

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES E GEOTECNIA
NUCLETRANS – NÚCLEO DE TRANSPORTES

CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM
LOGÍSTICA ESTRATÉGICA E SISTEMAS DE TRANSPORTE

LOGÍSTICA DE ABASTECIMENTO DE MINÉRIO DE FERRO A UMA INDÚSTRIA
SIDERÚRGICA

Monografia

Eduardo Linhares Pessoa Ayres

Belo Horizonte, 2011

Eduardo Linhares Pessoa Ayres

LOGÍSTICA DE ABASTECIMENTO DE MINÉRIO DE FERRO A UMA INDÚSTRIA
SIDERÚRGICA

Trabalho apresentado ao Curso de Especialização em Logística Estratégica e Sistemas de Transporte, da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do Título de Especialista em Logística Estratégica e Sistemas de Transporte.

Orientador: Professor Dr. Roberto da Costa
Quinino

Belo Horizonte, 2011

LOGÍSTICA DE ABASTECIMENTO DE MINÉRIO DE FERRO A UMA
INDÚSTRIA SIDERÚRGICA

Eduardo Linhares Pessoa Ayres

Este trabalho foi analisado e julgado adequado para a obtenção do título de Especialista em Logística Estratégica e Sistemas de Transporte e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Roberto da Costa Quinino
Orientador

Prof^a. Dr^a. Leise Kelli de Oliveira
Avaliador

RESUMO

Com a implantação de uma indústria siderúrgica, surge a necessidade de se definirem as principais fontes fornecedoras das matérias primas do aço. O presente trabalho, utilizando o método de programação linear, visa a indicar, quais são as fontes de abastecimento de uma indústria siderúrgica que irão proporcionar menores custos com o transporte da principal matéria prima, o minério de ferro.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	5
1.1 OBJETIVO.....	6
1.2 JUSTIFICATIVA	6
3 METODOLOGIA.....	10
3.1 COLETA DE DADOS	10
3.2 MODELO DE OTIMIZAÇÃO	10
3.2.1 Pesquisa Operacional.....	11
4 ESTUDO DE CASO	12
4.1 Problema:.....	12
4.2 Dados.....	14
4.4 Solução do Problema:	19
5 CONCLUSÃO	26
6 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	27
7 ANEXOS.....	28

1 INTRODUÇÃO

Na fase de implantação de uma usina siderúrgica, uma das principais decisões estratégicas a se tomar é a de se optar pelas fontes fornecedoras de insumos. Dependente direta das mineradoras para o abastecimento do minério de ferro aos seus altos fornos, a usina deve, neste momento, realizar estudos a fim de definir fontes que possuem as melhores qualidades e menores custos de aquisição do mineral.

A combinação das diversas opções de fornecimento deverá apresentar o menor custo total de aquisição da necessidade anual de consumo da usina siderúrgica. O referido problema apresenta 19 possíveis fontes produtoras de minério de ferro ao destino final, podendo ou não utilizar 6 terminais rodo-ferroviário e diversas interligações rodoviárias. Para garantir que ele seja solucionado de maneira ótima, a construção de um modelo utilizando o método de programação linear torna-se necessária e possibilita conciliar todas as variáveis, tais como distância, custo de transporte, capacidade de movimentação nos terminais e capacidade de produção das mineradoras.

1.1 OBJETIVO

- Identificar e propor os principais fornecedores de minério de ferro por meio da avaliação do custo de aquisição do mineral a uma indústria do ramo siderúrgico, utilizando um modelo de programação linear.

1.2 JUSTIFICATIVA

São denominadas usinas integradas aquelas que operam as três fases da produção: a redução, o refino e a laminação. O fluxo, demonstrado na figura 1, inicia-se na redução, quando o carvão vegetal e/ou mineral (coque) é carregado nos altos fornos e elevado, através da injeção de oxigênio, à temperaturas de até 1.000 ° C. A esta temperatura, minério e carvão iniciam o processo de fundição e são assim transformados em um metal líquido, o ferro gusa, liga de ferro e carbono, com teor elevado de carbono, sendo um material quebradiço e sem grande uso direto. A segunda fase, o refino, acontece nas aciarias, onde gusa e demais ligas ferrosas são misturadas num equipamento chamando convertedor. Através da injeção de oxigênio a altas temperaturas, ocorrem reações químicas que fazem com que o carbono presente no ferro gusa seja removido e, assim, transformado em aço líquido, que posteriormente é transformado em Lingotes, Placas, Blocos ou Tarugos.

A última fase que compõe a usina integrada de produtos de aços é a laminação. Nela, as barras maciças de aço passam por um processo de conformação mecânica, que consiste em deformar plasticamente o material, ou seja, fazê-lo mudar de forma, sendo que esta mudança ocorre por esmagamento entre os cilindros de laminação montados nas diversas cadeiras de laminação. Nesta etapa, os blocos são transformados no produto final do processo produtivo, tubos sem costura, fio máquina, perfis, chapas e placas.

As usinas Semi Integradas são as que operam duas fases: refino e laminação. O ferro gusa ou sucata metálica adquiridos de terceiros são transformados em aço nas aciarias elétricas, para então ocorrer a sua posterior laminação.

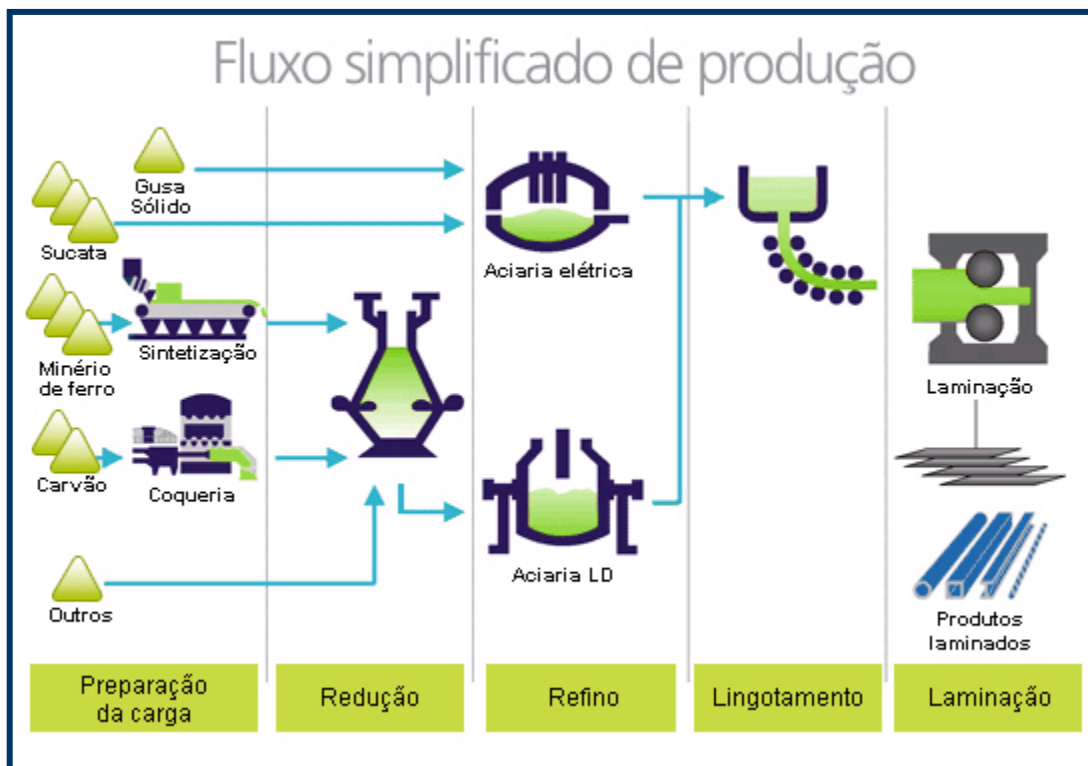


Figura 1: Fluxo Simplificado de Produção
Fonte: Instituto Aço Brasil

O país conta hoje com 27 usinas siderúrgicas, sendo 12 integradas e 15 semi-integradas, administradas por oito grandes grupos empresariais.

Segundo dados do Instituto Aço Brasil, o país produziu 26,5 milhões de toneladas de aço em 2009, um consumo per capita de 97 quilos de aço bruto e as vendas representaram 7,5% do saldo comercial do Brasil. O Estado de Minas Gerais foi responsável por 35% de todo o aço produzido no período de janeiro a abril de 2010, sendo o principal produtor do metal e seguido pelos estados do Rio de Janeiro, Espírito Santo e São Paulo.

Estatísticas levantadas pelo Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), ano referencia 2008, mostram que o Brasil se encontra na segunda posição dos maiores produtores do minério de ferro no mundo, produzindo neste

mesmo ano um total de 370 milhões de toneladas, ou 17% do total mundial. Minas Gerais foi responsável pela produção de 71% deste total. No Brasil, o setor siderúrgico é o principal consumidor do minério de ferro, sendo responsável por 77% do consumo total do mineral, sendo os outros 23% divididos entre usinas beneficiadoras de minerais, mercado de fundição e outros (ver figura 2).

