100000	/
MAXFCTU	/	180000	/
MAXPSSF	/	100000	/;

PARAMETER QZERO (M, P)

/CNBCA.P10 6000

*

CSFCO.P1 13933/;

PARAMETER

DI2 (M, P)

/ CFE02.P1	1
CFM15.P1	3
CFF08.P1	6

*

CNBCA.P10	1
CCST.P10	1

*

CSFCO.P1	1
CSSF.P1	1
CSSF.P2	1
CSFCO.P2	1
CNBCA.P1	1 /;

PARAMETER

DT (M, P)

```
/ CFE02.P1      3
  CFM15.P1      5
  CFF08.P1     10
*
  CNBCA.P10    35
  CCST.P10     35
*
  CSFCO.P1      4
  CSSE.P1       6
  CSSF.P2      11
  CSFCO.P2     10
  CNBCA.P1     11 /;
```

PARAMETERS

EMB (M, P)

```
/ CFE02.P1      6726
  CFM15.P1     22000
  CFF08.P1    114000
*
  CNBCA.P10   3000000
  CCST.P10   3000000
*
  CSFCO.P1    30000
  CSSF.P1     60000
  CSSF.P2     50000
  CSFCO.P2    30000
  CNBCA.P1    40000 /;
```

SET OPENED (M, P);

OPENED (M, P) = YES\$(CONAREA("AREAFINOS",M)\$ (QZERO (M, P) GT 0));

PARAMETER

FATOR (M)

```
/ CSSF      1
  CSFCO    1/;
```

SETS

```
ATD (M, P)
ODD (M, P, D)
ATD1 (M, P, D);
```

```

ODD(M,P,D) = YES$(DT(M,P) + 2 GE ORD(D));
ATD(M,P) = YES$CONAREA("AREAFINOS",M)$
           (EMB(M,P) GT 0);
ATD1(M,P,D) = YES$(ODD(M,P,D) * ATD(M,P));

VARIABLES

DA(M,P,D)
Z

BINARY VARIABLE DA;
DA.FX(M,P,D)$OPENED(M,P) = 1;

EQUATIONS

EQ1(D)
EQ2(M,P,D)
EQ3(M,P)
EQ4(M,P)
OBJ;

EQ1(D)..
    SUM((M,P)$ (ATD1(M,P,D)),
        EMB(M,P)*DA(M,P,D)) =L=
    CAPAREA("AREAFINOS");

EQ2(M,P,D)$ATD(M,P)..
    DA(M,P,D) =G= DA(M,P,D-1);

EQ3(M,P)$ATD(M,P)..
    CARD(D) - SUM(D, DA(M,P,D)) =L=
    DT(M,P) - 2;

EQ4(M,P)$ (ATD(M,P)$ATD(M,P+1))..
    SUM(D, DA(M,P,D)) =G=
    SUM(D, DA(M,P+1,D));

OBJ..
    Z =E=
    SUM((M,P)$ATD(M,P), FATOR (M)*EMB(M,P)*
        SUM(D$(ORD(D) LE DT(M,P)), DA(M,P,D)));

MODEL PILHA /ALL/;

OPTION OPTCR = 0.00001;

SOLVE PILHA USING MIP MAXIMIZING Z;

$INCLUDE "pilha.inc";

```

2 - Programa linear

SETS

```
O      /PECA, PFCA, PXCA, SECA, SFCA, SACA, F3CA, FACA, NBCA,  
        PFCE, PECE, SACE, SICE, SECE,  
        FCTU,  
        PFCEP/;
```

SETS

```
SHARK(O) /FCTU/  
  
VAL(O)  /PECA, PFCA, PXCA, SECA, SFCA, SACA, F3CA, FACA, NBCA,  
        PFCE, PECE, SACE, SICE, SECE,  
        FCTU/;
```

SETS

```
M          /CFF08, CFM15, CFE02,  
           CNBCA,  
           CCST,  
           CSSF, CSFCO/  
AREAS     /AREAFINOS, AREAGRAN/  
R          /HEMATCE, ITABCE,  
           ITABCA, HEMATCA/  
N          /TUB, CST/  
P          /P1*P15/  
SUBP(P)   /P10/  
RT        /FINOS, PENEIRA, SUPEL, NIBRASCO, GRAN/  
B          /JP, CE/  
T          /TUDD, DDJP, DDCE /  
D          /D0*D10/;  
ALIAS(D, DAY);  
ALIAS(RT, RTI, RTK);
```

SETS

```
DSG(N, M)  
  
/TUB. (CFF08, CFM15, CFE02,  
      CNBCA,  
      CSSF, CSFCO)  
CST. (CCST)  /;
```

SETS

```
CONAREA(AREAS, M)  
  
/AREAFINOS. (CSSF, CSFCO)  
AREAGRAN.  (CNBCA) /;
```

SETS

PILCON(M) /CNBCA,CCST/;

SETS

MERINT(M) /CCST/;

SETS

PILCON2(M,P);

PILCON2(M,P) = YES\$(PILCON(M) * (NOT SUBP(P)));

PARAMETER CAPAREA(AREAS)

/AREAFINOS 100000

AREAGRAN 100000 /;

SETS

MP(M,O)

/ CFF08. (PECE,PFCE,PECA,PXCA,PFCA,PFCEP)

CFM15. (PECE,PFCE,PECA,PXCA,PFCA)

CFE02. (PECE,PFCE,PECA,PXCA,PFCA)

*

CCST. (SFCA,SECA)

*

CNBCA. (NBCA)

*

CSSF. (SFCA,SECE,
F3CA,FCTU,SECA)

CSFCO. (SFCA,SECE,
F3CA,FCTU,SECA)/;

SETS

MOB(B,O)

/JP. (F3CA,SACA,SFCA,SECA,FACA,PECA,PFCA,PXCA,
NBCA)

CE. (SACE,SECE,SICE,PFCE,PECE,PFCEP)/;

SETS

PRT(RT,M)

/SUPEL . (CFM15,CFE02)

*

NIBRASCO . (CFF08)

*

PENEIRA . (CNBCA)

*

FINOS . (CSSF,CSFCO)/;

SCALARS

```

    PENAL           / 100000 /
    MAXFCTU        / 180000 /
    MAXPSSF        / 100000 /;

```

PARAMETER QZERO(M, P)

```

    /CNBCA.P10      6000
*
    CSFCO.P1       13933/;

```

SETS

```

    PR /FE, SIO2, P, AL2O3, MN, H2O,
        M015, P1, P63/;

```

SETS

WAY(N, B, T)

```

    /TUB.JP. (TUDD, DDJP)
    TUB.CE. (TUDD, DDCE)
    CST.JP. (TUDD, DDJP)
    CST.CE. (TUDD, DDCE)/;

```

PARAMETER MAXCOMPRA(O)

```

/ PFCP 25000 /;

```

PARAMETER PROFFINO(O)

```

/NBCA 0.25 /;

```

TABLE TEORZERO(M, P, PR)

	FE	SIO2	P	AL2O3	MN	H2O
CSFCO.P1	65.14	4.62	0.031	0.77	0.15	6.48
+	M015	P1	P63			
CSFCO.P1	28.25	51.1	7.29			

PARAMETER RODASO(O, M, P)

```

/ NBCA.CNBCA.P10      40 /;

```

PARAMETER CUSTOTR(B)

```

/JP 2.19
CE 2.35 /;

```

PARAMETER DI1 (M, P)

```
/  CSSF . P1    1
   CSSF . P2    9
   CSFCO . P1   1
   CSFCO . P2   7
/;
```

PARAMETER DI2 (M, P)

```
/  CFE02.P1    1
   CFM15.P1    3
   CFF08.P1    6
*
   CNBCA.P10   1
   CCST.P10    1
*
   CSFCO.P1    1
   CSSF.P1     1
   CSSF.P2     1
   CSFCO.P2    1
   CNBCA.P1    1 /;
```

PARAMETER DT (M, P)

```
/  CFE02.P1    3
   CFM15.P1    5
   CFF08.P1   10
*
   CNBCA.P10   35
   CCST.P10    35
*
   CSFCO.P1    4
   CSSF.P1     6
   CSSF.P2    11
   CSFCO.P2   10
   CNBCA.P1   11 /;
```

PARAMETER EMB(M, P)

/	CFE02.P1	6726
	CFM15.P1	22000
	CFF08.P1	114000
*		
	CNBCA.P10	3000000
	CCST.P10	3000000
*		
	CSFCO.P1	30000
	CSSF.P1	60000
	CSSF.P2	50000
	CSFCO.P2	30000
	CNBCA.P1	40000 /;

TABLE TEOR(O, PR) Tabela minerios operacionais x propriedades

	FE	SiO2	P	AL2O3	MN	H2O
PECA	68.98	0.60	0.018	0.25	0.050	7.75
PFCA	67.73	2.50	0.018	0.30	0.050	8.09
PXCA	68.50	1.00	0.020	0.25	0.050	7.00
SFCA	64.93	5.50	0.025	0.70	0.112	6.65
SECA	65.30	4.70	0.030	0.94	0.118	5.94
SACA	58.00	15.0	0.016	1.00	0.130	6.00
F3CA	64.85	6.00	0.023	0.91	0.096	7.42
NBCA	66.50	3.20	0.025	0.70	0.075	1.63
*						
SECE	65.08	5.50	0.025	0.70	0.136	6.38
SACE	62.97	10.0	0.025	0.90	0.150	5.41
SICE	61.47	10.0	0.025	0.75	0.129	5.94
PECE	67.95	2.20	0.010	0.30	0.075	8.75
PFCE	67.60	2.75	0.010	0.30	0.075	8.91
*						
PFCEP	67.50	1.00	0.030	0.70	0.157	8.00
FCTU	65.73	2.34	0.043	1.27	0.230	4.56

	+	M015	P1	P63
	PECA	93.37	0.11	0.00
	PFCA	92.75	1.34	0.00
	PXCA	92.00	0.13	0.00
	SFCA	35.78	40.10	4.19
	SECA	26.00	58.21	5.96
	SACA	21.00	63.77	7.23
	F3CA	45.41	19.65	2.06
	NBCA	0.00	100.0	89.71
*	SECE	28.00	46.74	6.64
	SACE	28.00	61.81	9.08
	SICE	21.22	59.57	8.95
	PECE	91.87	0.12	0.00
	PFCE	91.38	0.12	0.00
*	PFCP	95.00	0.24	0.00
	FCTU	26.64	0.00	0.00 ;

TABLE BETA(M,PR) Teor maximo das propriedades nas pilhas

	FE	SIO2	P	AL2O3	MN	H2O
	CFM15	0.75	0.025	0.55	0.080	
	CFF08	2.33	0.025	0.59	0.130	
	CFE02	1.20	0.030	0.50	0.100	
*	CSSF	5.50	0.046	1.30		6.5
	CSFCO	4.75	0.032	1.15		7.5
	+	M015	P63			
	CSSF	39.0	12.5			
	CSFCO	28.0	11.0 ;			

