

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS**

PEDRO AUGUSTO COSTA SILVA

**PROGRAMAÇÃO LINEAR NA ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E
ECONÔMICA DE PROJETO MULTIMINA**

**PORTO ALEGRE
2016**

PEDRO AUGUSTO COSTA DA SILVA

**PROGRAMAÇÃO LINEAR NA ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E
ECONÔMICA DE PROJETO MULTIMINA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Jair Carlos Koppe

**PORTO ALEGRE
2016**

PEDRO AUGUSTO COSTA DA SILVA

**PROGRAMAÇÃO LINEAR NA ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E
ECONÔMICA DE PROJETO MULTIMINA**

Esta dissertação foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e aprovado e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Aprovado em: _19/12/2016

Jair Carlos Koppe

Prof. Orientador

Carlos Pérez Bergman

Prof. Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

**Prof. Dr. Enrique Munaretti – DEMIN/UFRGS
Prof. Dr. Jorge Dariano Gavronski – DEMIN/UFRGS
Prof. Dr. Raul Oliveira Neto - UNIPAMPA**

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho:

A minha família pela formação do meu caráter moral e incentivo. A minha noiva Marília pelo apoio incondicional.

Também a Vale pela oportunidade de realizar este trabalho. A todos da gerência GEPDS por apoio e direcionamento nas atividades realizadas. A todos participantes do projeto FRAGCOM pelo companheirismo.

E agradeço aos professores da UFRGS em especial o meu orientador Prof. Jair Carlos Koppe pelas orientações e sabedoria que me transmitiu.

RESUMO

Os custos de produção de minério de ferro possuem variações de acordo com a especificidade de cada mina. Na fase mina, dois dos maiores custos de produção estão associados aos índices: distância média de transporte e a relação estéril minério. A implantação do projeto de múltiplas minas e correias transportadoras em Itabira visa diminuir os custos associados a estes dois indicadores. O método de alimentação da planta de beneficiamento oriundo de múltiplas minas foca em reduzir a relação estéril minério global do complexo e a implantação de correias transportadoras mitiga o aumento da distância média de transporte. O presente trabalho tem seu enfoque em uma proposta de lavra de múltiplas minas e de uma pilha de minério para alimentação de três diferentes usinas. Propõem-se um modelo de programação linear por metas que determinará a melhor alimentação das usinas, menor distância média de transporte e menor relação estéril minério. Este modelo de otimização foi elaborado utilizando o software LINGO com interface com EXCEL, e avalia cenários diversificados entre o transporte por caminhões fora de estrada e o transporte misto entre caminhões fora de estrada e transportadores de correia de longa distância. Os resultados apresentados mostram que o método de múltiplas minas é uma saída técnica e economicamente viável para melhor aproveitamento das jazidas do Complexo Minerador de Itabira, apresentando uma economia que varia de US\$82M até US\$118M dependendo do local de instalação das unidades de Britagem Semimóvel (BSMs).

Palavras-chave: Programação linear, multimina, transportador de correias de longas distâncias.

ABSTRACT

Production costs of iron ore varies according to the specificity of each mine. In the mining phase, some of the largest operational costs are associated to the haulage distance and the stripping ratio. In this context, the implementation of the multiple mines project and the conveyor belts at the Itabira Complex Mines aims to optimize these two indicators. The multiple mines methodology focuses on reducing the overall stripping ratio of the complex, and the implementation of conveyor belts mitigates the increase of the haulage distance. Two mines and a stock pile are available to feed three different concentration plants. The goal is to achieve the best way to feed the plants considering the economic aspects. A linear goal programming model is proposed to determine the best iron ore mass feeding the plants from different mines, taking into account the least haulage distance and the smallest stripping ratio. This optimization model was developed using LINGO Software to interface with EXCEL and evaluate diversified scenarios. The results showed that the method of multiple mines is a technical and economically viable method for mine planning at the Itabira Complex.