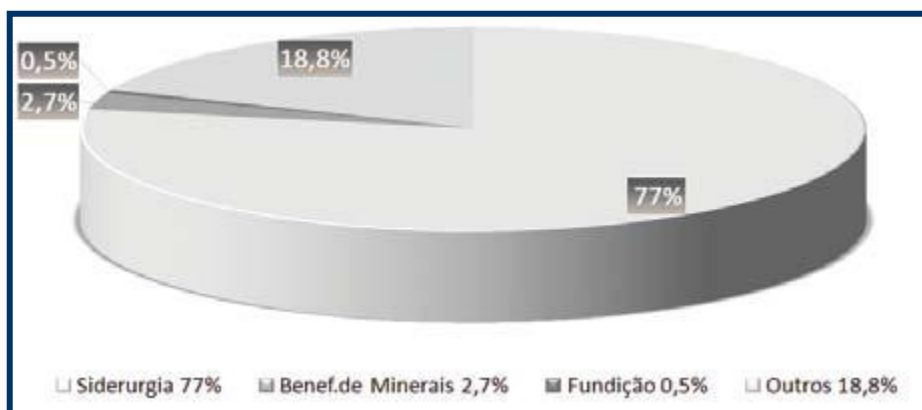


Figura 2: Mercado Consumidor de Minério de Ferro
Fonte: IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração

Ao analisar a atividade siderúrgica, podem-se identificar os seguintes fatores chave para operação: economias de escala (grandes volumes permitem a redução do custo unitário de produção, uma vez que os custos para o aumento de escala são proporcionalmente inferiores às despesas indiretas geradas para sustentar o novo patamar de produção), alta utilização da capacidade instalada (o setor é caracterizado por custos fixos substanciais, principalmente pela grande estrutura de ativos permanentes) e *know-how* dos processos de produção e gestão (eficácia operacional, pois o produto é considerado uma *commodity*). Além disso, atualização tecnológica (buscando elevada produtividade), acesso aos canais de distribuição dos produtos (principalmente para aços longos), baixo custo de frete (logística de entrega da produção), conhecimento do mercado consumidor e flexibilidade de atendimento (para atuar em nível mundial), disponibilidade para investimentos e, finalmente, acesso e conhecimento dos mercados de matérias-primas (minério de ferro, sucata, carvão, energia elétrica,...).

Toda atividade siderúrgica é dependente da utilização do minério, pois não existe nenhum substituto disponível que seja economicamente viável para utilização industrial. O processo de aciarias elétricas, que utiliza grande quantidade de sucata ferrosa na mistura, foi desenvolvido como uma alternativa, mas não elimina a utilização dos derivados de minério de ferro. Atualmente, a aquisição do insumo pode se dar através de duas formas: via contratos de fornecimento ou negociações *spots*. Visando a reduzir os riscos relacionados a problemas de abastecimento e exposição à variação da cotação no mercado internacional, as empresas siderúrgicas têm buscado firmar contratos com seus fornecedores (que também se beneficiam desses, na medida em que podem programar seus investimentos com maior segurança). De maneira geral, os contratos são estabelecidos visando a um relacionamento de longo prazo (podendo ter duração de até 10 anos de garantia de fornecimento), mas possuem previsões de reavaliações anuais. Já as negociações *spots* são realizadas em função de aumentos inesperados de demanda ou oportunidades existentes no mercado.

Conforme apresentado, percebe-se que existe uma interdependência muito grande entre as siderúrgicas e as mineradoras, tanto pelo lado das primeiras, que necessitam do insumo para produzirem seus produtos, como pelas segundas, que têm nas siderúrgicas seus principais clientes.

Os principais elementos de custo dos minérios de ferro são: mineração, tratamento e transporte. A composição de cada custo no produto final varia de caso para caso. Os custos de transporte interno até o porto de embarque e o frete internacional são os que mais oneram o preço final do produto. Baseados nos estudos realizados por QUARESMA (1987) e SOUZA (1991), os preços do minério de ferro dependem: da competição comercial, dos custos operacionais, da especificação do minério, do teor de ferro, dos impostos e taxas governamentais e da infra-estrutura.

3 METODOLOGIA

3.1 COLETA DE DADOS

Foi realizado levantamento de dados junto às minerações, terminais e usina através de pesquisa de campo com o objetivo de identificar os principais fatores e informações relevantes que irão compor as capacidades de produção, transporte, transbordo e demanda.

3.2 MODELO DE OTIMIZAÇÃO

Segundo LACERDA E CARVALHO (1999), otimização é a busca da melhor solução para um dado problema. Consiste em tentar várias soluções e utilizar a informação obtida nesse processo, de forma a encontrar soluções cada vez melhores. Trata-se, pois, de busca e otimização das soluções.

Toda tarefa de busca e otimização possui vários componentes, entre eles: um espaço de busca, onde são consideradas todas as possibilidades de solução de um determinado problema, e uma função de avaliação (ou função de custo), uma maneira de avaliar os membros do espaço de busca.

Em geral, um problema de otimização consiste em escolher os valores de um conjunto de n variáveis, x_1, x_2, \dots, x_n , que minimize ou maximize uma função, $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ conhecida por função objetivo, satisfazendo algumas restrições. Essas restrições podem ser expressas como um conjunto de condições de desigualdade em alguma função, $g(x_1, x_2, \dots, x_n)$, das variáveis. O conjunto de todos os valores possíveis de x_1, x_2, \dots, x_n que satisfazem todas as restrições é conhecido como região factível (SHEFFI, 2003) ou espaço de busca.

Pode-se afirmar, portanto, que o objetivo principal da otimização é encontrar um conjunto tal de valores para as variáveis do problema que minimize uma função de custo ou que maximize uma função de lucro ou eficiência (VALENTE et al., 2002).

Para o problema em questão, será utilizado um dos principais tipos de programação linear, o problema de transporte que se refere em distribuir qualquer *commodity* de qualquer grupo de centros de fornecimento, chamado origens, a qualquer grupo de centros de recepção, denominados destinos, de modo a minimizar o custo total de distribuição.

Cada origem possui determinada oferta de unidades a serem distribuídas aos destinos e terminais de transbordo e cada destino ou terminais de transbordo tem certa demanda ou capacidade pelas unidades a serem recebidas das origens.

3.2.1 Pesquisa Operacional:

3.2.1.1 Hipótese das Exigências: Cada origem tem uma oferta fixa de unidades, sendo que toda essa oferta tem de ser distribuída aos destinos. De forma similar, cada destino tem uma demanda fixa por unidades, nas quais toda essa demanda deve ser recebida das origens.

3.2.1.2 Hipótese do Custo: O custo de distribuição de unidades de qualquer origem em particular para qualquer destino em particular é diretamente proporcional ao número de unidades distribuídas. Portanto, esse custo é simplesmente o custo unitário de distribuição vezes o número de unidades distribuídas.

Cada origem tem uma oferta fixa de unidades e toda essa oferta tem que ser distribuída aos destinos.

Uma vez incluídos pontos intermediários entre as origens e os destinos da rede de transporte, passa-se a utilizar uma extensão do problema de transporte, o conceito do problema de transbordo. Neste caso, o produto m pode ser transportado entre a origem i para o destino j , passando ou não pelo ponto de transbordo J . A seguir, a representação da rede de um problema de transbordo:

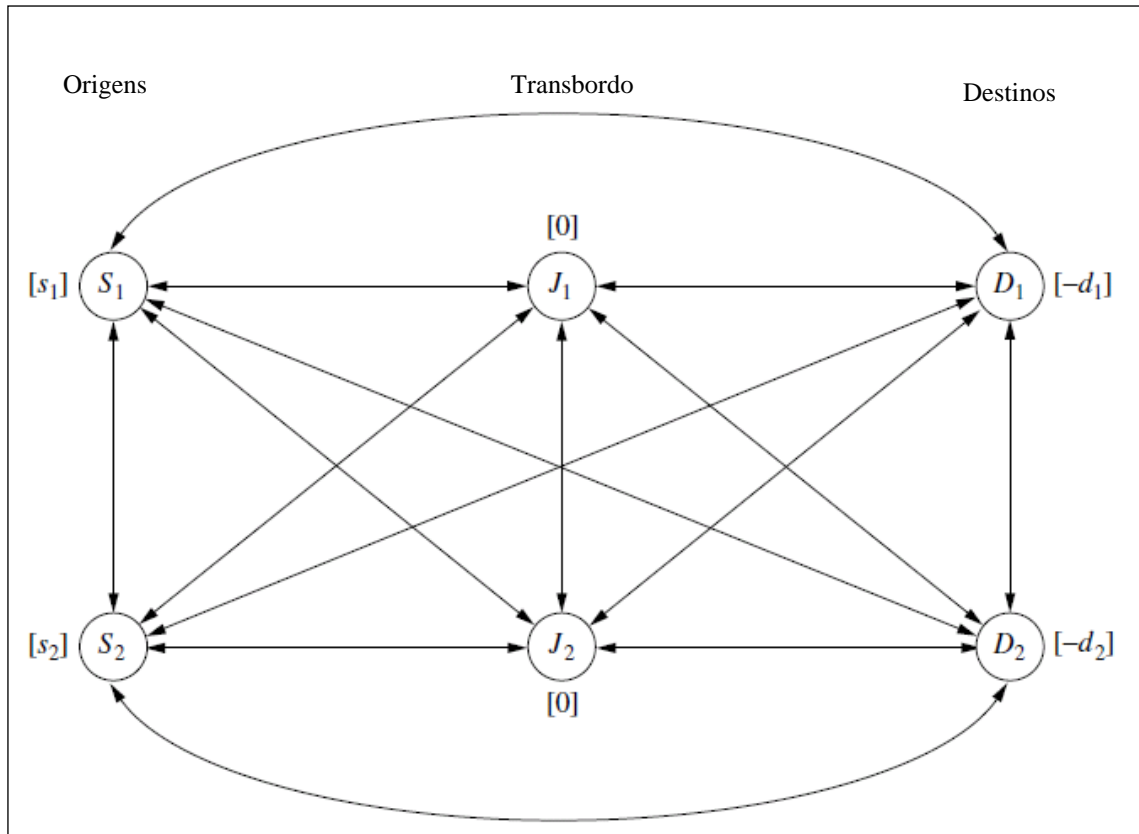


Figura 3: Rede de Transbordo
 Fonte: Hillier e Lieberman (2006)