TABLE ALFA(M,PR) Teor minimo das propriedades nas pilhas

	FE	SIO2	P	AL2O3	MN	H2O
	CFM15	0.65				
	CFF08	1.70	0.014		0.055	
*	CSSF	63.50	0.025	0.70		5.10
	CSFCO	64.30	4.25			
	+	M015	P1	P63		
	CSSF	30.0	5.5			
	CSFCO	51.0		;		

PARAMETER DI (M, P);

DI (M, P) = MAX (DI1 (M, P), DI2 (M, P));

SETS

INVALID (D, M, P)
VALID (D, M, P)
MXO (M, PR)
MNM (M, PR)
ATD (M, P)
ATV (O, M, P, D)
ODD (D) ;

INVALID (D, M, P) = YES\$ (ORD (D) GE DT (M, P));

VALID (D, M, P) = YES\$ (ORD (D) GE DI (M, P) - 1 AND
ORD (D) LE MIN (CARD (D), DT (M, P) + 3));

MXO (M, PR) = YES\$BETA (M, PR);

MNM (M, PR) = YES\$ALFA (M, PR);

ATD (M, P) = YES\$ (EMB (M, P) GT 0);

ATV (O, M, P, D) = YES\$ (MP (M, O) * ATD (M, P) * VALID (D, M, P));

ODD (D) = YES\$ (ORD (D) GT 1);

PARAMETER CUSTO (O)

/PECA 3.95
PFCA 3.95
PXCA 3.95
SFCA 2.58
SECA 2.58
SACA 2.58
F3CA 2.58
NBCA 2.04

*
SECE 2.41
SACE 2.41
SICE 2.41
PECE 2.50
PFCE 2.50

*
FCTU 7.50
PFCE 6.00 /;

TABLE PADRAO(M,O)

PFCP

CFF08 05
CFM15
CFE02 ;

PARAMETERS

CV(O);

CV(O) = 70;

CV("PECA") = 72 ;
CV("PFCA") = 71 ;
CV("PXCA") = 73 ;
CV("PFCP") = 70 ;
CV("F3CA") = 78 ;
CV("SACA") = 76 ;
CV("SECA") = 81 ;
CV("SFCA") = 79 ;
CV("SACE") = 79 ;
CV("SECE") = 81 ;
CV("SICE") = 81 ;
CV("NBCA") = 72 ;
CV("FCTU") = 70 ;

PARAMETERS

CL(O)
CLOC;

CL(O) = CV(O)*80;
CLOC = 11.0;

PARAMETER RODAS(O,M,P);

RODAS(O,M,P) = CV(O)*RODASO(O,M,P);

PARAMETER CLOT(B)

/JP 5.50
CE 2.50 /;

PARAMETER LOTR(T,B,N)

/ TUDD.(JP,CE) .(TUB,CST) 2.0
DDJP.(JP) .(TUB,CST) 2.0
DDCE.(CE) .(TUB,CST) 1.0/;

PARAMETER CTRECHO(T,D);

CTRECHO(T,D) = 4;

PARAMETER CICLOV(B,N)

/JP.TUB 1.84
CE.TUB 2.10
JP.CST 1.84
CE.CST 2.10/;

PARAMETER CICLOL(B,N)

/JP.TUB 1.60
CE.TUB 1.86
JP.CST 1.60
CE.CST 1.86/;

PARAMETER CVAG;

CVAG = 1212;

PARAMETER LCLT(B,N)

/(JP,CE).(TUB,CST) 1 /;

PARAMETER CAPROT(RTI,RTK)

/SUPEL.SUPEL 3
GRAN.GRAN 2
NIBRASCO.NIBRASCO 6
FINOS.FINOS 8
PENEIRA.PENEIRA 5
SUPEL.NIBRASCO 9
SUPEL.PENEIRA 8
SUPEL.FINOS 11
SUPEL.GRAN 5
NIBRASCO.PENEIRA 11
NIBRASCO.FINOS 14
NIBRASCO.GRAN 8
PENEIRA.FINOS 12
PENEIRA.GRAN 6
FINOS.GRAN 9 /;

```
SETS COMBR (RTI, RTK)

/SUPEL.SUPEL
GRAN.GRAN
NIBRASCO.NIBRASCO
FINOS.FINOS
PENEIRA.PENEIRA
SUPEL.NIBRASCO
SUPEL.PENEIRA
SUPEL.FINOS
SUPEL.GRAN
NIBRASCO.PENEIRA
NIBRASCO.FINOS
NIBRASCO.GRAN
PENEIRA.FINOS
PENEIRA.GRAN
FINOS.GRAN /;
```

```
PARAMETER MERCINT (O, M, P, D)

/ SECA.CCST.P10.D2 6000
SFCA.CCST.P10.D6 6000
SECA.CCST.P10.D10 6000/;
```

SETS

```
TMOPCE /PELLETCE, SINTERCE/;
```

SETS

```
MTMOPCE (TMOPCE, O)

/PELLETCE. (PFCE, PECE)
SINTERCE. (SACE, SICE, SECE) /;
```

PARAMETERS

```
MAXTPCE (TMOPCE)

/PELLETCE 45000.0
SINTERCE 40000.0 /;
```

SETS SUBROMCE (R)

```
/HEMATCE, ITABCE/;
```

SETS SUBOCE (O)

```
/PFCE, PECE, SACE, SECE, SICE/;
```

SETS MTCE

```
/SF1CE, SF3CE, SF5CE, SF7CE, PFFCE, REJCE/;
```

TABLE DSMBCE(R,MTCE)

	SF1CE	SF3CE	SF5CE	SF7CE	PFFCE	REJCE
HEMATCE	0.030	0.174	0.197	0.178	0.277	0.144
ITABCE	0.100	0.124	0.000	0.071	0.382	0.323 ;

SETS CFCE /CFCE1*CFCE3/;

SETS GCE /GCE1*GCE2/;

SETS GRMCE(CFCE,GCE,O)

/CFCE1.GCE1. (SECE)
 CFCE1.GCE2. (PECE,PFCE)
 CFCE2.GCE1. (SICE)
 CFCE2.GCE2. (PECE,PFCE)
 CFCE3.GCE1. (SACE)
 CFCE3.GCE2. (PECE,PFCE) /;

SETS

NGRMCE(CFCE,O);

NGRMCE(CFCE,O) = YES\$
 ((SUBOCE(O)) * (NOT SUM(GCE,GRMCE(CFCE,GCE,O))));

TABLE ALOCCE(GCE,CFCE,MTCE)

	SF1CE	SF3CE	SF5CE	SF7CE	PFFCE	REJCE
GCE1.CFCE1	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0
GCE2.CFCE1	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
* GCE1.CFCE2	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0
GCE2.CFCE2	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
* GCE1.CFCE3	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0
GCE2.CFCE3	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0 ;

PARAMETERS

CPRCE(D);
 CPRCE(D) = 6000;

PARAMETERS

PRPCE(R)

/HEMATCE 1
 ITABCE 2.20 /;

PARAMETERS

EOMINA(O)

/ F3CA 2600
NBCA 25000
PECA 10200
PFCA 13000
PXCA 11600
SECA 6000
SFCA 3100
PECE 6700
SECE 5300
FCTU 13936 /

EFMINA(O)

/ NBCA 5100
SFCA 7900
SECA 3900
SACA 00
F3CA 16300
PFCA 200
PXCA 2500
PECA 1700
SECE 1200
SACE 00
SICE 00
PFCE 00
PECE 1500
FCTU 5000 /;

SETS

TMOPCA /ESTFICA, ESTNBCA/;

SETS

MTMOPCA(TMOPCA, O)

/ ESTFICA. (SACA, SECA, SFCA, FACA, F3CA, PECA, PFCA, PXCA)
ESTNBCA. (NBCA) /;

PARAMETERS

MAXTFCA(TMOPCA)

/ESTFICA 100000
ESTNBCA 50000/;

*
* Circuito 1
*

SETS SUBROMCA1 (R)

/HEMATCA, ITABCA/;

SETS SUBOCA1 (O)

/PFCA, PECA, PXCA, SECA, SFCA, SACA, FACA, F3CA, NBCA/;

SETS MTCA1

/SF1CA1, SF3CA1, SF4CA1, FCCA1, PFFCA1, GRACA1, REJCA1/;

TABLE DSMBCA1 (R, MTCA1)

	SF1CA1	SF3CA1	SF4CA1	FCCA1	PFFCA1	GRACA1	REJCA1
HEMATCA	0.00	0.10	0.11	0.41	0.12	0.10	0.16
ITABCA	0.075	0.11	0.045	0.00	0.30	0.05	0.42;

SETS CFCA1 /CFCA11*CFCA13/;

SETS GCA1 /GCA11*GCA14/;

SETS GRMCA1 (CFCA1, GCA1, O)

/CFCA11.GCA11. (SFCA)
CFCA11.GCA12. (PECA, PFCA, PXCA)
CFCA11.GCA13. (NBCA)
CFCA12.GCA11. (SECA)
CFCA12.GCA12. (F3CA)
CFCA12.GCA13. (PECA, PFCA, PXCA)
CFCA12.GCA14. (NBCA)
CFCA13.GCA11. (SACA)
CFCA13.GCA12. (FACA)
CFCA13.GCA13. (PFCA, PXCA)
CFCA13.GCA14. (NBCA) /;

SETS

NGRMCA1 (CFCA1, O);

NGRMCA1 (CFCA1, O) = YES\$ ((SUBOCA1 (O)) *
(NOT SUM (GCA1, GRMCA1 (CFCA1, GCA1, O))));

TABLE ALOCCA1 (GCA1,CFCA1,MTCA1)

	SF1CA1	SF3CA1	SF4CA1	FCCA1	PFFCA1	GRACA1	REJCA1
GCA11.CFCA11	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00
GCA12.CFCA11	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00
GCA13.CFCA11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
*							
GCA11.CFCA12	1.00	0.30	1.00	0.60	0.00	0.00	0.00
GCA12.CFCA12	0.00	0.70	0.00	0.40	0.00	0.00	0.00
GCA13.CFCA12	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00
GCA14.CFCA12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
*							
GCA11.CFCA13	1.00	0.50	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00
GCA12.CFCA13	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
GCA13.CFCA13	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00
GCA14.CFCA13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00;

PARAMETERS

CPRCA1(D);
 CPRCA1(D) = 7000;

PARAMETERS

PRPCA1(R)

/HEMATCA 1
 ITABCA 5/;

SETS

SHIP /TROMBETAS ,
 L_TRASSY ,
 A_PRIDE ,
 HIGHLAND ,
 0245-F ,
 P1142 ,
 P1016 /;

SETS

PILSHIP(M, P, SHIP)