Keywords: Linear programming, multiple mines, conveyor belts.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1-ÍNDICE DE PREÇO DE MINÉRIO DE FERRO, THE STEEL INDEX E METAL BULLETIN (2015)	15
FIGURA 2- EXEMPLO DE RESOLUÇÃO GEOMÉTRICA	20
FIGURA 3- QUADRILÁTERO FERRÍFERO DORR 1969, ALMEIDA 2004, ENDO ET AL. 2005.....	25
FIGURA 4- COLUNA ESTRATIGRÁFICA SIMPLIFICADA DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO ..	27
FIGURA 5 - MAPA GEOLÓGICO E SEÇÕES TÍPICAS DAS MINAS DE ITABIRA.....	30
FIGURA 6- DISPOSIÇÃO DAS MINAS, DEPÓSITO E USINAS DO COMPLEXO ITABIRA.....	31
FIGURA 7- MATRIZ DE ALIMENTAÇÃO DAS USINAS DE ITABIRA: CE (MINA CONCEIÇÃO), DEP_IC (DEPÓSITO DE ITABIRITOS COMPACTOS), MM (MINAS DO MEIO), CEI (USINA DE CONCEIÇÃO I), CEII (USINA DE CONCEIÇÃO II) E CA (USINA DE CAUÊ).....	32
FIGURA 8- LOCALIZAÇÃO DAS BSMS CORPO D E CAMARINHA E SEUS RESPECTIVOS TCLDS	34
FIGURA 9- LOCALIZAÇÃO DAS BSMS CORPO D E CAMARINHA E SEUS RESPECTIVOS TCLDS	35
FIGURA 10- GRÁFICO COMPARATIVO DE EVOLUÇÃO DA REM.....	51
FIGURA 11- GRÁFICO DA EVOLUÇÃO DA MOVIMENTAÇÃO (ROM + ESTÉRIL)	51
FIGURA 12- EVOLUÇÃO ANUAL DA DMT.....	52
FIGURA 13- GRÁFICO DE GANHOS CENÁRIO A.....	53
FIGURA 14- GRÁFICO DE GANHOS CENÁRIO B.....	54
FIGURA 15- GRÁFICO DE GANHOS CENÁRIO B.....	55
FIGURA 16 - PROPOSTA DE NOVA MATRIZ DE ALIMENTAÇÃO DAS USINAS DE ITABIRA E DMT GERAL PARA O ANO DE 2017: CE (MINA CONCEIÇÃO), DEP_IC (DEPÓSITO DE ITABIRITOS COMPACTOS), MM (MINAS DO MEIO), CEI (USINA DE CONCEIÇÃO I), CEII (USINA DE CONCEIÇÃO II) E CA (USINA DE CAUÊ).....	57
FIGURA 17 - PROPOSTA DE NOVA MATRIZ DE ALIMENTAÇÃO DAS USINAS DE ITABIRA E DMT GERAL PARA O ANO DE 2018: CE (MINA CONCEIÇÃO), DEP_IC (DEPÓSITO DE ITABIRITOS COMPACTOS), MM (MINAS DO MEIO), CEI (USINA DE CONCEIÇÃO I), CEII (USINA DE CONCEIÇÃO II) E CA (USINA DE CAUÊ).....	58
FIGURA 18- PROPOSTA DE NOVA MATRIZ DE ALIMENTAÇÃO DAS USINAS DE ITABIRA E DMT GERAL PARA O ANO DE 2019: CE (MINA CONCEIÇÃO), DEP_IC (DEPÓSITO DE ITABIRITOS COMPACTOS), MM (MINAS DO MEIO), CEI (USINA DE CONCEIÇÃO I), CEII (USINA DE CONCEIÇÃO II) E CA (USINA DE CAUÊ).....	59
FIGURA 19- PROPOSTA DE NOVA MATRIZ DE ALIMENTAÇÃO DAS USINAS DE ITABIRA E DMT GERAL PARA O ANO DE 2020: CE (MINA CONCEIÇÃO), DEP_IC (DEPÓSITO DE ITABIRITOS COMPACTOS), MM (MINAS DO MEIO), CEI (USINA DE CONCEIÇÃO I), CEII (USINA DE CONCEIÇÃO II) E CA (USINA DE CAUÊ).....	60
FIGURA 20 - PROPOSTA DE NOVA MATRIZ DE ALIMENTAÇÃO DAS USINAS DE ITABIRA E DMT GERAL PARA O ANO DE 2021: CE (MINA CONCEIÇÃO), DEP_IC (DEPÓSITO DE	