4 ESTUDO DE CASO

4.1 Problema:

Uma usina siderúrgica para a produção de 1 Mt/ano de aço tem a necessidade de consumo de 1,6 M t/ano de minério de ferro, principal matéria prima do aço, sendo de 1,3 M t/ano de *Pellet Feed* para suprimento de sua planta de pelletização e 276 K t/ano de hematitinha para abastecimento dos altos fornos.

Pelo fato de ainda não ter pedidos e contratos de venda de tubos de aço para médio e longo prazo, a usina optou por fechar contratos de suas matérias primas para o curto prazo, o que atenderia o seu primeiro ano de produção e vendas, estando, assim, exposta a menores riscos, uma vez que, neste período, a empresa já estaria com a carteira de pedidos comprometida.

O departamento de qualidade estudou diversas opções de fornecimento no Estado e indicou 19 possíveis fontes fornecedoras do minério de ferro, sendo assim, em termos técnicos, todas as opções estariam equalizadas.

Por se tratar, teoricamente, de um baixo consumo e, principalmente, pelo fato dos contratos de fornecimento para o primeiro ano de operação estarem sendo fechados por apenas um ano, várias restrições são impostas pelas mineradoras e terminais, que priorizam os contratos de grandes volumes e de médio a longo prazo de outras siderurgias. Desta forma, a capacidade disponibilizada para a movimentação da usina é restrita.

De acordo com a capacidade produtiva e capacidade de escoamento de cada uma das mineradoras, a usina poderá adquirir o mineral utilizando transporte rodoviário, tendo como origem uma ou até dezenove minerações, podendo passar por um ou até seis terminais de transbordo disponíveis na região, sendo que, nestes terminais, o minério de ferro é descarregado dos veículos, armazenado em pilhas temporárias e carregados nos vagões que seguem com destino à Usina. Além destas combinações, existe a possibilidade realizar o transporte exclusivamente rodoviário de uma ou mais das dezenove origens com destino à usina, conciliando volume ou não com o transporte rodoviário descrito acima.

Desenvolvendo um modelo de otimização baseado em programação linear, o presente trabalho irá apresentar as opções ótimas que minimizam o custo de aquisição do mineral das diversas fontes fornecedoras e, finalmente, propor as quantidades a serem previstas nos contratos de aquisição do minério de ferro.

4.2 Dados

Os dados para o problema descrito seguem detalhados nas tabelas 1 e 2, que indicam as distâncias entre as 19 possíveis fontes fornecedoras e a usina, utilizando linhas rodoviárias, e a distância entre as 19 possíveis fontes fornecedoras e os 6 terminais de transbordo e dos terminais até a usina via férrea.

Tabela 1: Distância Mina x Terminal e Mina x Usina (Rodoviária)

Distâncias em Km							
	Terminal 1	Terminal 2	Terminal 3	Terminal 4	Terminal 5	Terminal 6	Usina (Rodo)
Mina 1	53,5	96,0	95,5	104,0	98,0	76,0	37,9
Mina 2	14,7	57,4	74,0	76,0	70,0	58,0	74,9
Mina 3	74,0	112,0	106,0	118,0	56,0	86,0	16,6
Mina 4	40,5	12,4	55,0	42,5	35,7	54,1	112,0
Mina 5	8,7	45,8	70,8	70,0	62,3	56,1	87,4
Mina 6	71,5	105,5	147,7	143,4	136,1	134,0	113,4
Mina 7	66,3	105,9	99,6	110,0	105,2	80,2	25,2
Mina 8	116,7	92,4	39,1	50,0	57,0	52,8	127,8
Mina 9	22,4	29,4	59,5	55,4	47,8	47,6	99,2
Mina 10	56,4	32,1	24,9	22,0	15,5	22,7	106,7
Mina 11	55,4	98,3	99,3	108,6	102,9	79,9	42,3
Mina 12	42,9	7,4	54,9	44,1	37,0	50,7	118,9
Mina 13	31,4	38,8	48,4	49,7	43,2	33,9	85,8
Mina 14	30,1	35,1	48,6	48,8	41,9	35,5	90,4
Mina 15	29,3	74,1	108,6	106,9	99,5	94,1	99,4
Mina 16	66,5	109,6	146,5	144,0	136,9	130,3	117,1
Mina 17	116,2	127,1	180,6	168,8	162,5	173,3	198,3
Mina 18	81,5	58,1	2,9	42,1	36,0	54,4	110,6
Mina 19	68,9	78,4	132,6	121,9	115,3	124,6	155,8

Tabela 2: Distâncias entre Terminal x Usina (Ferroviária)

Distâncias em Km	
	USINA
Terminal 1	67,4
Terminal 2	97,2
Terminal 3	68,0
Terminal 4	92,7
Terminal 5	89,6
Terminal 6	68,1

A tabela 3 apresenta o custo em reais de se movimentar 1 tonelada de hematitinha e *Pellet Feed* por quilometro útil, utilizando os modos ferroviários e rodoviários de transporte. A tabela 4 apresenta o custo de movimentação nos terminais rodo-ferroviários, basicamente, custos operacionais envolvidos na atividade de carga e descarga de vagões e carretas.

Tabela 3: Custo de Transporte

	R\$/ TKU	
	Rodoviário	Ferrovário
<i>Pellet Feed</i>	0,58	0,29
Hematitinha	0,13	0,065

Tabela 3: Custo de Transporte

Tabela 4: Custo de Movimentação nos Terminais:

TERMINAL	CUSTO/TON
T1	8,5
T2	5,5
T3	5,5
T4	4,5
T5	4,5
T6	7,5
T7	8,5

As tabelas 5, 6 e 7 apresentam, respectivamente, os custos de cada um dos trechos, é uma relação entre as tabelas de distâncias apresentadas anteriormente e as a tabelas de custos unitários de movimentação e transporte.

Tabela 5: **Matriz de Custos Mina x Terminal e Mina x Usina (Rodoviária) - Pellet Feed**

Custo R\$ / Ton - Pellet Feed							
	Terminal 1	Terminal 2	Terminal 3	Terminal 4	Terminal 5	Terminal 6	USINA
Mina 1	31,1	55,7	55,4	60,3	56,8	44,1	22,0
Mina 2	8,5	33,3	42,9	44,1	40,6	33,6	43,5
Mina 3	42,9	65,0	61,5	68,4	32,5	49,9	9,6
Mina 4	23,5	7,2	31,9	24,7	20,7	31,4	65,0
Mina 5	5,0	26,6	41,0	40,6	36,2	32,5	50,7
Mina 6	41,5	61,2	85,7	83,1	78,9	77,7	65,8
Mina 7	38,5	61,4	57,8	63,8	61,0	46,5	14,6
Mina 8	67,7	53,6	22,7	29,0	33,0	30,6	74,1
Mina 9	13,0	17,1	34,5	32,1	27,7	27,6	57,5
Mina 10	32,7	18,6	14,4	12,7	9,0	13,2	61,9
Mina 11	32,1	57,0	57,6	63,0	59,7	46,3	24,6
Mina 12	24,9	4,3	31,9	25,6	21,4	29,4	69,0
Mina 13	18,2	22,5	28,1	28,8	25,1	19,7	49,8
Mina 14	17,4	20,3	28,2	28,3	24,3	20,6	52,4
Mina 15	17,0	43,0	63,0	62,0	57,7	54,6	57,7
Mina 16	38,5	63,6	85,0	83,5	79,4	75,6	67,9
Mina 17	67,4	73,7	104,8	97,9	94,2	100,5	115,0
Mina 18	47,3	33,7	1,7	24,4	20,9	31,5	64,1
Mina 19	40,0	45,5	76,9	70,7	66,9	72,2	90,4

Tabela 6: **Matriz de Custos Mina x Terminal e Mina x Usina (Rodoviária) - Hematitinha**