/ CSFCO.P1 . TROMBETAS
 CSSF.P1 . L_TRASSY
 CSSF.P2 . A_PRIDE
 CSFCO.P2 . TROMBETAS
 CNBCA.P1 . HIGHLAND
 CFE02.P1 . 0245-F
 CFM15.P1 . P1142
 CFF08.P1 . P1016 /;

ALIAS(O,OP);

POSITIVE VARIABLES

ROM(R,D)
W(O,D)
EMINA(O,D)
FOLMINA(O)
EXCMINA(O)
EPORTO2(M,D)
DQUANT(M,P,D)
FOLGA(M,D)
X(O,M,P,D)

*
ROMCFCA1(R,CFCA1,D)
PRMTCA1(MTCA1,CFCA1,D)
OPCFCA1(O,CFCA1,D)

*
ROMCFCE(R,CFCE,D)
PRMTCE(MTCE,CFCE,D)
OPCFCE(O,CFCE,D);

FREE VARIABLES

Z
Z1
Z2
Z3;

EMINA.UP("SACA",D)\$ (ORD(D) EQ CARD(D)) = 0;
EMINA.UP("SACE",D)\$ (ORD(D) EQ CARD(D)) = 0;
EMINA.UP("SICE",D)\$ (ORD(D) EQ CARD(D)) = 0;
EMINA.FX(O,"D0") = EOMINA(O);
FOLGA.FX(M,"D0") = 0;
EPORTO.FX(M,P,"D0") = QZERO(M,P);
EPORTO2.FX(M,"D0") = QZERO(M,"P10");
X.FX(O,M,P,D)\$ ((SHARK(O) * MP(M,O) *
ATD(M,P))\$ (ORD(D) EQ DI(M,P) - 1)) = 0;
X.FX(O,M,P,D)\$ ((MP(M,O) *
ATD(M,P))\$ (ORD(D) EQ DI(M,P) - 2)) = 0;
X.FX(O,M,P,D)\$
(((NOT SHARK(O)) * MP(M,O))\$ (ORD(D) EQ CARD(D))) = 0;
X.FX(O,M,P,"D0")\$ (MP(M,O) * ATD(M,P)) = RODAS(O,M,P);
X.FX(O,M,P,D)\$ (MP(M,O) * PILCON2(M,P) * ATD(M,P)) = 0;
X.FX(O,M,P,D)\$ (MP(M,O) * ATD(M,P) * MERINT(M)) =
MERCINT(O,M,P,D);
OPCFCA1.FX(O,CFCA1,D)\$NGRMCA1(CFCA1,O) = 0;
OPCFCE.FX(O,CFCE,D)\$NGRMCE(CFCE,O) = 0;

EQUATIONS

EQMAX(M,P,PR)
EQMIN(M,P,PR)
EQPELOT(O,M,P)

```

*
*   Equacoes de Volume de Minerio Comercial
*
EQQG (M, P, D)
EQQM (M, P, D)
EQQZ (M, P, D)
*
*   Limite de Compra de Terceiros
*
EQCOMPRAS (O)
*
*   Equacoes de Recirculacao de Minerio no Porto
*
EQRECIR1 (D)
*
*   Equacoes de Producao dos Minerios Operacionais do Porto
*
EQFCTU (D)
*
*   Equacoes de Estocagem dos Minerios Operacionais do Porto
*
EQESTFCTU (D)
*
*   Estocagem de Minerio Granulado no Porto
*
EQPORTO2 (M, D)
EQAREAG (D)
*
*   Equacoes da Estrada de Ferro
*
EQVAG (D)
EQLOC (D)
EQROT (RTI, RTK, D)
EQIEMB (B, D)
EQTREC (T, D)
*
*   Equacoes das Minas
*
*
*   Balanco de Estoques e Estoques ao Fim do Periodo
*
EQMINA (O, D)
EQMINAF1 (O, D)
*
*   Equacoes de Caue
*
EQESTCA (TMOPCA, D)
*
*   Circuito 1
*
EQRCFCA1 (R, CFCA1, D)
EQROMCA1 (R, D)
EQPRMTCA1 (MTCA1, CFCA1, D)
EQOPCFCA1 (GCA1, CFCA1, D)
EQPROPCA1 (O, D)

```

```

EQHMCA1(D)
EQITCA1(R,D)
*
*   Equacoes de Conceicao
*
EQESTCE(TMOPCE,D)
EQRCFCE(R,CFCE,D)
EQROMCE(R,D)
EQPRMTCE(MTCE,CFCE,D)
EQOPCFCE(GCE,CFCE,D)
EQPROPCE(O,D)
EQHMCE(D)
EQITCE(R,D)
*
*   Funcao Objetivo
*
EQZ1
EQZ2
EQZ3
EQOBJ;

EQMAX(M,P,PR)$ (MXO(M,PR) * ATD(M,P))..
    SUM((O,D)$ ((MP(M,O) * VALID(D,M,P))$
    (ORD(D) NE CARD(D))),
    TEOR(O,PR)*X(O,M,P,D)) +
    TEORZERO(M,P,PR)*QZERO(M,P) =L=
    BETA(M,PR)*
    (SUM((O,D)$ ((MP(M,O)$VALID(D,M,P))$
    (ORD(D) NE CARD(D))),
    X(O,M,P,D)) + QZERO(M,P)) ;

EQMIN(M,P,PR)$ (MNM(M,PR) * ATD(M,P))..
    SUM((O,D)$ ((MP(M,O) * VALID(D,M,P))$
    (ORD(D) NE CARD(D))),
    TEOR(O,PR)*X(O,M,P,D)) +
    TEORZERO(M,P,PR)*QZERO(M,P) =G=
    ALFA(M,PR)*
    (SUM((O,D)$ ((MP(M,O)$VALID(D,M,P))$
    (ORD(D) NE CARD(D))),
    X(O,M,P,D)) + QZERO(M,P)) ;

EQPELOT(O,M,P)$ ((MP(M,O) *
    (PRT("SUPEL",M) + PRT("NIBRASCO",M)) * ATD(M,P))$
    ((QZERO(M,P) EQ 0) AND (PADRAO(M,O) GT 0)))..
    SUM(D$VALID(D,M,P), X(O,M,P,D)) =E=
    (PADRAO(M,O)/100)*SUM((OP,D)$ATV(OP,M,P,D), X(OP,M,P,D));
*
*   Equacoes de Volume de Minerio Comercial
*

```

```

EQQG(M,P,D)$
  ((ATD(M,P) * (NOT PILCON(M)) * (NOT PRT("PENEIRA",M)) *
  INVALID(D,M,P))$(QZERO(M,P) GT 0))..
  SUM((O, DAY)$((SHARK(O) * MP(M,O) * VALID(DAY,M,P))$
  (ORD(DAY) LE ORD(D))),
  X(O,M,P, DAY)) +
  SUM((O, DAY)$
  (((NOT SHARK(O)) * MP(M,O) * VALID(DAY-1,M,P))$
  (ORD(DAY) LE ORD(D))),
  X(O,M,P, DAY-1)) +
  QZERO(M,P) + DQUANT(M,P,D) =G=
  EMB(M,P);

```

```

EQQM(M,P,D)$
  ((ATD(M,P) * (NOT PILCON(M)) * (NOT PRT("PENEIRA",M)) *
  INVALID(D,M,P))$(QZERO(M,P) GT 0))..
  SUM((O, DAY)$((SHARK(O) * MP(M,O) * VALID(DAY,M,P))$
  (ORD(DAY) LE ORD(D))),
  X(O,M,P, DAY)) +
  SUM((O, DAY)$
  (((NOT SHARK(O)) * MP(M,O) * VALID(DAY-1,M,P))$
  (ORD(DAY) LE ORD(D))),
  X(O,M,P, DAY-1)) +
  QZERO(M,P) + DQUANT(M,P,D) =L=
  1.10*EMB(M,P);

```

```

EQQZ(M,P,D)$((ATD(M,P) * (NOT PILCON(M)) *
  INVALID(D,M,P))$(QZERO(M,P) EQ 0))..
  SUM((O, DAY)$((SHARK(O) * MP(M,O) * VALID(DAY,M,P))$
  (ORD(DAY) LE ORD(D))),
  X(O,M,P, DAY)) +
  SUM((O, DAY)$
  (((NOT SHARK(O)) * MP(M,O) * VALID(DAY-1,M,P))$
  (ORD(DAY) LE ORD(D))),
  (1 - PROPFINO(O))*X(O,M,P, DAY-1)) +
  QZERO(M,P) + DQUANT(M,P,D) =E=
  EMB(M,P);

```

```

*
* Limite de Compra de Terceiros
*

```

```

EQCOMPRAS(O)$ (NOT VAL(O))..
  SUM((M,P,D)$ (ATV(O,M,P,D) *
  (NOT MERINT(M))),
  X(O,M,P,D)) =L=
  MAXCOMPRA(O)*CARD(D)/30;

```

*
 * Equacoes de Recirculacao de Minerio no Porto
 *

```
EQRECIR1(D)$ (ORD(D) GT 1)..
  SUM( (M,P)$ (MP(M,"FCTU") *
    ATD(M,P) *
    VALID(D,M,P)), X("FCTU",M,P,D)) =L=
    3200;
```

*
 * Equacoes de Producao dos Minerios Operacionais do Porto
 *

```
EQFCTU(D)$ (ORD(D) GT 1)..
  W("FCTU",D) =E=
  SUM( (O,M)$
    (ATV(O,M,"P10",D-1) * PILCON(M) *PRT("PENEIRA",M)),
    (PROPFINO(O)) *X(O,M,"P10",D-1));
```

*
 * Equacoes de Estocagem dos Minerios Operacionais do Porto
 *

```
EQESTFCTU(D)$ (ORD(D) GT 1)..
  EMINA("FCTU",D) =L= MAXFCTU;
```

*
 * Estocagem de Minerio Granulado no Porto
 *

```
EQPORTO2(M,D)$ (PILCON(M) * ODD(D))..
  EPORTO2(M,D) =E=
  EPORTO2(M,D-1) +
  SUM((O)$ ((NOT SHARK(O)) * ATV(O,M,"P10",D-1)),
    (1-PROPFINO(O)) *X(O,M,"P10",D-1)) +
  SUM((O)$ (SHARK(O) * ATV(O,M,"P10",D)),
    X(O,M,"P10",D)) +
  FOLGA(M,D) -
  FOLGA(M,D-1) -
  SUM(P$ ((ATD(M,P) * (NOT SUBP(P)))$
    (DT(M,P)-1 EQ ORD(D))),
    EMB(M,P));
```

```
EQAREAG(D)$ (ORD(D) GT 1)..
  SUM( (M)$ (CONAREA("AREAGRAN",M) * PILCON(M)),
  EPORTO2(M,D)) +
  SUM( (M,P)$
    ((PILCON(M) * CONAREA("AREAGRAN",M) * (NOT SUBP(P)))$
    ((ORD(D) GE DT(M,P)-1) AND (ORD(D) LE DT(M,P)+2))),
    EMB(M,P)) =L=
  CAPAREA("AREAGRAN");
```