ITABIRITOS COMPACTOS), MM (MINAS DO MEIO), CEI (USINA DE CONCEIÇÃO I), CEII (USINA DE CONCEIÇÃO II) E CA (USINA DE CAUÊ).....61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Disponibilidade de ROM.....	41
Tabela 2 - Qualidade ROM anual.....	41
Tabela 3 - Relação estéril minério das minas.....	42
Tabela 4 - Dmt caminhões.....	43
Tabela 5 - Dmt Bsm Cpd e Bsm Cam.....	44
Tabela 6 - Dmt Bsm Cam.....	44
Tabela 7 - Matriz de alimentação	45
Tabela 8 - Resultados cenário A.....	46
Tabela 9 - Qualidade anual alimentação cenário A.....	46
Tabela 10 - Resultados cenário B.....	47
Tabela 11 - Qualidade anual alimentação cenário B	48
Tabela 12 - Resultados cenário C.....	49
Tabela 13 - Qualidade anual de alimentação cenário C.....	49
Tabela 14 - Massas ROM (t) origem e destino.....	50

LISTA DE ABREVIATURAS

CVRD – Companhia Vale do Rio Doce

DEP_IC – Depósito de Itabiritos Compactos

EFC – Estrada de Ferro Carajás

EFVM – Estrada de Ferro Vitória Minas

CPBS – Companhia Portuária da Bahia de Sepetiba

MCR – Mina Morraria de Santa Cruz

ROM – *Run of mine*

ACESITA – Companhia Aços Especiais Itabira

PO – Pesquisa operacional

NE – Nordeste

SW – Sudoeste

MM – Minas do Meio

CA – Usina do Cauê

CE – Mina de Conceição

CEI – Usina de Conceição I

CEII – Usina de Conceição II

BSM – Britagem semimóvel

TCLD – Transportador de correias de longas distâncias

REM – Relação estéril minério

DMT – Distância média de transporte

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	A VALE E O MINÉRIO DE FERRO	13
1.1.1	Itabira.....	14
1.2	MOTIVAÇÃO DO TRABALHO	16
1.3	META	16
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
1.5	METODOLOGIA.....	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	PESQUISA OPERACIONAL.....	18
2.1.1	Programação Linear.....	18
2.1.2	Método Simplex	19
2.1.3	Programação por metas.....	21
2.1.4	Linguagens de Modelagem	21
2.1.5	Uso da Programação Linear na Extração Mineral.....	22
2.2	BRITAGEM IN PIT	23
2.3	TRANSPORTADOR DE CORREIAS DE LONGAS DISTÂNCIAS	24
3	ESTUDO DE CASO	25
3.1	GEOLOGIA REGIONAL.....	25
3.1.1	Complexo Metamórfico.....	26
3.1.2	Supergrupo Rio das Velhas	26
3.1.3	Supergrupo Minas	26
3.1.4	Grupo Itacolomi.....	27
3.2	GEOLOGIA LOCAL.....	28
3.2.1	Complexo Metamórfico	28
3.2.2	Supergrupo Rio das Velhas	28
3.2.3	Supergrupo Minas	28
3.2.4	Granitóides.....	29
3.2.5	Intrusões máficas pós-minas.....	29
3.3	COMPLEXO MINERADOR DE ITABIRA	31
3.4	MODELAGEM MATEMÁTICA	35