Custo R\$ / Ton - Hematitinha							
	Terminal 1	Terminal 2	Terminal 3	Terminal 4	Terminal 5	Terminal 6	USINA
Mina 1	7,0	12,5	12,4	13,5	12,7	9,9	4,9
Mina 2	1,9	7,5	9,6	9,9	9,1	7,5	9,7
Mina 3	9,6	14,6	13,8	15,3	7,3	11,2	2,2
Mina 4	5,3	1,6	7,2	5,5	4,6	7,0	14,6
Mina 5	1,1	6,0	9,2	9,1	8,1	7,3	11,4
Mina 6	9,3	13,7	19,2	18,6	17,7	17,4	14,7
Mina 7	8,6	13,8	13,0	14,3	13,7	10,4	3,3
Mina 8	15,2	12,0	5,1	6,5	7,4	6,9	16,6
Mina 9	2,9	3,8	7,7	7,2	6,2	6,2	12,9
Mina 10	7,3	4,2	3,2	2,9	2,0	3,0	13,9
Mina 11	7,2	12,8	12,9	14,1	13,4	10,4	5,5
Mina 12	5,6	1,0	7,1	5,7	4,8	6,6	15,5
Mina 13	4,1	5,0	6,3	6,5	5,6	4,4	11,2
Mina 14	3,9	4,6	6,3	6,3	5,4	4,6	11,8
Mina 15	3,8	9,6	14,1	13,9	12,9	12,2	12,9
Mina 16	8,6	14,2	19,0	18,7	17,8	16,9	15,2
Mina 17	15,1	16,5	23,5	21,9	21,1	22,5	25,8

Mina 18	10,6	7,6	0,4	5,5	4,7	7,1	14,4
Mina 19	9,0	10,2	17,2	15,8	15,0	16,2	20,3

Tabela 7: Matriz de Custos Terminal x Usina (Ferroviário) - *Pellet Feed* e Hematitinha

Transporte Ferroviário (R\$/ton/ano):			
<i>PELLET</i>	USINA	HEMAT	USINA
Terminal 1	28,1	Terminal 1	12,9
Terminal 2	33,7	Terminal 2	11,8
Terminal 3	25,2	Terminal 3	9,9
Terminal 4	31,4	Terminal 4	10,5
Terminal 5	30,5	Terminal 5	10,3
Terminal 6	27,2	Terminal 6	11,9

Tabela 8: Capacidade disponível de Produção das Minas - *Pellet Feed* e Hematitinha

Minas (ton/ano):			
<i>PELLET</i>		HEMAT	
Mina 1	0	Mina 1	50
Mina 2	0	Mina 2	30
Mina 3	0	Mina 3	90
Mina 4	200	Mina 4	100
Mina 5	300	Mina 5	0
Mina 6	0	Mina 6	100
Mina 7	200	Mina 7	100
Mina 8	200	Mina 8	100
Mina 9	0	Mina 9	100
Mina 10	0	Mina 10	5
Mina 11	800	Mina 11	5
Mina 12	800	Mina 12	100
Mina 13	800	Mina 13	100
Mina 14	800	Mina 14	10
Mina 15	500	Mina 15	100
Mina 16	500	Mina 16	100
Mina 17	500	Mina 17	100
Mina 18	500	Mina 18	100
Mina 19	2000	Mina 19	100

A tabela 8 é uma consolidação do estudo feito com o objetivo de identificar as quantidades disponíveis para venda de *Pellet* e hematitinha para

a nova usina. Observa-se que, devido ao fato de estar se tratando de contratos de curto prazo, a disponibilidade de produção para a usina é relativamente pequena.

A figura abaixo é uma representação da rede de transporte aplicada ao problema. Nela estão representadas as 19 minerações, os 6 terminais de transbordo, a usina e as diversas possibilidades de ligações ferroviárias e/ou rodoviárias envolvidas.

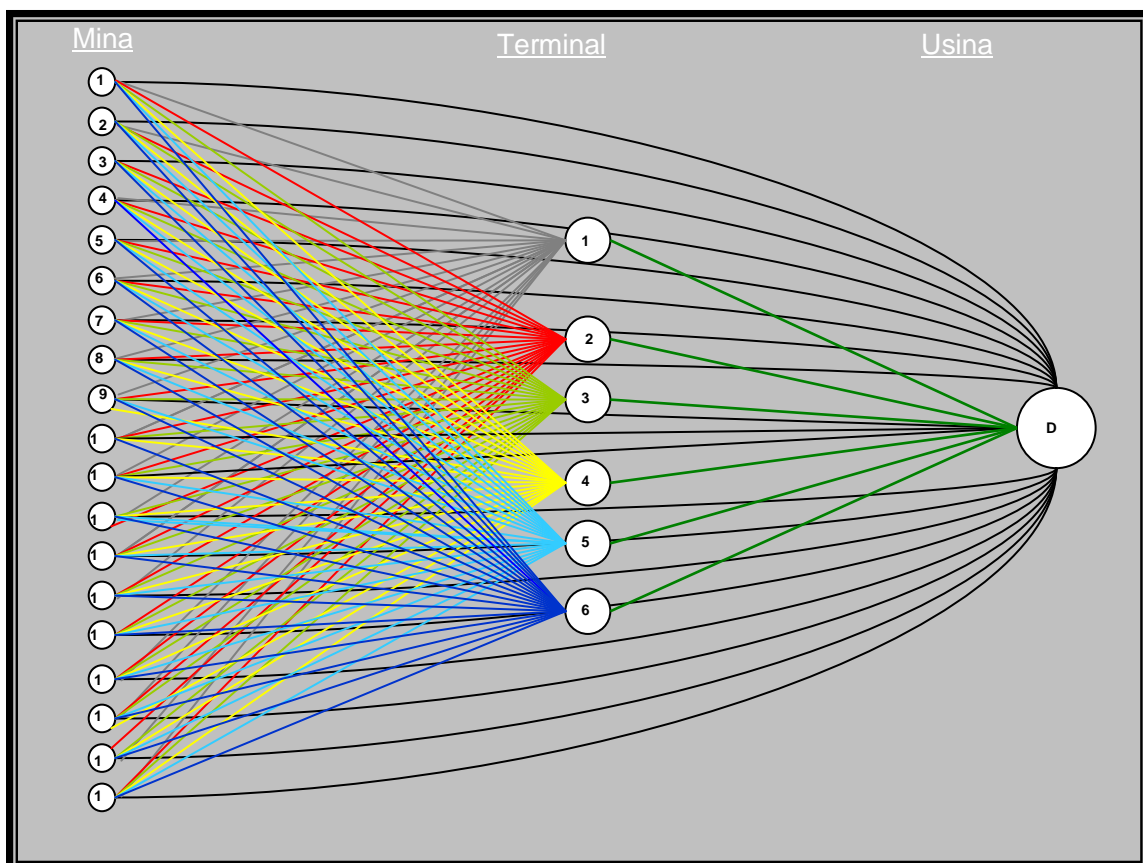


Figura 4: Rede de Transbordo aplicada ao problema

4.3 Solução Investigada:

Havia 3 mineradoras, sendo elas 14, 18 e 19, que estavam dispostas a fornecer o material sem que houvesse a necessidade de se fechar contratos, mesmo que no curto prazo. Assim, os riscos de se fechar um contrato de fornecimento no primeiro ano de operação seriam reduzidos. A equipe de logística da usina analisou a possibilidade e obteve os seguintes resultados.

São considerados:

Para a demanda de 1.300 toneladas de *Pellet Feed*/ano, havia a seguinte possibilidade:

Mina 14 fornecendo 800 toneladas de *Pellet*/ano

Mina 18 fornecendo 500 toneladas de *Pellet*/ano

Para a demanda de 276 toneladas de hematitinha/ano, havia a seguinte possibilidade:

Mina 14 fornecendo 100 toneladas de *Pellet*/ano

Mina 18 fornecendo 100 toneladas de *Pellet*/ano

Mina 19 fornecendo 76 toneladas de *Pellet*/ano

Sendo assim, considerando os custos unitários de aquisição detalhados nas tabelas 5 e 6 acima, o custo total de aquisição destas quantidades seriam de R\$ 78.172 milhões.

4.4 Solução do Problema:

Como a solução acima apresentada poderia não ser a solução ótima do ponto de vista financeiro, para o problema em questão, entendemos que a modelagem do sistema de abastecimento de minério usando a programação linear nos moldes do problema do transporte atenderia aos objetivos e características levantados, auxiliando então os gestores a chegarem a uma decisão. Portanto, o objetivo foi minimizar o custo global de aquisição do minério da empresa, sujeito a restrições de demanda de minério da usina, à oferta de minério em cada mina fornecedora e à capacidade de movimentação dos terminais de minério.

4.4.1 Modelo

4.4.1.1 Parâmetros

C_{ijkn} = Custo de transporte entre os nós i e j através do modal K para o produto m;

C_{jlmn} = Custo de transporte entre os nós j e l através do modal K para o produto m;

D_m = Demanda da Usina para o produto m;

Q_{im} = Capacidade de expedição da origem i para o produto m;

Q_{jm} = Capacidade de expedição da origem j para o produto m;

4.4.1.2 Variáveis:

X_{ijmk} = volume do produto m expedido pelo modal K entre os nós i e j;

Y_{jlmk} = volume do produto m recebido pelo modal K no terminal j e despachado para o destino L.