*
 * Equacoes da Estrada de Ferro
 *

EQVAG(D) \$ODD(D) ..
 SUM((O,M,P,B,N) \$ (ATV(O,M,P,D) * DSG(N,M) * MOB(B,O)),
 (X(O,M,P,D)/CV(O)) *CICLOV(B,N)) =L=
 CVAG;

EQLOC(D) \$ODD(D) ..
 SUM((O,M,P,B,N) \$ (ATV(O,M,P,D) * DSG(N,M) * MOB(B,O)),
 (X(O,M,P,D)/CL(O)) *LCLT(B,N)*CICLOL(B,N)) =L=
 CLOC;

EQROT(RTI,RTK,D) \$(COMBR(RTI,RTK) * ODD(D)) ..
 SUM((O,M,P) \$ ((PRT(RTI,M) +
 PRT(RTK,M)) *
 ATV(O,M,P,D) *
 (NOT SHARK(O))),
 X(O,M,P,D-1)/CL(O)) +
 SUM((O,M,P) \$ ((PRT(RTI,M) +
 PRT(RTK,M)) *
 ATV(O,M,P,D) *
 SHARK(O)),
 X(O,M,P,D)/CL(O)) =L=
 CAPROT(RTI,RTK);

EQIEMB(B,D) \$ODD(D) ..
 SUM((O,M,P) \$ (ATV(O,M,P,D) * MOB(B,O)),
 X(O,M,P,D)/CL(O)) =L=
 CLOT(B);

EQTREC(T,D) \$ODD(D) ..
 SUM((O,M,P,N,B) \$ (ATV(O,M,P,D) *
 WAY(N,B,T) *
 DSG(N,M) *
 MOB(B,O)),
 X(O,M,P,D) / (CL(O) *LOTR(T,B,N))) =L=
 CTRECHO(T,D);

*
 * Equacoes das Minas
 *

*
 * Balanco de Estoques e Estoques ao Fim do Periodo
 *

EQMINA(O,D) \$(VAL(O) *
 ODD(D)) ..
 EMINA(O,D) =E=
 EMINA(O,D-1) +
 W(O,D) - SUM((M,P) \$ATV(O,M,P,D),
 X(O,M,P,D));

```
EQMINAF1(O,D)$(VAL(O)$(ORD(D) EQ CARD(D)))..
    EMINA(O,D) + FOLMINA(O) - EXCMINA(O) =E=
    EFMINA(O);
```

```
*
* Equacoes de Caue
*
```

```
EQUESTCA(TMOPCA,D)$(ORD(D) GT 1)..
    SUM((O)$MTMOPCA(TMOPCA,O),
    EMINA(O,D)) =L= MAXTPCA(TMOPCA);
```

```
*
* Circuito 1
*
```

```
EQRCFCA1(R,CFCA1,D)$(SUBROMCA1(R) * ODD(D))..
    ROMCFCA1(R,CFCA1,D) =E=
    PRPCA1(R)*ROMCFCA1("HEMATCA",CFCA1,D);
```

```
EQROMCA1(R,D)$(SUBROMCA1(R) *
    ODD(D))..
    ROM(R,D) =E= SUM(CFCA1,ROMCFCA1(R,CFCA1,D));
```

```
EQPRMTCAL(MTCA1,CFCA1,D)$ODD(D)..
    PRMTCAL(MTCA1,CFCA1,D) =E=
    SUM(R$SUBROMCA1(R),DSMBCAL(R,MTCA1)*ROMCFCA1(R,CFCA1,D));
```

```
EQOPCFCA1(GCAL,CFCA1,D)$ODD(D)..
    SUM(O$GRMCA1(CFCA1,GCAL,O),OPCFCA1(O,CFCA1,D)) =E=
    SUM(MTCA1,ALOCAL(GCAL,CFCA1,MTCA1)*PRMTCAL(MTCA1,CFCA1,D));
```

```
EQPROPCA1(O,D)$(SUBOCA1(O) *
    ODD(D))..
    W(O,D) =E= SUM(CFCA1,OPCFCA1(O,CFCA1,D));
```

```
EQHMCAL(D)$ODD(D)..
    ROM("HEMATCA",D) =L= CPRCAL(D);
```

```
EQITCAL(R,D)$(SUBROMCA1(R) *
    ODD(D))..
    ROM(R,D) =E= PRPCA1(R)*ROM("HEMATCA",D);
```

```
*
* Equacoes de Conceicao
*
```

```
EQUESTCE(TMOPCE,D)$(ORD(D) GT 1)..
    SUM((O)$MTMOPCE(TMOPCE,O),
    EMINA(O,D)) =L= MAXTPCE(TMOPCE);
```

```

EQRCFCE (R, CFCE, D) $ (SUBROMCE (R) *
    ODD (D)) . .
    ROMCFCE (R, CFCE, D) =E=
    PRPCE (R) *ROMCFCE ("HEMATCE", CFCE, D);

EQROMCE (R, D) $ (SUBROMCE (R) *
    ODD (D)) . .
    ROM (R, D) =E= SUM (CFCE, ROMCFCE (R, CFCE, D));

EQPRMTC (MTCE, CFCE, D) $ODD (D) . .
    PRMTC (MTCE, CFCE, D) =E=
    SUM (R$SUBROMCE (R), DSMBCE (R, MTCE) *ROMCFCE (R, CFCE, D));

EQOPCFCE (GCE, CFCE, D) $ODD (D) . .
    SUM (O$GRMCE (CFCE, GCE, O), OPCFCE (O, CFCE, D)) =E=
    SUM (MTCE, ALOCCE (GCE, CFCE, MTCE) *PRMTC (MTCE, CFCE, D));

EQPROPCE (O, D) $ (SUBOCE (O) *
    ODD (D)) . .
    W (O, D) =E= SUM (CFCE, OPCFCE (O, CFCE, D));

EQHMCE (D) $ODD (D) . .
    ROM ("HEMATCE", D) =L= CPRCE (D);

EQITCE (R, D) $ (SUBROMCE (R) *
    ODD (D)) . .
    ROM (R, D) =E= PRPCE (R) *ROM ("HEMATCE", D);

```

```

*
*   Funcao Objetivo
*

```

```

EQZ1..  Z1 =E=
    SUM ( (M, D) $PILCON (M), 100 *PENAL *FOLGA (M, D)) +
    SUM ( (M, P, D) $ (ATD (M, P) * (NOT PILCON (M)) *
    (NOT (PRT ("SUPEL", M) + PRT ("NIBRASCO", M))) *
    INVALID (D, M, P)),
    10 *PENAL *DQUANT (M, P, D)) +
    SUM ( (M, P, D) $ (ATD (M, P) * (PRT ("SUPEL", M) + PRT ("NIBRASCO", M)) *
    INVALID (D, M, P)),
    100 *PENAL *DQUANT (M, P, D));

EQZ2..  Z2 =E=
    SUM (O$VAL (O), 10 * (FOLMINA (O) + EXCMINA (O)));

EQZ3..  Z3 =E=
    SUM ( (O, M, P, D) $ATV (O, M, P, D), CUSTO (O) *X (O, M, P, D)) +
    SUM ( (O, M, P, B, D) $ (MP (M, O) * ATD (M, P) * VALID (D, M, P) *
    DSG ("TUB", M) * MOB (B, O)),
    CUSTOTR (B) *X (O, M, P, D));

```



```
EQOBJ.. Z =E= Z1 + Z2 + Z3 ;  
MODEL VALE /ALL/;  
SOLVE VALE USING LP MINIMIZING Z;
```

Apêndice B

Relatórios do Primeiro Cenário

PLANEJAMENTO DE CONSTRUCAO DE PILHAS DE MINERIO COMERCIAL

minerio comercial : CFF08

PIL	No.DE PIL.	est. (ton)	DIA	prod. (ton)	acum. (ton)	min. operacionais (ton)			
						PFCA	PXCA	PFCE	PFCP
P1	P1016	0	D5	27491	27491 *	4402	15456	7633	
			D6	34440	61931 *		20440	14000	
			D7	16998	78929 *		2998	14000	
			D8	34552	113481 *		23177	5675	5700
			D9	519	114000 *			519	
						4402	62071	41827	5700

minerio comercial : CFM15

PIL	No.DE PIL.	est. (ton)	DIA	prod. (ton)	acum. (ton)	mi.operac.(ton)	
						PECA	PXCA
P1	P1142	0	D2	330	330 *	330	
			D3	4277	4607 *	4277	
			D4	17393	22000 *	9143	8250
						13750	8250

minerio comercial : CFE02

PIL	No.DE PIL.	est. (ton)	DIA	prod. (ton)	acum. (ton)	mi.operac.(ton)	
						PXCA	PECE
P1	0245-F	0	D2	6726	6726 *	5605	1121

PLANEJAMENTO DE CONSTRUCAO DE PILHAS DE MINERIO COMERCIAL

minerio comercial : CSSF

PIL	NAVIO	est. (ton)	DIA	prod. (ton)	acum. (ton)	min. operacionais (ton)			
						SECA	F3CA	SECE	FCTU
P1	L_TRASSY	0	D2	6367	6367 *			6367	
			D3	18117	24484 *	2061	8391	7665	
			D4	22857	47341 *	7403	2081	13372	
			D5	12659	60000 *	3546		7368	1745
						13010	10472	34772	1745
P2	A_PRIDE	0	D8	3037	3037 *			3037	
			D9	16985	20023 *			15600	1386
			D10	29977	50000 *	3923	9854	16200	
						3923	9854	34837	1386
total : ->				110000	110000 *	16933	20327	69609	3131

minerio comercial : CSFCO

PIL	NAVIO	est. (ton)	DIA	prod. (ton)	acum. (ton)	mi.operac.(ton)	
						SECA	FCTU
P1	TROMBETAS	13933	D3	16067	30000 *	14053	2014
P2	TROMBETAS	0	D6	6238	6238 *	3038	3200
			D7	16239	22477 *	16239	
			D9	7523	30000 *	7008	516
						26284	3716
total : ->				46067	60000 *	40337	5730

PLANEJAMENTO DE CONSTRUCAO DE PILHAS DE MINERIO COMERCIAL

minerio comercial : CNBCA

est.		prod.		saida		acum.	m.op.(ton)	
PIL (ton)	DIA	(ton)	PIL	NAVIO	(ton)	(ton)	NBCA	
P10	6000	D1	2160			8160	*	2160
		D2	19367			27527	*	19367
		D9	12473			40000	*	12473
		D10	0	P1	HIGHLAND	40000	0	

								34000

minerio comercial : CCST

est.		prod.		saida		acum.	mi.operac.(ton)	
PIL (ton)	DIA	(ton)	PIL	NAVIO	(ton)	(ton)	SECA	SFCA
P10	0	D3	6000			6000	*	6000
		D7	6000			12000	*	6000
		D11	6000			18000	*	6000