3.4.1	Introdução.....	35
3.5	MODELO MATEMÁTICO: MINIMIZAR RELAÇÃO ESTÉRIL MINÉRIO, DISTÂNCIA MÉDIA DE TRANSPORTE E DESVIOS DE TEOR DE ALIMENTAÇÃO.....	36
3.5.1	Dados de entrada	36
3.5.2	Variáveis de decisão.....	36
3.5.3	Função objetivo.....	37
3.5.4	Restrições	37
a)	<i>Uso de ROM de cada mina ou depósito</i>	37
b)	<i>Capacidade de cada usina</i>	37
c)	<i>Disponibilidade das usinas para determinada mina ou depósito.....</i>	37
d)	<i>Existência de transporte da mina ou depósito para determinada usina....</i>	38
e)	<i>Limite de alimentação da usina do Cauê com materiais do Depósito de Itabiritos Compactos e da Mina de Conceição</i>	38
f)	<i>Garantia do teor na alimentação das usinas</i>	38
g)	<i>Garantia de não negatividade e integralidade</i>	38
3.6	IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL.....	38
4	DADOS DE ENTRADA E ANÁLISE DOS RESULTADOS	40
4.1	DADOS ENTRADA.....	40
4.1.1	Necessidade e qualidade do ROM para alimentação das usinas.....	40
4.1.2	Disponibilidade e qualidade do ROM das minas e do depósito	40
4.1.3	Relação Estéril Minério (REM).....	42
4.1.4	Distância Média de Transporte (DMT)	42
a)	<i>DMT cenário A. Transporte por Caminhões Fora de Estrada</i>	42
b)	<i>DMT cenário B. Transporte por Caminhões Fora de Estrada para BSM Corpo D e BSM Camarinha</i>	43
c)	<i>DMT cenário C. Transporte por Caminhões Fora de Estrada para BSM Camarinha.....</i>	44
4.1.5	<i>Restrição de alimentação</i>	44
4.2	ANÁLISE DOS RESULTADOS	45
4.2.1	Resultados dos indicadores operacionais	45
a)	<i>Resultados cenário A.....</i>	46
b)	<i>Resultados cenário B.....</i>	47
c)	<i>Resultados cenário C.....</i>	49
d)	<i>Resumo dos resultados operacionais</i>	50

4.2.2	Resultados dos custos operacionais e ganhos de capital.....	52
a)	<i>Resultados cenário A</i>	53
b)	<i>Resultados cenário B</i>	54
c)	<i>Resultados cenário C</i>	55
d)	<i>Resumo dos ganhos de capital e custos operacionais</i>	56
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	61
5.1	CONCLUSÕES	61
5.2	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	62
	REFERÊNCIAS.....	63
	ANEXO B – RESULTADOS DO SIMULADOR	67

1 INTRODUÇÃO

1.1 A VALE E O MINÉRIO DE FERRO

A Vale S.A. é a maior produtora de minério de ferro e pelotas no mundo e a qualidade superior do minério constitui-se um dos principais diferenciais competitivos. Nesse panorama, a liderança da Vale nesse mercado é resultado, também, dos investimentos em tecnologia e pesquisa e em uma infraestrutura logística eficiente, que integra mina, ferrovia e porto, (VALE S/A, 2015)

Cabe mencionar que a venda de minério de ferro e pelotas, que são pequenos aglomerados de partículas de ferro, representa mais da metade da receita da empresa. E os principais clientes são siderúrgicas asiáticas, em especial na China, que consomem, em média, mais da metade da sua produção.

No que diz respeito à produção de minério de ferro e pelotas no Brasil, é importante ressaltar que se concentra em quatro grandes sistemas que são distinguidos principalmente por sua logística, quais sejam: Norte, Sudeste, Sul e Centro-Oeste.

a) Sistema Norte

Localizado em Carajás, no estado do Pará, o sistema contém alguns dos maiores depósitos de minério de ferro do mundo e uma usina de processamento de minério. A Estrada de Ferro de Carajás (EFC) transporta o minério até o terminal marítimo de Ponta da Madeira, no estado do Maranhão, de onde ele é embarcado para exportação. A Vale, também, possui uma usina de pelotização em São Luís, no Maranhão, que processa material proveniente de Carajás.

b) Sistema Sudeste

Está localizado em três áreas do estado de Minas Gerais: Itabira, Minas Centrais e Mariana. O escoamento é feito pela Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM) até o Porto de Tubarão, no estado do Espírito Santo, de onde o minério de ferro é embarcado nos navios.