4.4.1.3 Função Objetivo

Minimizar a soma dos produtos das quantidades a serem compradas de cada mineradora pelo custo unitário de aquisição do produto *Pellet Feed* mais o somatório dos produtos das quantidades a serem compradas de cada mineradora pelo custo unitário de aquisição do produto hematitinha. Sendo assim, a fórmula apresenta a minimização do custo total de aquisição de hematitinha e *Pellet* à usina siderúrgica.

$$(\text{Min}) \sum_i \sum_j \sum_m \sum_k X_{ijmk} \times C_{ijmk} + \sum_j \sum_l \sum_m \sum_k Y_{jlmk} \times C_{jlmk}$$

2.4.1.4 Restrições

$\sum_i \sum_m \sum_k X_{ijmk} = \sum_m \sum_k Y_{mk} \forall_j$: A soma do que chega no terminal j deve ser necessariamente expedida.

$\sum_i \sum_j \sum_k X_{ijmk} = D_m \forall_m$: A soma das expedições deve ser igual à demanda de cada produto.

$\sum_j \sum_k X_{ijkm} \leq Q_{im} \forall_{im}$: A soma das expedições da origem i deve ser menor do que a capacidade de produção do produto m

$\sum_k Y_{jmk} \leq Q_{jm} \forall_{jm}$: A soma das expedições do terminal j deve ser menor do que a capacidade de expedição do produto m.

Aplicando o modelo ao problema apresentado, temos o detalhamento conforme apresentado no Anexo 1.

4.4.1.5 Modelagem utilizando o Whats Best[®]

O *What's Best!*[®] é um suplemento do *Excel*[®] criado pela *Lindo Systems*[®], utilizado para construir e solucionar modelos matemáticos lineares, não lineares, entre outros. Sua principal característica é a de suportar problemas que possuem alto número de variáveis.

Utilizando o *software*, foram inseridos os dados do problema, bem como as variáveis, parâmetros, restrições e função objetivo. Desta forma, o sistema procurou minimizar a função objetivo conforme descrito no modelo acima e, assim, retornar com o menor custo total de aquisição dos produtos hematitinha e *Pellet Feed*. Abaixo foram detalhados os passos para se chegar ao resultado final.

Passo 1 - Formulado no *Excel* a restrição de demanda, sendo considerados demanda = capacidade de produção:

<i>Pellet</i>	1300	=	1300
Hemat	276	=	276

Passo 2 – Formulado no *Excel* as restrições de capacidades de produção das mineradoras

<i>Pellet</i>	Qtde.		Capacidade
Mina 1	0	=<=	0
Mina 2	0	=<=	0
Mina 3	0	=<=	0
Mina 4	0	<=	200
Mina 5	0	<=	300
Mina 6	0	=<=	0
Mina 7	200	=<=	200
Mina 8	0	<=	200
Mina 9	0	=<=	0
Mina 10	0	=<=	0
Mina 11	800	=<=	800
Mina 12	0	<=	800
Mina 13	0	<=	800
Mina 14	0	<=	800
Mina 15	0	<=	500
Mina 16	0	<=	500
Mina 17	0	<=	500
Mina 18	300	<=	500
Mina 19	0	<=	2000

<i>Hemat</i>	Qtde.		Capacidade
Mina 1	50	=<=	50
Mina 2	30	=<=	30
Mina 3	90	=<=	90
Mina 4	0	<=	100
Mina 5	0	=<=	0
Mina 6	0	<=	100
Mina 7	100	=<=	100
Mina 8	0	<=	100
Mina 9	0	<=	100
Mina 10	0	<=	5
Mina 11	5	=<=	5
Mina 12	0	<=	100
Mina 13	0	<=	100
Mina 14	0	<=	10
Mina 15	0	<=	100
Mina 16	0	<=	100
Mina 17	0	<=	100
Mina 18	1	<=	100
Mina 19	0	<=	100

Passo 3 – Formulado no *Excel* as restrições de capacidades de recebimento dos terminais

	Qtde.		Capacidade
Terminal 1	0	<=	1000
Terminal 2	0	<=	1000
Terminal 3	301	<=	2000
Terminal 4	0	<=	1500
Terminal 5	0	<=	500
Terminal 6	0	<=	800

Passo 4 – Formulado no *Excel* o balanço dos terminais, ou seja, tudo que se recebe deve necessariamente ser expedido. Assim a soma dos recebimentos deve ser igual à soma das saídas.

Pellet	Qtde.	=	Capacidade
Terminal 1	0	=	0
Terminal 2	0	=	0
Terminal 3	300	=	300
Terminal 4	0	=	0
Terminal 5	0	=	0
Terminal 6	0	=	0

Hemat	Qtde.	=	Capacidade
Terminal 1	0	=	0
Terminal 2	0	=	0
Terminal 3	1	=	1
Terminal 4	0	=	0
Terminal 5	0	=	0
Terminal 6	0	=	0

Passo 5 – Retorno do sistema com as quantidades que geram o custo ótimo de aquisição

Volume do produto *Pellet* expedido pelo modal K entre os nós i e j

PELLET	Terminal 1	Terminal 2	Terminal 3	Terminal 4	Terminal 5	Terminal 6	USINA
Mina 1	0	0	0	0	0	0	0
Mina 2	0	0	0	0	0	0	0
Mina 3	0	0	0	0	0	0	0
Mina 4	0	0	0	0	0	0	0
Mina 5	0	0	0	0	0	0	0
Mina 6	0	0	0	0	0	0	0
Mina 7	0	0	0	0	0	0	200
Mina 8	0	0	0	0	0	0	0
Mina 9	0	0	0	0	0	0	0
Mina 10	0	0	0	0	0	0	0
Mina 11	0	0	0	0	0	0	800
Mina 12	0	0	0	0	0	0	0
Mina 13	0	0	0	0	0	0	0
Mina 14	0	0	0	0	0	0	0
Mina 15	0	0	0	0	0	0	0
Mina 16	0	0	0	0	0	0	0
Mina 17	0	0	0	0	0	0	0
Mina 18	0	0	300	0	0	0	0
Mina 19	0	0	0	0	0	0	0

Volume do produto Hematitinha expedido pelo modal K entre os nós i e j

HEMAT	Terminal 1	Terminal 2	Terminal 3	Terminal 4	Terminal 5	Terminal 6	USINA
Mina 1	0	0	0	0	0	0	50
Mina 2	0	0	0	0	0	0	30
Mina 3	0	0	0	0	0	0	90
Mina 4	0	0	0	0	0	0	0
Mina 5	0	0	0	0	0	0	0
Mina 6	0	0	0	0	0	0	0
Mina 7	0	0	0	0	0	0	100
Mina 8	0	0	0	0	0	0	0
Mina 9	0	0	0	0	0	0	0
Mina 10	0	0	0	0	0	0	0
Mina 11	0	0	0	0	0	0	5
Mina 12	0	0	0	0	0	0	0
Mina 13	0	0	0	0	0	0	0
Mina 14	0	0	0	0	0	0	0
Mina 15	0	0	0	0	0	0	0
Mina 16	0	0	0	0	0	0	0
Mina 17	0	0	0	0	0	0	0
Mina 18	0	0	1	0	0	0	0
Mina 19	0	0	0	0	0	0	0

Volume do produto recebido pelo modal K no terminal j e despachado para o destino L.

Transporte Ferroviário(ton/ano):			
PELLET	USINA	HEMAT	USINA
Terminal 1	0	Terminal 1	0
Terminal 2	0	Terminal 2	0
Terminal 3	300	Terminal 3	1
Terminal 4	0	Terminal 4	0
Terminal 5	0	Terminal 5	0
Terminal 6	0	Terminal 6	0

Passo 6 – Formulada a função objetivo no Excel

FUNÇÃO OBJETIVO	
Pellet 1	23.080,52
Pellet 2	7.564,26
Hemat 1	1.088,21
Hemat 2	9,92
Total	31.742,91

4.4.1.6 Resultado

Utilizando o custo como base para a tomada de decisão e sujeito às restrições impostas pelo problema, a solução ótima sugerida para atender à demanda de 1,3 M t/ano de *Pellet Feed* e 276 K t/ano de hematitinha segue descrita:

Pellet Feed:

Compra de 300 mil toneladas/ano de *Pellet* da mina 18 e transporte rodoviário até o terminal 3. Posterior transferência via férrea do terminal 3 para o destino final (Usina);

Compra de 200 mil toneladas/ano de *Pellet* da mina 7 e transporte rodoviário da mina até o destino final(Usina);

Compra de 800 mil toneladas/ano de *Pellet* da mina 11 e transporte rodoviário da mina até o destino final (Usina).

Hematitinha:

Compra de 1 mil toneladas/ano da mina 18, sendo transportadas através de rodovia até o terminal 3 e posterior transferência via ferra até a usina;

Compra de 50 mil toneladas/ano da mina 1, sendo transportadas através de rodovia;

Compra de 50 mil toneladas/ano da mina 1, sendo transportadas através de rodovia;

Compra de 30 mil toneladas/ano da mina 2, sendo transportadas através de rodovia.

Compra de 90 mil toneladas/ano da mina 3, sendo transportadas através de rodovia

Compra de 100 mil toneladas/ano da mina 7, sendo transportadas através de rodovia

5 CONCLUSÃO

Respeitando as quantidades acima descritas, o custo ótimo de aquisição do minério é de R\$ 31.742,91 (trinta e um mil, setecentos e quarenta e dois reais e noventa e um centavos).