								12000 6000

QUALIDADE DIARIA DAS PILHAS DE MINERIO COMERCIAL

minerio comercial : CFF08

PIL NAV./No.PI	DIA	prod. (ton)	acum. (ton)	propriedades (%)				
				SiO2	P	AL2O3	MN	
P1	P1016	D5	27491	27491 *	1.73	0.02	0.27	0.06
		D6	34440	61931 *	1.72	0.02	0.27	0.06
		D7	16998	78929 *	1.87	0.02	0.28	0.06
		D8	34552	113481 *	1.70	0.02	0.29	0.06
		D9	519	114000 *	1.70	0.02	0.29	0.06
					-> minimo :	1.70	0.01	0.06
					-> maximo :	2.33	0.03	0.59
					-> meta :			

minerio comercial : CFM15

PIL NAV./No.PI	DIA	prod. (ton)	acum. (ton)	propriedades (%)				
				SiO2	P	AL2O3	MN	
P1	P1142	D2	330	330 *	0.60	0.02	0.25	0.05
		D3	4277	4607 *	0.60	0.02	0.25	0.05
		D4	17393	22000 *	0.75	0.02	0.25	0.05
					-> minimo :	0.65		
					-> maximo :	0.75	0.03	0.55
					-> meta :			

minerio comercial : CFE02

PIL NAV./No.PI	DIA	prod. (ton)	acum. (ton)	propriedades (%)				
				SiO2	P	AL2O3	MN	
P1	0245-F	D2	6726	6726 *	1.20	0.02	0.26	0.05
					-> maximo :	1.20	0.03	0.50
					-> meta :			

QUALIDADE DIARIA DAS PILHAS DE MINERIO COMERCIAL

 minerio comercial : CSSF

PIL NAV./No.PI	DIA	prod. (ton)	acum. (ton)	propriedades (%)							
				FE	SiO2	P	AL2O3	H2O	M015	P63	
P1	L_TRASSY	D2	6367	6367 *	65.08	5.50	0.03	0.70	6.38	28.00	6.64
		D3	18117	24484 *	65.02	5.60	0.02	0.79	6.70	33.80	5.01
		D4	22857	47341 *	65.07	5.45	0.03	0.79	6.52	31.45	5.49
		D5	12659	60000 *	65.11	5.32	0.03	0.81	6.41	30.57	5.50
				-> minimo :	63.50	2.90	0.03	0.70	5.10	30.00	5.50
				-> maximo :		5.50	0.05	1.30	6.50	39.00	12.50
				-> meta :							
P2	A_PRIDE	D8	3037	3037 *	65.08	5.50	0.03	0.70	6.38	28.00	6.64
		D9	16985	20023 *	65.12	5.28	0.03	0.74	6.25	27.91	6.18
		D10	29977	50000 *	65.07	5.45	0.03	0.78	6.50	31.24	5.50
				-> minimo :	63.50	2.90	0.03	0.70	5.10	30.00	5.50
				-> maximo :		5.50	0.05	1.30	6.50	39.00	12.50
				-> meta :							

=====

minerio comercial : CSFCO

PIL NAV./No.PI	DIA	prod. (ton)	acum. (ton)	propriedades (%)								
				P1	FE	SiO2	P	AL2O3	H2O	M015	P63	
P1	TROMBETAS	e.i:	13933 *	51.10	65.14	4.62	0.03	0.77	6.48	28.25	7.29	
		D3	16067	30000 *	51.00	65.25	4.50	0.03	0.88	6.10	27.09	6.18
				-> minimo :	51.00	64.30	4.25					
				-> maximo :			4.75	0.03	1.15	7.50	28.00	11.00
				-> meta :								
P2	TROMBETAS	D6	6238	6238 *	28.35	65.52	3.49	0.04	1.11	5.23	26.33	2.90
		D7	16239	22477 *	49.92	65.36	4.36	0.03	0.99	5.74	26.09	5.11
		D9	7523	30000 *	51.00	65.35	4.41	0.03	0.98	5.77	26.08	5.22
				-> minimo :	51.00	64.30	4.25					
				-> maximo :			4.75	0.03	1.15	7.50	28.00	11.00
				-> meta :								

=====

PLANEJAMENTO DE PRODUÇÃO DE MINERIO OPERACIONAL NAS MINAS

MINA	DIA	min. operacionais (ton)							total	
		PECA	PFCA	PXCA	SECA	SFCA	F3CA	NBCA		
CAUE	D1	*		11340	8057		4333	2450	* 26180	
	D2	*	3550	7790	8057		4333	2450	* 26180	
	D3	*		11176	7941		4270	2415	* 25802	
	D4	*	11340		8057		4333	2450	* 26180	
	D5	*		11340	6171	2900	3319	2450	* 26180	
	D6	*		11340	8057		4333	2450	* 26180	
	D7	*		11340	8057		4333	2450	* 26180	
	D8	*	7231	1609	2500	2920	7900	1570	2450	* 26180
	D9	*		8380		5954		3202	1811	* 19347
-> total :		22121	9990	66826	63271	10800	34027	21375	228409	

-> rom(itabirito) : 305359

-> rom(hematita) : 61072

MINA	DIA	min.operacionais (ton)			total	
		PFCE	PECE	SECE		
CONCEICAO	D1	*	6704	7368	* 14072	
	D2	*	6704	7368	* 14072	
	D3	*	6704	7368	* 14072	
	D4	*	6704	7368	* 14072	
	D5	*	6704	7368	* 14072	
	D6	*	2111	4594	7368	* 14072
	D7	*	5675	1029	7368	* 14072
	D8	*	6704		7368	* 14072
	D9	*	5974		6565	* 12539
-> total :		53986	5623	65509	125118	

-> rom(itabirito) : 117361

-> rom(hematita) : 53346

PLANEJAMENTO DE EMBARQUE DO MINERIO OPERACIONAL

IEMB	DIA	min. operacionais (ton)							total
		PECA	PFCA	PXCA	SECA	SFCA	F3CA	NBCA	
JP	D0 *	0	0	0	0	0	0	2880 *	2880
	D1 *	330	0	5605	0	0	0	25822 *	31757
	D2 *	4277	0	0	22114	0	8391	0 *	34783
	D3 *	9143	0	8250	7403	0	2081	0 *	26878
	D4 *	0	4402	15456	3546	0	0	0 *	23404
	D5 *	0	0	20440	3038	0	0	0 *	23477
	D6 *	0	0	2998	16239	6000	0	0 *	25237
	D7 *	0	0	23177	0	0	0	0 *	23177
	D8 *	0	0	0	7008	0	0	16631 *	23639
	D9 *	0	0	0	3923	0	9854	0 *	13777
	D10*	0	0	0	6000	0	0	0 *	6000
-> total :		13750	4402	75926	69271	6000	20327	45333	235009

IEMB	DIA	min. operacionais (ton)				total
		PFCE	PECE	SECE	PFCEP	
CE	D1 *	0	1121	6367	0 *	7488
	D2 *	0	0	7665	0 *	7665
	D3 *	0	0	13372	0 *	13372
	D4 *	7633	0	7368	0 *	15001
	D5 *	14000	0	0	0 *	14000
	D6 *	14000	0	0	0 *	14000
	D7 *	5675	0	3037	5700 *	14412
	D8 *	519	0	15600	0 *	16118
	D9 *	0	0	16200	0 *	16200
-> total :		41827	1121	69609	5700	118257

PLANEJAMENTO DE ESTOQUE DE MINERIO OPERACIONAL NAS MINAS (ton)

MINA : CAUE

		finos e s.finos										
I		-----*						I				
I		-----*						I				
DIA	I	PECA	PFCA	PXCA	SECA	SFCA	F3CA	*	total	I	NBCA	I
=====	I	=====	=====	=====	=====	=====	=====	*	=====	I	=====	I
00	I	10200	13000	11600	6000	3100	2600	*	46500	I	25000	I
01	I	9870	13000	17335	14057	3100	6933	*	64295	I	1628	I
02	I	9143	13000	25125	0	3100	2875	*	53243	I	4078	I
03	I	0	13000	28051	537	3100	5064	*	49752	I	6492	I
04	I	11340	8598	12595	5048	3100	9397	*	50078	I	8942	I
05	I	11340	8598	3495	8182	6000	12716	*	50331	I	11392	I
06	I	11340	8598	11837	0	0	17049	*	48824	I	13842	I
07	I	11340	8598	0	8057	0	21382	*	49376	I	16292	I
08	I	18571	10207	2500	3969	7900	22952	*	66099	I	2111	I
09	I	18571	18587	2500	6000	7900	16300	*	69858	I	3922	I
010	I	18571	18587	2500	0	7900	16300	*	63858	I	3922	I
=====	I	=====	=====	=====	=====	=====	=====	*	=====	I	=====	I

PLANEJAMENTO DE ESTOQUE DE MINERIO OPERACIONAL NAS MINAS (ton)

MINA : CONCEICAO

DIA	finos			superfinos		
	SECE	total		PFCE	PECE	total
D0	5300	5300		0	6700	6700
D1	6301	6301		6704	5579	12283
D2	6004	6004		13409	5579	18988
D3	0	0		20113	5579	25692
D4	0	0		19185	5579	24764
D5	7368	7368		11889	5579	17468
D6	14736	14736		0	10173	10173
D7	19066	19066		0	11202	11202
D8	10835	10835		6185	11202	17388
D9	1200	1200		12159	11202	23361
D10	1200	1200		12159	11202	23361

PLANEJAMENTO DE ESTOQUE DE MINERIO COMERCIAL NO PORTO (ton)

(FINOS)

dia	CSSF		CSFCO		total real	total bloqu.
	P1	P2	P1	P2		
D1			+	13933	* 13933 *	90000 *
D2	6367		+	13933	* 20300 *	90000 *
D3	24484		+	30000	* 54484 *	90000 *
D4	47341		+	30000	* 77341 *	90000 *
D5	60000		+	30000	* 90000 *	90000 *
D6	60000		+		* 6238 *	90000 *
D7	60000		+		* 22477 *	90000 *
D8		3037	+		* 22477 *	80000 *
D9		20023	+		* 30000 *	80000 *
D10		50000	+		* 30000 *	80000 *

PLANEJAMENTO DE ESTOQUE DE MINERIO COMERCIAL NO PORTO (ton)

(GRANULADOS)

dia	CNBCA	
	P10	total real
D1	8160 *	8160 *
D2	27527 *	27527 *
D3	27527 *	27527 *
D4	27527 *	27527 *
D5	27527 *	27527 *
D6	27527 *	27527 *
D7	27527 *	27527 *
D8	27527 *	27527 *
D9	40000 *	40000 *
D10	0 *	0 *