O sistema possui, ainda, oito usinas de pelotização no estado do Espírito Santo: quatro são de propriedade da Vale, três usinas da Samarco, empresa da qual a Vale possui 50% de participação, e uma da Hispanobras, da qual a Vale tem 50,9% de participação.

c) Sistema Sul

Situado também em Minas Gerais, o sistema reúne três complexos de mineração: Itabiritos (composto de quatro minas, duas usinas principais de beneficiamento e três usinas de beneficiamento secundárias), Vargem Grande (três minas e uma usina de beneficiamento) e Paraopeba (quatro minas e três usinas de beneficiamento). O transporte do minério de ferro é feito em via férrea por meio da MRS, empresa da qual a Vale possui participação de 41,5%, e a exportação ocorre pelo Terminal Marítimo da Ilha Guaíba e pela Companhia Portuária da Bahia de Sepetiba (CPBS), ambos no Rio de Janeiro.

O sistema possui duas unidades de pelotização: Fábrica, abastecida pela mina de mesmo nome, e Vargem Grande, cujo minério provém da Mina de Pico.

d) Sistema Centro-Oeste

Situado em Mato Grosso do Sul, o sistema é composto por duas minas, Urucum e MCR (Mina Morraria de Santa Cruz). As minas, especializadas em minério de ferro, têm mineralizações privilegiadas, já que o material extraído, além de ter grande teor em ferro, já está próximo do formato especificado pelo mercado: o produto final *lump ore*. Toda a produção é escoada por via terrestre e fluvial.

1.1.1 Itabira

A história do nascimento da antiga Companhia Vale do Rio Doce (CVRD), hoje conhecida como Vale, remete a 1942 quando o governo brasileiro assumiu o controle das jazidas de ferro de Itabira e da Estrada de Ferro Vitória Minas. Em 1982, a CVRD adquiriu da Companhia Aços Especiais Itabira (ACESITA) as minas de Chacrinha, Onça e Periquito, compondo, assim, a atual configuração do Complexo Minerador de Itabira (VALE, 2012).

Para o beneficiamento do minério extraído das minas em 1972, foi inaugurada a Usina do Cauê, utilizada para beneficiar hematitas e itabiritos friáveis oriundos da mina do Cauê e posteriormente das Minas do Meio, conjunto de minas composto por Dois Córregos, Camarinha, Chacrinha, Periquito e Onça. Em 1979 entrou em operação a usina de Conceição, responsável por beneficiar toda a hematita e o itabirito da mina de Conceição. Com a redução dos itabiritos friáveis e hematitas no complexo nos dias atuais, foi necessária a lavra de itabirito compactos, exigindo, então, a criação e a adaptação de usinas para este tipo de minério. A nova usina foi chamada de Conceição II, inaugurada em 2014, e a adaptação foi da Usina de Conceição I foi feita em 2015, ficando para 2016 a adaptação da Usina de Cauê.

Com a desvalorização dos preços do minério de ferro que acontece desde 2011 e foi agravada em 2014, como exemplificado pela Figura 1, as empresas do setor viram a necessidade de reduzir custos além de acrescentar valor ao produto por meio dos prêmios associados a qualidade dos produtos. As adequações das usinas garantem a qualidade do produto para os prêmios e a implantação de um conjunto de britagem *in pit* e correias transportadoras que é o tema desta dissertação é uma forma de redução de custos de operação de mina.

Figura 1-Índice de preço de minério de ferro, The Steel Index e Metal Bulletin (2015)



Fonte: VALE, 2015.

1.2 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

A programação linear é uma ferramenta muito importante para a tomada de decisão nos ambientes corporativos, seguindo este raciocínio ela foi escolhida para auxiliar um estudo de viabilidade para implantação de um conjunto de correias transportadoras e britagem semimóvel. Trabalhos anteriores mostraram bons resultados com a utilização desta técnica como exemplo a simulação de composição de lotes de minério de ferro e a simulação do processo produtivo de algumas minas.