Comparando a solução ótima com a solução sugerida no item 2.3 apresentado acima, observa-se que existe uma economia anual ao optar pela solução ótima de R\$ 46.429,09 (quarenta e seis mil, quatrocentos e vinte e nove reais e nove centavos).

No momento da tomada de decisão para o fechamento dos contratos com as mineradoras e terminais, a diretoria da empresa poderá considerar o modelo construído como fonte principal à tomada de decisão, uma vez que apresenta a melhor opção em termos financeiros para o problema em questão, considerando todas as dificuldades apresentadas pelo problema.

6 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

QUARESMA, Luis Felipe. O mercado Brasileiro de Minério de Ferro. Campinas:Universidade de Campinas, 1987.

SOUZA, G.S. A dinâmica do mercado transoceânico de minério de ferro: evolução histórica e perspectivas no ano 2000. Campinas, 1991. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas.

LACERDA, E. G. M.; CARVALHO, A. C. P. L. Sistemas Inteligentes: Aplicações a Recursos Hídricos e Ciências Ambientais. 1999.

CAPLICE, C.G.; SHEFFI, Y. Optimization Based Procurement for Transportation Services, Journal of Business Logistics 24:2, p 109-128, 2003.

VALENTE, S. A., LOPES, H.S., ARRUDA, L.V.R. (2002) Genetic algorithms for the assembly line balancing problem: a real-world automotive application. Em: Roy, R., Köppen, M., Ovaska, S., Fukuhashi, T., Hoffman, F. Soft Computing in Industry - Recent Applications. Berlin: Springer-Verlag, p. 319-328.

Instituto Aço Brasil - Estatísticas de Mercado. Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br>

Instituto Brasileiro de Mineração – Estatísticas. Disponível em: <http://www.ibram.org.br/>

7 ANEXOS

ANEXO 1 - APLICAÇÃO DO MODELO

Função Objetivo

$$\begin{aligned}
 P = & 31,1x_{11} + 8,5x_{12} + 42,9x_{13} + 23,5x_{14} + 5x_{15} + 41,5x_{16} + 38,5x_{17} + 67,7x_{18} + 13x_{19} + 32,7x_{110} + \\
 & 32,1x_{111} + 24,9x_{112} + 18,2x_{113} + 17,4x_{114} + 17x_{115} + 38,5x_{116} + 67,4x_{117} + 47,3x_{118} + 40x_{119} + \\
 & 55,7x_{21} + 33,3x_{22} + 65x_{23} + 7,2x_{24} + 26,6x_{25} + 61,2x_{26} + 61,4x_{27} + 53,6x_{28} + 17,1x_{29} + 18,6x_{210} + \\
 & 57x_{211} + 4,3x_{212} + 22,5x_{213} + 20,3x_{214} + 43x_{215} + 63,6x_{216} + 73,7x_{217} + 33,7x_{218} + 45,5x_{219} + \\
 & 55,4x_{31} + 42,9x_{32} + 61,5x_{33} + 31,9x_{34} + 41x_{35} + 85,7x_{36} + 57,8x_{37} + 22,7x_{38} + 34,5x_{39} + 14,4x_{310} + \\
 & 57,6x_{311} + 31,9x_{312} + 28,1x_{313} + 28,2x_{314} + 63x_{315} + 85x_{316} + 104,8x_{317} + 1,7x_{318} + 76,9x_{319} + \\
 & 60,3x_{41} + 44,1x_{42} + 68,4x_{43} + 24,7x_{44} + 40,6x_{45} + 83,1x_{46} + 63,8x_{47} + 29x_{48} + 32,1x_{49} + 12,7x_{410} + \\
 & 63x_{411} + 25,6x_{412} + 28,8x_{413} + 28,3x_{414} + 62x_{415} + 83,5x_{416} + 97,9x_{417} + 24,4x_{418} + 70,7x_{419} + \\
 & 56,8x_{51} + 40,6x_{52} + 32,5x_{53} + 20,7x_{54} + 36,2x_{55} + 78,9x_{56} + 61x_{57} + 33x_{58} + 27,7x_{59} + 9x_{510} + \\
 & 59,7x_{511} + 21,4x_{512} + 25,1x_{513} + 24,3x_{514} + 57,7x_{515} + 79,4x_{516} + 94,2x_{517} + 20,9x_{518} + 66,9x_{519} + \\
 & 44,1x_{61} + 33,6x_{62} + 49,9x_{63} + 31,4x_{64} + 32,5x_{65} + 77,7x_{66} + 46,5x_{67} + 30,6x_{68} + 27,6x_{69} + 13,2x_{610} + \\
 & 46,3x_{611} + 29,4x_{612} + 19,7x_{613} + 20,6x_{614} + 54,6x_{615} + 75,6x_{616} + 100,5x_{617} + 31,5x_{618} + 72,2x_{619} + \\
 & 22x_{71} + 43,5x_{72} + 9,6x_{73} + 65x_{74} + 50,7x_{75} + 65,8x_{76} + 14,6x_{77} + 74,1x_{78} + 57,5x_{79} + 61,9x_{710} + \\
 & 24,6x_{711} + 69x_{712} + 49,8x_{713} + 52,4x_{714} + 57,7x_{715} + 67,9x_{716} + 115x_{717} + 64,1x_{718} + 90,4x_{719} + \\
 & 28,1y_{11} + 33,7y_{21} + 25,2y_{31} + 31,4y_{41} + 30,5y_{51} + 27,2y_{61}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 H = & 7x_{11} + 1,9x_{12} + 9,6x_{13} + 5,3x_{14} + 1,1x_{15} + 9,3x_{16} + 8,6x_{17} + 15,2x_{18} + 2,9x_{19} + 7,3x_{110} + \\
 & 7,2x_{111} + 5,6x_{112} + 4,1x_{113} + 3,9x_{114} + 3,8x_{115} + 8,6x_{116} + 15,1x_{117} + 10,6x_{118} + 9x_{119} + \\
 & 12,5x_{21} + 7,5x_{22} + 14,6x_{23} + 1,6x_{24} + 6x_{25} + 13,7x_{26} + 13,8x_{27} + 12x_{28} + 3,8x_{29} + 4,2x_{210} + \\
 & 12,8x_{211} + 1x_{212} + 5x_{213} + 4,6x_{214} + 9,6x_{215} + 14,2x_{216} + 16,5x_{217} + 7,6x_{218} + 10,2x_{219} + \\
 & 12,4x_{31} + 9,6x_{32} + 13,8x_{33} + 7,2x_{34} + 9,2x_{35} + 19,2x_{36} + 13x_{37} + 5,1x_{38} + 7,7x_{39} + 3,2x_{310} + \\
 & 12,9x_{311} + 7,1x_{312} + 6,3x_{313} + 6,3x_{314} + 14,1x_{315} + 19x_{316} + 23,5x_{317} + 0,4x_{318} + 17,2x_{319} + \\
 & 13,5x_{41} + 9,9x_{42} + 15,3x_{43} + 5,5x_{44} + 9,1x_{45} + 18,6x_{46} + 14,3x_{47} + 6,5x_{48} + 7,2x_{49} + 2,9x_{410} + \\
 & 14,1x_{411} + 5,7x_{412} + 6,5x_{413} + 6,3x_{414} + 13,9x_{415} + 18,7x_{416} + 21,9x_{417} + 5,5x_{418} + 15,8x_{419} + \\
 & 12,7x_{51} + 9,1x_{52} + 7,3x_{53} + 4,6x_{54} + 8,1x_{55} + 17,7x_{56} + 13,7x_{57} + 7,4x_{58} + 6,2x_{59} + 2x_{510} + \\
 & 13,4x_{511} + 4,8x_{512} + 5,6x_{513} + 5,4x_{514} + 12,9x_{515} + 17,8x_{516} + 21,1x_{517} + 4,7x_{518} + 15x_{519} + \\
 & 9,9x_{61} + 7,5x_{62} + 11,2x_{63} + 7x_{64} + 7,3x_{65} + 17,4x_{66} + 10,4x_{67} + 6,9x_{68} + 6,2x_{69} + 3x_{610} + \\
 & 10,4x_{611} + 6,6x_{612} + 4,4x_{613} + 4,6x_{614} + 12,2x_{615} + 16,9x_{616} + 22,5,5x_{617} + 7,1x_{618} + 16,2x_{619} + \\
 & 4,9x_{71} + 9,7x_{72} + 2,2x_{73} + 14,6x_{74} + 11,4x_{75} + 14,7x_{76} + 3,3x_{77} + 16,6x_{78} + 12,9x_{79} + 13,9x_{710} + \\
 & 5,5x_{711} + 15,5x_{712} + 11,2x_{713} + 11,8x_{714} + 12,9x_{715} + 15,2x_{716} + 25,8x_{717} + 14,4x_{718} + 20,3x_{719} + \\
 & 12,9y_{11} + 11,8y_{21} + 9,99y_{31} + 10,5y_{41} + 10,3y_{51} + 11,9y_{61}
 \end{aligned}$$

$$(Min)=P+H$$

s.a.

A soma do que chega no terminal j deve ser necessariamente expedida.