UTILIZACAO DE VAGOES, LOCOMOTIVAS E TRENS

DIA	Numero de vagoes utilizados	Numero de locomotivas utilizadas	Ciclo Medio ponderado de vagoes	Ciclo Medio ponderado de locomot.	Numero de trens no trecho TUDD
===	=====	=====	=====	=====	=====
D1	1008	11.0	1.89	1.65	3.34
D2	1008	11.0	1.89	1.65	3.34
D3	1006	11.0	1.92	1.68	3.27
D4	1004	11.0	1.94	1.70	3.23
D5	1004	11.0	1.94	1.70	3.23
D6	1004	11.0	1.94	1.70	3.23
D7	1004	11.0	1.94	1.70	3.23
D8	1004	11.0	1.94	1.70	3.23
D9	742	8.1	1.98	1.74	2.34
D10	136	1.5	1.84	1.60	0.46
total :	8921	97.6	1.93	1.69	28.93

Apêndice C

Relatórios do Segundo Cenário

PLANEJAMENTO DE CONSTRUCAO DE PILHAS DE MINERIO COMERCIAL

minerio comercial : CFF08

PIL	No.DE PIL.	est. (ton)	DIA	prod. (ton)	acum. (ton)	min. operacionais (ton)			
						PFCA	PXCA	PFCE	PFCP
P1	P1016	0	D5	9250	9250 *	9250			
			D6	34756	44006 *		28132	6624	
			D7	28929	72935 *	22305		924	5700
			D8	32390	105325 *	3087	22680	6624	
			D9	8675	114000 *	2026	6649		
						36667	57462	14171	5700

minerio comercial : CFM15

PIL	No.DE PIL.	est. (ton)	DIA	prod. (ton)	acum. (ton)	mi.operac.(ton)	
						PECA	PXCA
P1	P1142	0	D2	10646	10646 *	10646	
			D3	11354	22000 *	3104	8250
						13750	8250

minerio comercial : CFE02

PIL	No.DE PIL.	est. (ton)	DIA	prod. (ton)	acum. (ton)	m.op.(ton)
						PXCA
P1	0245-F	0	D2	6726	6726 *	6726

PLANEJAMENTO DE CONSTRUCAO DE PILHAS DE MINERIO COMERCIAL

minerio comercial : CSSF

PIL	NAVIO	est. (ton)	DIA	prod. (ton)	acum. (ton)	min. operacionais (ton)				
						SECA	SFCA	F3CA	SECE	FCTU
P1	L_TRASSY	0	D2	7954	7954 *				7665	290
			D3	13934	21888 *		6269		7665	
			D4	22744	44633 *	949	10931		7665	3200
			D5	15367	60000 *	3589			11778	
						4537	17201		34772	3490
P2	A_PRIDE	0	D8	1099	1099 *					1099
			D10	35452	36551 *	9748	7411	2093	16200	
						9748	7411	2093	16200	1099
total : ->				96551	96551 *	14285	24612	2093	50972	4589

minerio comercial : CSFCO

PIL	NAVIO	est. (ton)	DIA	prod. (ton)	acum. (ton)	mi.operac.(ton)	
						SECA	FCTU
P1	TROMBETAS	13933	D2	3487	17420 *	3487	
			D3	12580	30000 *	10566	2014
						14053	2014
P2	TROMBETAS	0	D7	3200	3200 *		3200
			D8	6953	10153 *	6953	
			D9	13649	23802 *	13133	516
			*D10	6198	30000 *	6198	
						26284	3716
total : ->				46067	60000 *	40337	5730

PLANEJAMENTO DE CONSTRUCAO DE PILHAS DE MINERIO COMERCIAL

minerio comercial : CNBCA

est.	prod.	saida		acum.	m.op.(ton)	
PIL (ton)	DIA (ton)	PIL	NAVIO	(ton)	NBCA	
P10 6000	D1	2160		8160 *	2160	
	D2	8475		16635 *	8475	
	D4	15656		32291 *	15656	
	D6	2950		35241 *	2950	
	D7	2694		37935 *	2694	
	D9	2065		40000 *	2065	
	D10	0	P1 HIGHLAND	40000	0	

					34000	
=====						

minerio comercial : CCST

est.	prod.	saida		acum.	mi.operac.(ton)	
PIL (ton)	DIA (ton)	PIL	NAVIO	(ton)	SECA	SFCA
P10 0	D3	6000		6000 *	6000	
	D7	6000		12000 *	6000	
	D11	6000		18000 *	6000	

					12000	6000
=====						

QUALIDADE DIARIA DAS PILRAS DE MINERIO COMERCIAL

minerio comercial : CFF08

PIL NAV./No.PI	DIA	prod. (ton)	acum. (ton)	propriedades (%)					
				SiO2	P	AL2O3	MN		
P1	P1016	05	9250	9250 *	2.50	0.02	0.30	0.05	
		06	34756	44006 *	1.58	0.02	0.27	0.05	
		07	28929	72935 *	1.83	0.02	0.31	0.06	
		08	32390	105325 *	1.73	0.02	0.30	0.06	
		09	8679	114000 *	1.70	0.02	0.29	0.06	
					-> minimo :	1.70	0.01		0.06
					-> maximo :	2.33	0.03	0.59	0.13
					-> meta :				

minerio comercial : CFM15

PIL NAV./No.PI	DIA	prod. (ton)	acum. (ton)	propriedades (%)					
				SiO2	P	AL2O3	MN		
P1	P1142	02	10646	10646 *	0.60	0.02	0.25	0.05	
		03	11354	22000 *	0.75	0.02	0.25	0.05	
					-> minimo :	0.65			
					-> maximo :	0.75	0.03	0.55	0.08
					-> meta :				

minerio comercial : CFE02

PIL NAV./No.PI	DIA	prod. (ton)	acum. (ton)	propriedades (%)					
				SiO2	P	AL2O3	MN		
P1	0245-F	02	6726	6726 *	1.00	0.02	0.25	0.05	
					-> maximo :	1.20	0.03	0.50	0.10
					-> meta :				

QUALIDADE DIARIA DAS PILHAS DE MINERIO COMERCIAL

minério comercial : CSSF

PIL NAV./No.PI	DIA	prod. (ton)	acum. (ton)	propriedades (%)							
				FE	SiO2	P	AL2O3	H2O	MO15	P63	
P1 L_TRASSY	02	7954	7954 *	65.10	5.38	0.03	0.72	6.31	27.95	6.40	
	03	13934	21888 *	65.05	5.46	0.03	0.71	6.43	30.21	5.85	
	04	22744	44633 *	65.08	5.24	0.03	0.75	6.33	30.85	5.16	
	05	15367	60000 *	65.09	5.26	0.03	0.75	6.32	30.00	5.50	
				-> minimo :	63.50	2.90	0.03	0.70	5.10	30.00	5.50
				-> maximo :		5.50	0.05	1.30	6.50	39.00	12.50
				-> meta :							
P2 A_PRIDE	08	1099	1099 *	65.73	2.34	0.04	1.27	4.56	26.64		
	010	35452	36551 *	65.11	5.22	0.03	0.79	6.32	30.00	5.50	
				-> minimo :	63.50	2.90	0.03	0.70	5.10	30.00	5.50
				-> maximo :		5.50	0.05	1.30	6.50	39.00	12.50
				-> meta :							

minério comercial : CSFCO

PIL NAV./No.PI	DIA	prod. (ton)	acum. (ton)	propriedades (%)								
				P1	FE	SiO2	P	AL2O3	H2O	MO15	P63	
P1 TROMBETAS	e.i:		13933 *	51.10	65.14	4.62	0.03	0.77	6.48	28.25	7.29	
	02	3487	17420 *	52.52	65.17	4.64	0.03	0.80	6.37	27.80	7.02	
	03	12580	30000 *	51.00	65.25	4.50	0.03	0.88	6.10	27.09	6.18	
				-> minimo :	51.00	64.30	4.25					
				-> maximo :			4.75	0.03	1.15	7.50	28.00	11.00
				-> meta :								
P2 TROMBETAS	07	3200	3200 *	65.73	2.34	0.04	1.27	4.56	26.64			
	08	6953	10153 *	39.86	65.44	3.96	0.03	1.04	5.51	26.20	4.08	
	09	13649	23802 *	49.12	65.37	4.33	0.03	0.99	5.72	26.10	5.03	
	010	6198	30000 *	51.00	65.35	4.41	0.03	0.98	5.77	26.08	5.22	
				-> minimo :	51.00	64.30	4.25					
				-> maximo :			4.75	0.03	1.15	7.50	28.00	11.00
				-> meta :								

PLANEJAMENTO DE PRODUÇÃO DE MINERIO OPERACIONAL NAS MINAS

MINA	DIA	min. operacionais (ton)							total
		PECA	PFCA	PXCA	SECA	SFCA	F3CA	NBCA	
CAUE	D1 *	3550	4414	3376	5996	3169	3225	2450	* 26180
	D2 *		11340		8057		4333	2450	* 26180
	D3 *		5888	5452	949	10931	510	2450	* 26180
	D4 *			11340	8057		4333	2450	* 26180
	D5 *			11340	8057		4333	2450	* 26180
	D6 *			11340	4155	6000	2235	2450	* 26180
	D7 *			11340	8057		4333	2450	* 26180
	D8 *		4691	6649	8057		4333	2450	* 26180
	D9 *	6783	4557		3238	7411	1741	2450	* 26180
	D10 *			8445	6000		3227	1825	* 19496
-> total :		10333	30889	69283	60622	27512	32602	23875	255116

-> rom(itabirito) : 341064

-> rom(hematita) : 68213

MINA	DIA	min.operacionais (ton)			total
		PFCE	PECE	SECE	
CONCEICAO	D1 *	6704		7368	* 14072
	D2 *	6704		7368	* 14072
	D3 *	6704		7368	* 14072
	D4 *	6704		7368	* 14072
	D7 *		6704	7368	* 14072
	D8 *	6704		7368	* 14072
	D9 *	1332		1464	* 2796
	D10 *	1092		1200	* 2292
-> total :		35946	6704	46872	89522

-> rom(itabirito) : 83973

-> rom(hematita) : 38169

PLANEJAMENTO DE EMBARQUE DO MINERIO OPERACIONAL

IEMB	DIA	min. operacionais (ton)							total
		PECA	PFCA	PXCA	SECA	SFCA	F3CA	N8CA	
JP	D0 *	0	0	0	0	0	0	2880 *	2880
	D1 *	10646	0	6726	3487	0	0	11300 *	32160
	D2 *	3104	0	8250	16566	6269	0	0 *	34189
	D3 *	0	0	0	949	10931	0	20874 *	32754
	D4 *	0	9250	0	3589	0	0	0 *	12839
	D5 *	0	0	28132	0	0	0	3933 *	32065
	D6 *	0	22305	0	0	6000	0	3593 *	31897
	D7 *	0	3087	22680	6953	0	0	0 *	32720
	D8 *	0	2026	6649	13133	0	0	2753 *	24562
	D9 *	0	0	0	15945	7411	2093	0 *	25449
	D10*	0	0	0	6000	0	0	0 *	6000
-> total :		13750	36667	72438	66622	30612	2093	45333	267515