1.3 META

Este trabalho tem como meta desenvolver um modelo matemático para avaliar a melhor distribuição de lavra e alimentação das usinas de minério de ferro, utilizando as técnicas de pesquisa operacional. Estas técnicas serão aplicadas a diferentes cenários de produção com objetivo de garantir a otimização das variáveis aplicadas ao processo de acordo com objetivos pré-estabelecidos.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Com objetivo de atingir as metas propostas, essa dissertação busca cumprir os seguintes objetivos específicos:

- Criar um modelo matemático (teórico) que represente as características do processo de lavra e alimentação do beneficiamento do minério de ferro considerando restrições operacionais;
- Utilizar a pesquisa operacional por meio da programação linear para otimizar cada um dos cenários de transporte por meio de caminhões e a combinação composta por caminhões e correias transportadoras;
- Definir a alimentação e garantir a qualidade de ROM ideal para cada usina;
- Avaliar os resultados obtidos para tomada de decisão sobre a viabilidade técnica da implantação do método de lavra de múltiplas minas;

- Mostrar a economia gerada pelo método de múltiplas minas em relação ao método convencional.

Dessa maneira, pretende-se utilizar o otimizador como ferramenta de tomada de decisões quanto à distribuição ROM entre a origem e seus destinos.

1.5 METODOLOGIA

Para atender os objetivos, o trabalho será dividido em quatro partes:

- i) Revisão bibliográfica: Esta etapa tem como objetivo a aquisição e o aprimoramento da teoria sobre o tema do trabalho. Essa revisão aborda a área da Pesquisa Operacional, com ênfase em programação linear e programação por metas, aplicabilidade na área de mineração, sistemas de britagem *in pit* e correias transportadoras.
- ii) Desenvolvimento do modelo teórico: Nesta etapa apresenta-se a elaboração de modelo matemático computacional que representa as minas, depósito e as usinas de beneficiamento do Complexo Minerador de Itabira.
- iii) Estudo de caso e análise de resultados: A última etapa consiste em alimentar o modelo com os dados de cada um dos três cenários que foram estudados, e avaliar a viabilidade da nova proposta de lavra, levando em consideração aspectos operacionais.
- iv) Conclusão: Apresenta os resultados obtidos ao longo de todo o trabalho, as considerações finais e sugestões para novos trabalhos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PESQUISA OPERACIONAL

A Pesquisa Operacional (PO) é o estudo aplicado a problemas que compreendem a condução e a coordenação das atividades de uma organização e é considerado o método científico mais adequado para investigar problemas empresariais. Nesse contexto, a PO tornou-se uma ferramenta de suma importância para a otimização e a racionalização de recursos, auxiliando a tomada de decisões.

As origens da PO remetem ao início da Segunda Guerra Mundial, momento em que os americanos e os britânicos convocaram cientistas para lidar com problemas táticos e estratégicos, tal como alocar eficientemente os recursos escassos para as operações militares.

Segundo Hillier e Lieberman (2013), a PO teve impacto impressionante para melhorar a eficiência de inúmeras organizações pelo mundo. Sendo assim, contribuiu significativamente para o aumento da produtividade da economia de diversos países.

2.1.1 Programação Linear

A programação linear é o modelo matemático usado para descrever um problema. Nesse contexto, programação refere-se a planejamento e o adjetivo linear significa que todas as funções utilizadas são lineares. Ou seja, a programação linear é um planejamento para atingir um resultado ótimo, de acordo com um modelo matemático.

Assim, a programação linear é uma técnica que permite estudar o comportamento de várias variáveis segundo uma função linear, isto é, a função objetivo, obedecendo simultaneamente a um conjunto de restrições lineares. De acordo com Rao (2009), a finalidade de otimização é escolher o melhor dos muitos projetos aceitáveis disponíveis. Desse modo, um critério é escolhido para a comparação entre as diferentes alternativas aceitáveis, visando a selecionar a melhor. O critério é otimizado quando expresso como uma função das variáveis designadas, sendo que essa função é conhecida como função objetivo. A escolha de uma função objetivo é regulada pela natureza dos problemas.

Dessa forma, a construção do modelo de programação linear ocorre com a identificação das variáveis do problema, seguida da listagem das restrições e da sua expressão em funções e, por último, pela identificação do critério de otimização.