Terminal 1 – Pellet

$$31,1x_{11} + 8,5x_{12} + 42,9x_{13} + 23,5x_{14} + 5x_{15} + 41,5x_{16} + 38,5x_{17} + 67,7x_{18} + 13x_{19} + 32,7x_{110} + 32,1x_{111} + 24,9x_{112} + 18,2x_{113} + 17,4x_{114} + 17x_{115} + 38,5x_{116} + 67,4x_{117} + 47,3x_{118} + 40x_{119} = 28,1y_{11}$$

Terminal 1 – Hematitinha

$$7x_{11} + 1,9x_{12} + 9,6x_{13} + 5,3x_{14} + 1,1x_{15} + 9,3x_{16} + 8,6x_{17} + 15,2x_{18} + 2,9x_{19} + 7,3x_{110} + 7,2x_{111} + 5,6x_{112} + 4,1x_{113} + 3,9x_{114} + 3,8x_{115} + 8,6x_{116} + 15,1x_{117} + 10,6x_{118} + 9x_{119} = 12,9y_{11}$$

Terminal 2 – Pellet

$$55,7x_{21} + 33,3x_{22} + 65x_{23} + 7,2x_{24} + 26,6x_{25} + 61,2x_{26} + 61,4x_{27} + 53,6x_{28} + 17,1x_{29} + 18,6x_{210} + 57x_{211} + 4,3x_{212} + 22,5x_{213} + 20,3x_{214} + 43x_{215} + 63,6x_{216} + 73,7x_{217} + 33,7x_{218} + 45,5x_{219} = 33,7y_{21}$$

Terminal 2 – Hematitinha

$$12,5x_{21} + 7,5x_{22} + 14,6x_{23} + 1,6x_{24} + 6x_{25} + 13,7x_{26} + 13,8x_{27} + 12x_{28} + 3,8x_{29} + 4,2x_{210} + 12,8x_{211} + 1x_{212} + 5x_{213} + 4,6x_{214} + 9,6x_{215} + 14,2x_{216} + 16,5x_{217} + 7,6x_{218} + 10,2x_{219} = 11,8y_{21}$$

Terminal 3 – Pellet

$$55,4x_{31} + 42,9x_{32} + 61,5x_{33} + 31,9x_{34} + 41x_{35} + 85,7x_{36} + 57,8x_{37} + 22,7x_{38} + 34,5x_{39} + 14,4x_{310} + 57,6x_{311} + 31,9x_{312} + 28,1x_{313} + 28,2x_{314} + 63x_{315} + 85x_{316} + 104,8x_{317} + 1,7x_{318} + 76,9x_{319} = 25,2y_{31}$$

Terminal 3 – Hematitinha

$$12,4x_{31} + 9,6x_{32} + 13,8x_{33} + 7,2x_{34} + 9,2x_{35} + 19,2x_{36} + 13x_{37} + 5,1x_{38} + 7,7x_{39} + 3,2x_{310} + 12,9x_{311} + 7,1x_{312} + 6,3x_{313} + 6,3x_{314} + 14,1x_{315} + 19x_{316} + 23,5x_{317} + 0,4x_{318} + 17,2x_{319} = 9,99y_{31}$$

Terminal 4 – Pellet

$$60,3x_{41} + 44,1x_{42} + 68,4x_{43} + 24,7x_{44} + 40,6x_{45} + 83,1x_{46} + 63,8x_{47} + 29x_{48} + 32,1x_{49} + 12,7x_{410} + 63x_{411} + 25,6x_{412} + 28,8x_{413} + 28,3x_{414} + 62x_{415} + 83,5x_{416} + 97,9x_{417} + 24,4x_{418} + 70,7x_{419} = 31,4y_{41}$$

Terminal 4 – Hematitinha

$$13,5x_{41} + 9,9x_{42} + 15,3x_{43} + 5,5x_{44} + 9,1x_{45} + 18,6x_{46} + 14,3x_{47} + 6,5x_{48} + 7,2x_{49} + 2,9x_{410} + \\ 14,1x_{411} + 5,7x_{412} + 6,5x_{413} + 6,3x_{414} + 13,9x_{415} + 18,7x_{416} + 21,9x_{417} + 5,5x_{418} + 15,8x_{419} = 10,5y_{41}$$

Terminal 5 – Pellet

$$56,8x_{51} + 40,6x_{52} + 32,5x_{53} + 20,7x_{54} + 36,2x_{55} + 78,9x_{56} + 61x_{57} + 33x_{58} + 27,7x_{59} + 9x_{510} + \\ 59,7x_{511} + 21,4x_{512} + 25,1x_{513} + 24,3x_{514} + 57,7x_{515} + 79,4x_{516} + 94,2x_{517} + 20,9x_{518} + 66,9x_{519} = 30,5y_{51}$$

Terminal 5 – Hematitinha

$$12,7x_{51} + 9,1x_{52} + 7,3x_{53} + 4,6x_{54} + 8,1x_{55} + 17,7x_{56} + 13,7x_{57} + 7,4x_{58} + 6,2x_{59} + 2x_{510} + \\ 13,4x_{511} + 4,8x_{512} + 5,6x_{513} + 5,4x_{514} + 12,9x_{515} + 17,8x_{516} + 21,1x_{517} + 4,7x_{518} + 15x_{519} = 10,3y_{51}$$

Terminal 6 – Pellet

$$44,1x_{61} + 33,6x_{62} + 49,9x_{63} + 31,4x_{64} + 32,5x_{65} + 77,7x_{66} + 46,5x_{67} + 30,6x_{68} + 27,6x_{69} + 13,2x_{610} + \\ 46,3x_{611} + 29,4x_{612} + 19,7x_{613} + 20,6x_{614} + 54,6x_{615} + 75,6x_{616} + 100,5x_{617} + 31,5x_{618} + 72,2x_{619} = 27,2y_{61}$$

Terminal 7 – Hematitinha

$$9,9x_{71} + 7,5x_{72} + 11,2x_{73} + 7x_{74} + 7,3x_{75} + 17,4x_{76} + 10,4x_{77} + 6,9x_{78} + 6,2x_{79} + 3x_{710} + \\ 10,4x_{711} + 6,6x_{712} + 4,4x_{713} + 4,6x_{714} + 12,2x_{715} + 16,9x_{716} + 22,5,5x_{717} + 7,1x_{718} + 16,2x_{719} = 11,9y_{71}$$

A soma das expedições deve ser igual à demanda de cada produto.

Pellet

$$x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{14} + x_{15} + x_{16} + x_{17} + x_{18} + x_{19} + x_{110} + x_{111} + x_{112} + x_{113} + x_{114} + x_{115} + x_{116} + x_{117} + x_{118} + x_{119} + \\ x_{21} + x_{22} + x_{23} + x_{24} + x_{25} + x_{26} + x_{27} + x_{28} + x_{29} + x_{210} + x_{211} + x_{212} + x_{213} + x_{214} + x_{215} + x_{216} + x_{217} + x_{218} + x_{219} + \\ x_{31} + x_{32} + x_{33} + x_{34} + x_{35} + x_{36} + x_{37} + x_{38} + x_{39} + x_{310} + x_{311} + x_{312} + x_{313} + x_{314} + x_{315} + x_{316} + x_{317} + x_{318} + x_{319} + \\ x_{41} + x_{42} + x_{43} + x_{44} + x_{45} + x_{46} + x_{47} + x_{48} + x_{49} + x_{410} + x_{411} + x_{412} + x_{413} + x_{414} + x_{415} + x_{416} + x_{417} + x_{418} + x_{419} + \\ x_{51} + x_{52} + x_{53} + x_{54} + x_{55} + x_{56} + x_{57} + x_{58} + x_{59} + x_{510} + x_{511} + x_{512} + x_{513} + x_{514} + x_{515} + x_{516} + x_{517} + x_{518} + x_{519} + \\ x_{61} + x_{62} + x_{63} + x_{64} + x_{65} + x_{66} + x_{67} + x_{68} + x_{69} + x_{610} + x_{611} + x_{612} + x_{613} + x_{614} + x_{615} + x_{616} + x_{617} + x_{618} + x_{619} + \\ x_{71} + x_{72} + x_{73} + x_{74} + x_{75} + x_{76} + x_{77} + x_{78} + x_{79} + x_{710} + x_{711} + x_{712} + x_{713} + x_{714} + x_{715} + x_{716} + x_{717} + x_{718} + x_{719} = 1.300.000$$