IEMB	DIA	min.operacionais (ton)			total
		PFCE	SECE	PFCP	
CE	D1 *	0	7665	0 *	7665
	D2 *	0	7665	0 *	7665
	D3 *	0	7665	0 *	7665
	D4 *	0	11778	0 *	11778
	D5 *	6624	0	0 *	6624
	D6 *	924	0	5700 *	6624
	D7 *	6624	0	0 *	6624
	D9 *	0	16200	0 *	16200
-> total :		14171	50972	5700	70843

PLANEJAMENTO DE ESTOQUE DE MINERIO OPERACIONAL NAS MINAS (ton)

MINA : CAUE

		finos e s.finos										
		-----						*	-----			
DIA	I	PECA	PFCA	PXCA	SECA	SFCA	F3CA	*	total	I	NBCA	I
=====	I	=====	=====	=====	=====	=====	=====	*	=====	I	=====	I
D0	I	10200	13000	11600	6000	3100	2600	*	46500	I	25000	I
D1	I	3104	17414	8250	8509	6269	5825	*	49371	I	16150	I
D2	I	0	28754	0	0	0	10158	*	38912	I	18600	I
D3	I	0	34642	5452	0	0	10668	*	50762	I	175	I
D4	I	0	25392	16792	4468	0	15001	*	61653	I	2625	I
D5	I	0	25392	0	12525	0	19334	*	57251	I	1143	I
D6	I	0	3087	11340	16680	0	21568	*	52676	I	0	I
D7	I	0	0	0	17784	0	25901	*	43686	I	2450	I
D8	I	0	2665	0	12708	0	30234	*	45607	I	2147	I
D9	I	6783	7222	0	0	0	29883	*	43888	I	4597	I
D10	I	6783	7222	8445	0	0	33110	*	55560	I	6421	I
=====	I	=====	=====	=====	=====	=====	=====	*	=====	I	=====	I

PLANEJAMENTO DE ESTOQUE DE MINERIO OPERACIONAL NAS MINAS (ton)

MINA : CONCEICAO

DIA	finos			superfinos		
	SECE	total		PFCE	PECE	total
D0	5300	5300		0	6700	6700
D1	5003	5003		6704	6700	13404
D2	4707	4707		13409	6700	20109
D3	4410	4410		20113	6700	26813
D4	0	0		26818	6700	33518
D5	0	0		20194	6700	26894
D6	0	0		19270	6700	25970
D7	7368	7368		12647	13404	26051
D8	14736	14736		19351	13404	32755
D9	0	0		20683	13404	34088
D10	1200	1200		21775	13404	35179

PLANEJAMENTO DE ESTOQUE DE MINERIO COMERCIAL NO PORTO (ton)

(FINOS)

dia	CSSF		CSFCO		total real	total bloqu.
	P1	P2	P1	P2		
D1			+	13933	* 13933 *	90000 *
D2	7954		+	17420	* 25374 *	90000 *
D3	21888		+	30000	* 51888 *	90000 *
D4	44633		+	30000	* 74633 *	90000 *
D5	60000		+	30000	* 90000 *	90000 *
D6	60000		+		* 60000 *	90000 *
D7	60000		+	3200	* 63200 *	90000 *
D8		1099	+	10153	* 11252 *	80000 *
D9		1099	+	23802	* 24901 *	80000 *
D10		36551	+	30000	* 66551 *	80000 *

PLANEJAMENTO DE ESTOQUE DE MINERIO COMERCIAL NO PORTO (ton)

(GRANULADOS)

dia	CNBCA	
	P10	total real
D1	8160 *	8160 *
D2	16635 *	16635 *
D3	16635 *	16635 *
D4	32291 *	32291 *
D5	32291 *	32291 *
D6	35241 *	35241 *
D7	37935 *	37935 *
D8	37935 *	37935 *
D9	40000 *	40000 *
D10	0 *	0 *

UTILIZACAO DE VAGOES, LOCOMOTIVAS E TRENS

DIA	Numero de vagoes utilizados	Numero de locomotivas utilizadas	Ciclo Medio ponderado de vagoes	Ciclo Medio ponderado de locomot.	Numero de trens no trecho TUDD
===	=====	=====	=====	=====	=====
D1	1008	11.0	1.89	1.65	3.34
D2	1008	11.0	1.89	1.65	3.34
D3	1008	11.0	1.89	1.65	3.34
D4	627	6.9	1.96	1.72	2.00
D5	1008	11.0	1.89	1.65	3.34
D6	1008	11.0	1.89	1.65	3.34
D7	1008	11.0	1.89	1.65	3.34
D8	589	6.4	1.84	1.60	2.00
D9	1004	11.0	1.94	1.70	3.23
D10	136	1.5	1.84	1.60	0.46
----	-----	-----	-----	-----	-----
total :	8406	91.8	1.89	1.65	27.75

Apêndice D

Relatórios do Terceiro Cenário

PLANEJAMENTO DE CONSTRUCAO DE PILHAS DE MINERIO COMERCIAL

minerio comercial : CFF08

PIL	No.DE PIL.	est.		prod. (ton)	acum. (ton)	min. operacionais (ton)			
		(ton)	DIA			PFCA	PXCA	PFCE	PFCP
P1	P1016	0	D5	28724	28724 *	22493	5975	256	
			D6	34756	63480 *		28132	6624	
			D7	14000	77480 *			8300	5700
			D8	24666	102147 *		24666		
			D9	11853	114000 *	4994		6860	
						27487	58773	22040	5700

minerio comercial : CFM15

PIL	No.DE PIL.	est.		prod. (ton)	acum. (ton)	mi.operac.(ton)	
		(ton)	DIA			PECA	PXCA
P1	P1142	0	D2	4607	4607 *	4607	
			D4	17393	22000 *	9143	8250
						13750	8250

minerio comercial : CFE02

PIL	No.DE PIL.	est.		prod. (ton)	acum. (ton)	m.op.(ton)
		(ton)	DIA			PXCA
P1	0245-F	0	D2	6726	6726 *	6726

PLANEJAMENTO DE CONSTRUCAO DE PILHAS DE MINERIO COMERCIAL

minerio comercial : CSSF

PIL	NAVIO	est. (ton)	DIA	prod. (ton)	acum. (ton)	min. operacionais (ton)			
						SECA	F3CA	SECE	FCTU
P1	L_TRASSY	0	D2	15748	15748 *	4	3669	12075	
			D3	7665	23412 *			7665	
			D4	25871	49283 *	10114	5482	7665	2611
			D5	10717	60000 *	3349		7368	
						13467	9150	34772	2611
P2	A_PRIDE	0	D8	14941	14941 *			14759	182
			D10	35059	50000 *	10662	10599	13799	
						10662	10599	28558	182
P3	AFRICANA	0	D8	20	20 *			20	
			D9	8262	8282 *			8262	
			D10	6718	15000 *	3504	3213		
						3504	3213	8282	
total : ->				125000	125000 *	27633	22962	71612	2793

minerio comercial : CSFCO

PIL	NAVIO	est. (ton)	DIA	prod. (ton)	acum. (ton)	mi.operac.(ton)	
						SECA	FCTU
P1	TROMBETAS	13933	D2	16067	30000 *	14053	2014
P2	TROMBETAS	0	D6	4425	4425 *	4425	
			D7	11855	16279 *	11855	
			D8	3018	19297 *		3018
			D9	10703	30000 *	10005	698
						26284	3716
total : ->				46067	60000 *	40337	5730

PLANEJAMENTO DE CONSTRUCAO DE PILHAS DE MINERIO COMERCIAL

minerio comercial : CNBCA

PIL (ton)	est.	DIA	prod.		saida (ton)	acum. (ton)	m.op.(ton)		
	PIL		NAVIO	SECA			SFCA		
P10	6000	D1	2160			8160	*	2160	
		D3	19760			27920	*	19760	
		D4	262			28182	*	262	
		D7	5141			33323	*	5141	
		D9	6677			40000	*	6677	
		D10	0	P1	HIGHLAND	40000	0		
								34000	

minerio comercial : CCST

PIL (ton)	est.	DIA	prod.		saida (ton)	acum. (ton)	mi.operac.(ton)		
			PIL	NAVIO			SECA	SFCA	
P10	0	D3	6000			6000	*	6000	
		D7	6000			12000	*	6000	
		D11	6000			18000	*	6000	
								12000	6000

QUALIDADE DIARIA DAS PILHAS DE MINERIO COMERCIAL

 minerio comercial : CFF08

PIL NAV./No.PI	DIA	prod. (ton)	acum. (ton)	propriedades (%)				
				SI02	P	AL203	MN	
P1	P1016	D5	28724	28724 *	2.19	0.02	0.29	0.05
		D6	34756	63480 *	1.72	0.02	0.27	0.05
		D7	14000	77480 *	1.78	0.02	0.31	0.06
		D8	24666	102147 *	1.59	0.02	0.29	0.06
		D9	11853	114000 *	1.70	0.02	0.29	0.06
				-> minimo :	1.70	0.01		0.06
				-> maximo :	2.33	0.03	0.59	0.13
				-> meta :				

 minerio comercial : CFM15

PIL NAV./No.PI	DIA	prod. (ton)	acum. (ton)	propriedades (%)				
				SI02	P	AL203	MN	
P1	P1142	D2	4607	4607 *	0.60	0.02	0.25	0.05
		D4	17393	22000 *	0.75	0.02	0.25	0.05
				-> minimo :	0.65			
				-> maximo :	0.75	0.03	0.55	0.08
				-> meta :				

 minerio comercial : CFE02

PIL NAV./No.PI	DIA	prod. (ton)	acum. (ton)	propriedades (%)				
				SI02	P	AL203	MN	
P1	0245-F	D2	6726	6726 *	1.00	0.02	0.25	0.05
				-> maximo :	1.20	0.03	0.50	0.10
				-> meta :				