2.1.2 Método Simplex

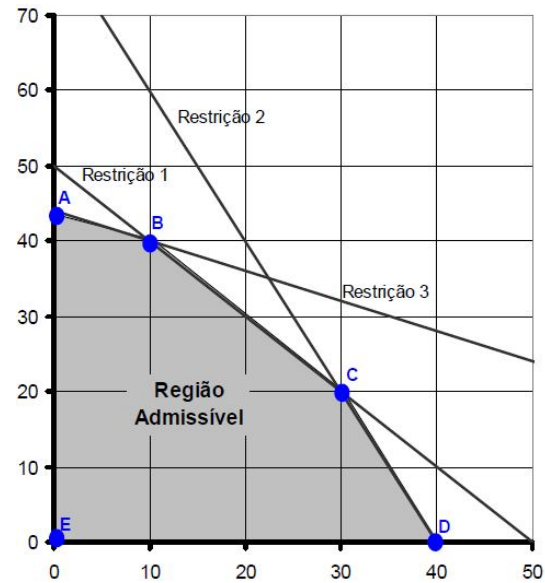
O método Simplex é um procedimento para solucionar problemas de programação linear. Segundo Hillier e Lieberman (2013), esse é um procedimento algébrico, entretanto seus conceitos subjacentes são geométricos. Esses conceitos geométricos são baseados em gráficos representados por retas (restrições), sendo que a área limitada por elas representa as soluções viáveis, ou seja, a região admissível. Apresenta-se abaixo, conforme Carvalho Junior (2005), um breve exemplo do conceito geométrico e, consecutivamente, sua resolução na Figura 2:

$$\text{Função objetivo } Z = 25x_1 + 20x_2 \quad 2.1$$

Restrições:

$$\left. \begin{array}{l} 1: x_1 + x_2 \leq 50 \\ 2: 2x_1 + x_2 \leq 80 \\ 3: 2x_1 + 5x_2 \leq 220 \\ 4: x_1, x_2 \geq 0 \end{array} \right\} \quad 2.2$$

Figura 2- Exemplo de Resolução Geométrica



Fonte: CARVALHO JUNIOR, 2005.

O Método Simplex é um algoritmo baseado na Álgebra Linear para determinar, por um método algébrico iterativo, a solução ótima de um problema.

Resumindo, o algoritmo parte de uma solução viável do sistema de equações que constituem as restrições do problema, e a partir dessa solução inicial, vai identificando novas soluções viáveis de valor igual ou maior, que a encontrada anteriormente. De acordo com Hillier e Lieberman (2013), as soluções ótimas para qualquer problema de programação linear residem nos limites da região de soluções viáveis. Sendo esta região a chave do algoritmo simplex, ela é denominada simplex.

Desse modo, em um espaço bidimensional, a região formada pelo espaço de soluções viáveis é um plano. A equação que representa a função objetivo pode ser representada por um vetor, e assim, seguindo a direção de melhoria da função objetivo, determinada pelo vetor, dentro do espaço de soluções viáveis, é possível chegar ao ponto ótimo. A busca garante, portanto, que o ponto ótimo otimize a função objetivo, e que o ponto ótimo satisfaça o conjunto das restrições que compõem o problema de programação linear.

2.1.3 Programação por metas

A modelagem matemática, ou de otimização, geralmente atende a condições e/ou restrições para se atingir um único objetivo. Sendo assim, a programação linear origina-se de um conjunto de restrições rígidas que não são violadas. Entretanto, no cotidiano das empresas, tais restrições podem não ser tão rigorosas, o que resulta em uma flexibilidade para atingir os objetivos.

Nesse universo de flexibilidade dos objetivos, podemos criar modelos matemáticos utilizando vários objetivos, ao invés de utilizar restrições intrínsecas. A solução desses modelos não se restringe a maximizar ou minimizar uma função objetivo dentro de um grupo de restrições, mas, sim, busca uma solução levando em consideração um limite aceitável. Isso se denomina, então, Programação por Metas.

A Programação por Metas busca, também, minimizar os desvios para o alcance das metas, utilizando variáveis de desvios. Na situação ideal todas as variáveis de desvio deveriam ter valor igual a zero, ou seja, isso evidencia que todos os objetivos foram alcançados.

A Programação por Metas pode ser utilizada em três métodos:

1. Programação por metas arquimediana: é a programação que penaliza as variáveis de desvio da função objetivo de acordo com sua importância, ou seja, atribui pesos as metas;
2. Programação por metas lexicográfica: é a programação que a função objetivo é composta de um vetor ordenado cuja dimensão coincide com o número de níveis de prioridade;
3. Programação por metas minmax: é a programação que resulta da minimização do máximo desvio de todas as metas simples, isto é, o desvio máximo é minimizado.