Hematitinha

$$x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{14} + x_{15} + x_{16} + x_{17} + x_{18} + x_{19} + x_{110} + x_{111} + x_{112} + x_{113} + x_{114} + x_{115} + x_{116} + x_{117} + x_{118} + x_{119} + \\ x_{21} + x_{22} + x_{23} + x_{24} + x_{25} + x_{26} + x_{27} + x_{28} + x_{29} + x_{210} + x_{211} + x_{212} + x_{213} + x_{214} + x_{215} + x_{216} + x_{217} + x_{218} + x_{219} + \\ x_{31} + x_{32} + x_{33} + x_{34} + x_{35} + x_{36} + x_{37} + x_{38} + x_{39} + x_{310} + x_{311} + x_{312} + x_{313} + x_{314} + x_{315} + x_{316} + x_{317} + x_{318} + x_{319} + \\ x_{41} + x_{42} + x_{43} + x_{44} + x_{45} + x_{46} + x_{47} + x_{48} + x_{49} + x_{410} + x_{411} + x_{412} + x_{413} + x_{414} + x_{415} + x_{416} + x_{417} + x_{418} + x_{419} +$$

$$x_{51} + x_{52} + x_{53} + x_{54} + x_{55} + x_{56} + x_{57} + x_{58} + x_{59} + x_{510} + x_{511} + x_{512} + x_{513} + x_{514} + x_{515} + x_{516} + x_{517} + x_{518} + x_{519} + x_{61} + x_{62} + x_{63} + x_{64} + x_{65} + x_{66} + x_{67} + x_{68} + x_{69} + x_{610} + x_{611} + x_{612} + x_{613} + x_{614} + x_{615} + x_{616} + x_{617} + x_{618} + x_{619} + x_{71} + x_{72} + x_{73} + x_{74} + x_{75} + x_{76} + x_{77} + x_{78} + x_{79} + x_{710} + x_{711} + x_{712} + x_{713} + x_{714} + x_{715} + x_{716} + x_{717} + x_{718} + x_{719} = 276.000$$

A soma das expedições da origem i deve ser menor do que a capacidade de produção do produto m

Mina 1 - Pellet

$$x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{14} + x_{15} + x_{16} + x_{17} \leq 0$$

Mina 1 - Hematitinha

$$x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{14} + x_{15} + x_{16} + x_{17} \leq 50$$

Mina 2 - Pellet

$$x_{21} + x_{22} + x_{23} + x_{24} + x_{25} + x_{26} + x_{27} \leq 0$$

Mina 2 - Hematitinha

$$x_{21} + x_{22} + x_{23} + x_{24} + x_{25} + x_{26} + x_{27} \leq 30$$

Mina 3 - Pellet

$$x_{31} + x_{32} + x_{33} + x_{34} + x_{35} + x_{36} + x_{37} \leq 0$$

Mina 3 - Hematitinha

$$x_{31} + x_{32} + x_{33} + x_{34} + x_{35} + x_{36} + x_{37} \leq 90$$

Mina 4 - Pellet

$$x_{41} + x_{42} + x_{43} + x_{44} + x_{45} + x_{46} + x_{47} \leq 200$$

Mina 4 - Hematitinha

$$x_{41} + x_{42} + x_{43} + x_{44} + x_{45} + x_{46} + x_{47} \leq 100$$

Mina 5 - Pellet

$$x_{51} + x_{52} + x_{53} + x_{54} + x_{55} + x_{56} + x_{57} \leq 300$$

Mina 5 - Hematitinha

$$x_{51} + x_{52} + x_{53} + x_{54} + x_{55} + x_{56} + x_{57} \leq 0$$

Mina 6 - Pellet

$$x_{61} + x_{62} + x_{63} + x_{64} + x_{65} + x_{66} + x_{67} \leq 0$$

Mina 6 - Hematitinha

$$x_{61} + x_{62} + x_{63} + x_{64} + x_{65} + x_{66} + x_{67} \leq 100$$

Mina 7 - Pellet

$$x_{71} + x_{72} + x_{73} + x_{74} + x_{75} + x_{76} + x_{77} \leq 200$$

Mina 7 - Hematitinha

$$x_{71} + x_{72} + x_{73} + x_{74} + x_{75} + x_{76} + x_{77} \leq 100$$

Mina 8 - Pellet

$$x_{81} + x_{82} + x_{83} + x_{84} + x_{85} + x_{86} + x_{87} \leq 200$$

Mina 8 - Hematitinha

$$x_{81} + x_{82} + x_{83} + x_{84} + x_{85} + x_{86} + x_{87} \leq 100$$

Mina 9 - Pellet

$$x_{91} + x_{92} + x_{93} + x_{94} + x_{95} + x_{96} + x_{97} \leq 0$$

Mina 9 - Hematitinha

$$x_{91} + x_{92} + x_{93} + x_{94} + x_{95} + x_{96} + x_{97} \leq 100$$

Mina 10 - Pellet

$$x_{101} + x_{102} + x_{103} + x_{104} + x_{105} + x_{106} + x_{107} \leq 0$$

Mina 10 - Hematitinha

$$x_{101} + x_{102} + x_{103} + x_{104} + x_{105} + x_{106} + x_{107} \leq 5$$

Mina 11 - Pellet

$$x_{111} + x_{112} + x_{113} + x_{114} + x_{115} + x_{116} + x_{117} \leq 800$$

Mina 11 - Hematitinha

$$x_{111} + x_{112} + x_{113} + x_{114} + x_{115} + x_{116} + x_{117} \leq 5$$

Mina 12 - Pellet

$$x_{121} + x_{122} + x_{123} + x_{124} + x_{125} + x_{126} + x_{127} \leq 800$$

Mina 12 - Hematitinha

$$x_{121} + x_{122} + x_{123} + x_{124} + x_{125} + x_{126} + x_{127} \leq 100$$

Mina 13 - Pellet

$$x_{131} + x_{132} + x_{133} + x_{134} + x_{135} + x_{136} + x_{137} \leq 800$$

Mina 13 - Hematitinha

$$x_{131} + x_{132} + x_{133} + x_{134} + x_{135} + x_{136} + x_{137} \leq 100$$

Mina 14 - Pellet

$$x_{141} + x_{142} + x_{143} + x_{144} + x_{145} + x_{146} + x_{147} \leq 800$$

Mina 14 - Hematitinha

$$x_{141} + x_{142} + x_{143} + x_{144} + x_{145} + x_{146} + x_{147} \leq 10$$

Mina 15 - Pellet

$$x_{151} + x_{152} + x_{153} + x_{154} + x_{155} + x_{156} + x_{157} \leq 500$$

Mina 15 - Hematitinha

$$x_{151} + x_{152} + x_{153} + x_{154} + x_{155} + x_{156} + x_{157} \leq 100$$

Mina 16 - Pellet

$$x_{161} + x_{162} + x_{163} + x_{164} + x_{165} + x_{166} + x_{167} \leq 500$$

Mina 16 - Hematitinha

$$x_{161} + x_{162} + x_{163} + x_{164} + x_{165} + x_{166} + x_{167} \leq 100$$

Mina 17 - Pellet

$$x_{171} + x_{172} + x_{173} + x_{174} + x_{175} + x_{176} + x_{177} \leq 500$$

Mina 17 - Hematitinha

$$x_{171} + x_{172} + x_{173} + x_{174} + x_{175} + x_{176} + x_{177} \leq 100$$

Mina 18 - Pellet

$$x_{181} + x_{182} + x_{183} + x_{184} + x_{185} + x_{186} + x_{187} \leq 500$$

Mina 18 - Hematitinha

$$x_{181} + x_{182} + x_{183} + x_{184} + x_{185} + x_{186} + x_{187} \leq 100$$

Mina 19 - Pellet

$$x_{191} + x_{192} + x_{193} + x_{194} + x_{195} + x_{196} + x_{197} \leq 2.000$$

Mina 19 - Hematitinha

$$x_{191} + x_{192} + x_{193} + x_{194} + x_{195} + x_{196} + x_{197} \leq 100$$

A soma das expedições do terminal j deve ser menor do que a capacidade de expedição total dos produtos.

Terminal 1 – Pellet + Hematitinha

$$x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{14} + x_{15} + x_{16} + x_{17} + x_{18} + x_{19} + x_{110} + x_{111} + x_{112} + x_{113} + x_{114} + x_{115} + x_{116} + x_{117} + x_{118} + x_{119} \leq 1.000$$

Terminal 2 – Pellet + Hematitinha

$$x_{21} + x_{22} + x_{23} + x_{24} + x_{25} + x_{26} + x_{27} + x_{28} + x_{29} + x_{210} + x_{211} + x_{212} + x_{213} + x_{214} + x_{215} + x_{216} + x_{217} + x_{218} + x_{219} \leq 1.000$$

Terminal 3 – *Pellet* + Hematitinha

$$x_{31} + x_{32} + x_{33} + x_{34} + x_{35} + x_{36} + x_{37} + x_{38} + x_{39} + x_{310} + x_{311} + x_{312} + x_{313} + x_{314} + x_{315} + x_{316} + x_{317} + x_{318} + x_{319} \leq 2.000$$

Terminal 4 – *Pellet* + Hematitinha

$$x_{41} + x_{42} + x_{43} + x_{44} + x_{45} + x_{46} + x_{47} + x_{48} + x_{49} + x_{410} + x_{411} + x_{412} + x_{413} + x_{414} + x_{415} + x_{416} + x_{417} + x_{418} + x_{419} \leq 1.500$$

Terminal 5 – *Pellet* + Hematitinha

$$x_{51} + x_{52} + x_{53} + x_{54} + x_{55} + x_{56} + x_{57} + x_{58} + x_{59} + x_{510} + x_{511} + x_{512} + x_{513} + x_{514} + x_{515} + x_{516} + x_{517} + x_{518} + x_{519} \leq 500$$

Terminal 6 – *Pellet* + Hematitinha

$$x_{61} + x_{62} + x_{63} + x_{64} + x_{65} + x_{66} + x_{67} + x_{68} + x_{69} + x_{610} + x_{611} + x_{612} + x_{613} + x_{614} + x_{615} + x_{616} + x_{617} + x_{618} + x_{619} \leq 800$$