QUALIDADE DIARIA DAS PILHAS DE MINERIO COMERCIAL

 minério comercial : CSSF

PIL NAV./No.PI	DIA	prod. (ton)	acum. (ton)	propriedades (%)							
				FE	SiO2	P	AL2O3	H2O	M015	P63	
P1 L_TRASSY	D2	15748	15748 *	65.03	5.62	0.02	0.75	6.62	32.06	5.57	
	D3	7665	23412 *	65.04	5.58	0.02	0.73	6.54	30.73	5.92	
	D4	25871	49283 *	65.12	5.26	0.03	0.82	6.39	30.75	5.30	
	D5	10717	60000 *	65.12	5.26	0.03	0.81	6.36	30.15	5.50	
				-> mínimo :	63.50	2.90	0.03	0.70	5.10	30.00	5.50
				-> máximo :		5.50	0.05	1.30	6.50	39.00	12.50
				-> meta :							
P2 A_PRIDE	D8	14941	14941 *	65.09	5.46	0.03	0.71	6.36	27.98	6.56	
	D10	35059	50000 *	65.08	5.42	0.03	0.80	6.50	31.26	5.50	
				-> mínimo :	63.50	2.90	0.03	0.70	5.10	30.00	5.50
				-> máximo :		5.50	0.05	1.30	6.50	39.00	12.50
				-> meta :							
P3 AFRICANA	D8	20	20 *	65.08	5.50	0.03	0.70	6.38	28.00	6.64	
	D9	8262	8282 *	65.08	5.50	0.03	0.70	6.38	28.00	6.64	
	D10	6718	15000 *	65.08	5.42	0.03	0.80	6.50	31.26	5.50	
				-> mínimo :	63.50	2.90	0.03	0.70	5.10	30.00	5.50
				-> máximo :		5.50	0.05	1.30	6.50	39.00	12.50
				-> meta :							

 minério comercial : CSFCO

PIL NAV./No.PI	DIA	prod. (ton)	acum. (ton)	propriedades (%)								
				P1	FE	SiO2	P	AL2O3	H2O	M015	P63	
P1 TROMBETAS	e.i:		13933 *	51.10	65.14	4.62	0.03	0.77	6.48	28.25	7.29	
	D2	16067	30000 *	51.00	65.25	4.50	0.03	0.88	6.10	27.09	6.18	
				-> mínimo :	51.00	64.30	4.25					
				-> máximo :			4.75	0.03	1.15	7.50	28.00	11.00
				-> meta :								
P2 TROMBETAS	D6	4425	4425 *	58.21	65.30	4.70	0.03	0.94	5.94	26.00	5.96	
	D7	11855	16279 *	58.21	65.30	4.70	0.03	0.94	5.94	26.00	5.96	
	D8	3018	19297 *	49.11	65.37	4.33	0.03	0.99	5.72	26.10	5.03	
	D9	10703	30000 *	51.00	65.35	4.41	0.03	0.98	5.77	26.08	5.22	
				-> mínimo :	51.00	64.30	4.25					
				-> máximo :			4.75	0.03	1.15	7.50	28.00	11.00
				-> meta :								

PLANEJAMENTO DE PRODUCAO DE MINERIO OPERACIONAL NAS MINAS

min. operacionais (ton)										
MINA	DIA	PECA	PFCA	PXCA	SECA	SFCA	F3CA	NBCA	total	
CAUE	D1	*		11340	8057		4333	2450	* 26180	
	D2	*	3550	7790	8057		4333	2450	* 26180	
	D3	*		11340	8057		4333	2450	* 26180	
	D4	*		9493	1847	8057	4333	2450	* 26180	
	D5	*		7601	5400		2904	1642	* 17547	
	D6	*		11340	6171	2900	3319	2450	* 26180	
	D7	*		11340	8057		4333	2450	* 26180	
	D8	*		11340		8057	4333	2450	* 26180	
	D9	*		11340		8057	4333	2450	* 26180	
	D10	*	1700	4693	2052	6000	3227	1825	* 19496	
-> total :			5250	36866	64649	73970	2900	39781	23067	246483

-> rom(itabirito) : 329523

-> rom(hematita) : 65905

min.operacionais (ton)						
MINA	DIA	PFCE	PECE	SECE	total	
CONCEICAO	D1	*		6704	7368	* 14072
	D2	*	1771	4933	7368	* 14072
	D3	*		6704	7368	* 14072
	D4	*	6704		7368	* 14072
	D5	*		6704	7368	* 14072
	D6	*		6704	7368	* 14072
	D7	*	6704		7368	* 14072
	D8	*	6704		7368	* 14072
	D9	*		6704	7368	* 14072
-> total :			28589	31751	66312	126652

-> rom(itabirito) : 118800

-> rom(hematita) : 54000

PLANEJAMENTO DE EMBARQUE DO MINERIO OPERACIONAL

IEMB	DIA	min. operacionais (ton)							total
		PECA	PFCA	PXCA	SECA	SFCA	F3CA	NBCA	
JP	D0 *	0	0	0	0	0	0	2880 *	2880
	D1 *	4607	0	6726	14057	0	3669	0 *	29059
	D2 *	0	0	0	6000	0	0	26347 *	32347
	D3 *	9143	0	8250	10114	0	5482	350 *	33338
	D4 *	0	22493	5975	3349	0	0	0 *	31817
	D5 *	0	0	28132	4425	0	0	0 *	32557
	D6 *	0	0	0	11855	6000	0	6854 *	24709
	D7 *	0	0	24666	0	0	0	0 *	24666
	D8 *	0	4994	0	10005	0	0	8903 *	23901
	D9 *	0	0	0	14166	0	13812	0 *	27978
	D10*	0	0	0	6000	0	0	0 *	6000
-> total :		13750	27487	73749	79970	6000	22962	45333	269252

IEMB	DIA	min.operacionais (ton)			total
		PFCE	SECE	PFCP	
CE	D1 *	0	12075	0 *	12075
	D2 *	0	7665	0 *	7665
	D3 *	0	7665	0 *	7665
	D4 *	256	7368	0 *	7624
	D5 *	6624	0	0 *	6624
	D6 *	8300	0	5700 *	14000
	D7 *	0	14779	0 *	14779
	D8 *	6860	8262	0 *	15122
	D9 *	0	13799	0 *	13799
-> total :		22040	71612	5700	99352

PLANEJAMENTO DE ESTOQUE DE MINERIO OPERACIONAL NAS MINAS (ton)

MINA : CAUE

		finos e s.finos										
		-----*						-----I				
DIA	I	PECA	PFCA	PXCA	SECA	SFCA	F3CA	*	total	I	NBCA	I
=====	I	=====	=====	=====	=====	=====	=====	*	=====	I	=====	I
D0	I	10200	13000	11600	6000	3100	2600	*	46500	I	25000	I
D1	I	5593	13000	16214	0	3100	3264	*	41171	I	27450	I
D2	I	9143	13000	24004	2057	3100	7597	*	58901	I	3553	I
D3	I	0	13000	27094	0	3100	6449	*	49643	I	5653	I
D4	I	0	0	22966	4708	3100	10782	*	41556	I	8103	I
D5	I	0	0	2434	5684	3100	13686	*	24903	I	9746	I
D6	I	0	0	13774	0	0	17005	*	30779	I	5341	I
D7	I	0	0	448	8057	0	21338	*	29843	I	7791	I
D8	I	0	6346	448	6109	0	25671	*	38574	I	1339	I
D9	I	0	17686	448	0	0	16192	*	34326	I	3789	I
D10	I	1700	22379	2500	0	0	19419	*	45998	I	5613	I
=====	I	=====	=====	=====	=====	=====	=====	*	=====	I	=====	I

PLANEJAMENTO DE ESTOQUE DE MINERIO OPERACIONAL NAS MINAS (ton)

MINA : CONCEICAO

DIA	finos			superfinos		
	SECE	total		PFCE	PECE	total
D0	5300	5300	0	6700	6700	
D1	593	593	0	13404	13404	
D2	297	297	1771	18338	20109	
D3	0	0	1771	25042	26813	
D4	0	0	8219	25042	33261	
D5	7368	7368	8300	25042	33342	
D6	14736	14736	0	31746	31746	
D7	7325	7325	6704	31746	38451	
D8	6431	6431	6549	31746	38296	
D9	0	0	6549	38451	45000	
D10	0	0	6549	38451	45000	

PLANEJAMENTO DE ESTOQUE DE MINERIO COMERCIAL NO PORTO (ton)

(FINOS)

dia	CSSF			CSFCO		total real	total bloqu.
	P1	P2	P3	P1	P2		
D1				+	13933	* 13933 *	90000 *
D2	15748			+	30000	* 45748 *	90000 *
D3	23412			+	30000	* 53412 *	90000 *
D4	49283			+	30000	* 79283 *	90000 *
D5	60000			+	30000	* 90000 *	90000 *
D6	60000			+		* 4425 *	64425 *
D7	60000			+		* 16279 *	76279 *
D8		14941	20	+		* 19297 *	34258 *
D9		14941	8282	+		* 30000 *	53223 *
D10		50000	15000	+		* 30000 *	95000 *

PLANEJAMENTO DE ESTOQUE DE MINERIO COMERCIAL NO PORTO (ton)

(GRANULADOS)

dia	CNBCA	
	P10	total real
D1	8160 *	8160 *
D2	8160 *	8160 *
D3	27920 *	27920 *
D4	28182 *	28182 *
D5	28182 *	28182 *
D6	28182 *	28182 *
D7	33323 *	33323 *
D8	33323 *	33323 *
D9	40000 *	40000 *
D10	*	0 *

UTILIZACAO DE VAGUES, LOCOMOTIVAS E TRENS

DIA	Numero de vagoes utilizados	Numero de locomotivas utilizadas	Ciclo Medio ponderado de vagoes	Ciclo Medio ponderado de locomot.	Numero de trens no trecho TUDD
===	=====	=====	=====	=====	=====
D1	1006	11.0	1.91	1.67	3.29
D2	1008	11.0	1.89	1.65	3.34
D3	1008	11.0	1.89	1.65	3.34
D4	1008	11.0	1.89	1.65	3.34
D5	1008	11.0	1.89	1.65	3.34
D6	1004	11.0	1.94	1.70	3.23
D7	1005	11.0	1.93	1.69	3.25
D8	1004	11.0	1.94	1.70	3.23
D9	1005	11.0	1.92	1.68	3.26
D10	136	1.5	1.84	1.60	0.46
----	-----	-----	-----	-----	-----
total :	9194	100.5	1.91	1.67	30.10

Bibliografia

Bazaraa, M.S., Jarvis, J.J. & Sherali, H.D., "Linear programming and network flows", 2nd ed., John Wiley & Sons, 1990.

Brooke, A., Kendrick, D. & Meeraus, A., "GAMS: a user's guide", The Scientific Press, San Francisco, CA, 1988.

Garfinkel, R.S. & Nemhauser, G.L., "Integer programming", John Wiley & Sons, New York, 1972.

IBM, "Optimization subroutine library guide and reference, release 2", Kingston, NY, 1991.

Johnson, T.B., "Optimum open pit mine production scheduling", dissertação de doutorado, University of California, Berkeley, 1968.

Lerchs, H. & Grossmann, I.F., "Optimum design of open pit mines", The Canadian Mining and Metallurgical Bull., v. 58, p. 47-54, 1965.

Picard, J.C., "Maximal closure of a graph and applications to combinatorial problems", Management Science, v. 22, p. 1268-1272, 1976.

Tachefine, B.O., "Détermination du plan d'extraction d'une mine à ciel ouvert", dissertação de mestrado, École Polytechnique de Montréal, 1991.

Taube Netto, M., "CVRD: integração mina / estrada / porto - esboço de modelo matemático", relatório interno, UniSoma, Campinas, SP, 1994.

UniSoma, "Protótipo de curto prazo do planejamento integrado do Sistema Sul mina / estrada / porto", relatório final, Campinas, SP, 1995.