2.1.4 Linguagens de Modelagem

Segundo Hillier e Lieberman (2013), uma linguagem de modelagem matemática é um *software* projetado especificamente para formular, de modo eficiente, modelos

matemáticos grandes, entre os quais modelos de programação linear. Além de formular de modo eficiente modelos de grandes proporções, uma linguagem de modelagem agiliza uma série de tarefas de gerenciamento, tais como: acesso e transformações de dados em parâmetros de modelo, modificação de modelos sempre que desejar e análise de soluções. Algumas linguagens de modelagem foram desenvolvidas ao longo tempo, dentre elas: AMPL, MPL, OPL, GAMS e LINGO.

Cabe mencionar que para este trabalho será utilizado o LINGO, tendo em vista a disponibilidade na empresa, além de ser um pacote de software de PO mais popular.

2.1.5 Uso da Programação Linear na Extração Mineral

A seguir, são destacados alguns trabalhos que utilizaram programação linear na atividade mineira, com o intuito de mostrar parte do que foi desenvolvido neste campo.

Nesse panorama, Moraes (2005) propõe um modelo de programação linear por metas para otimizar a composição de lotes de minério de ferro. O modelo visa a determinar os locais de retomada do produto estocado, de tal forma que a mistura atenda aos limites de especificações de qualidade e quantidade preestabelecidas pelo cliente e satisfaça as restrições operacionais do pátio, na Usina do Cauê, que fica em Itabira e pertence à Vale S.A.

Por sua vez, Martins (2013) criou um modelo de programação linear responsável por alocar equipamentos de cargas nas frentes de lavra e informar a quantidade de viagens que cada frota de caminhões deve realizar, respeitando as restrições referentes à qualidade, granulometria e massa que deve ser entregue em cada ponto de descarga. Esse modelo foi aplicado para a mina de Brucutu, que fica em São Gonçalo do Rio Abaixo e pertence à Vale S.A.

Já Carvalho Junior (2005) utilizou um modelo de programação linear para representar todo o processo produtivo associado à produção de carvão, desde a lavra até a comercialização. Esse modelo visa a quantificar o risco associado ao atendimento de especificações dos produtos de cada cliente da empresa Copelmi Mineração.

Segundo Newman **et al.** (2010) o uso da pesquisa operacional na mineração se deu nos anos 60. O foco deste estudo é o uso da otimização e simulação tanto para minas a céu aberto quanto subterrânea, mostrando aplicações para planejamento de lavra, seleção de equipamentos e sistemas de despachos.

2.2 BRITAGEM *IN PIT*

De acordo com (Casteel, 2008), britagens *in pit* foram utilizadas em minas de calcário, carvão e metais por um longo tempo desde os anos 50. As vantagens da combinação de britagem *in pit* associada a transportadores de correias foram bem sucedidas até os anos 90, mas com o aumento da capacidade dos caminhões o seu uso ficou mais restrito.

Com a atual situação do mercado de queda nos preços das *commodities*, as empresas de mineração se esforçam para se manterem competitivas, promovendo, assim, uma corrida para diminuir custos e aumentar a capacidade de produção, garantindo uma melhor margem para os produtos. De acordo com Casteel (2008), o método de britagem *in pit* e correias transportadoras possui um grande potencial de redução de custos operacionais de mina. Segundo Hartman (1992), esse método elimina um grande problema, qual seja, o alto custo de construção e manutenção de estradas.

Ainda conforme o autor, “britagens *in pit* possuem capacidade de mobilidade variando de completamente móveis até permanente fixo” (Hartman,1992). Além disso, segundo Ribeiro (2013), os equipamentos de britagem podem ser classificados em móveis, semimóveis ou fixos, conforme detalhamento a seguir:

- a) Britagem Fixa: britadores fixos são aqueles que uma vez instalado na mina, normalmente a distância entre ele e as frentes de lavra aumenta com o passar da vida da mina;
- b) Britagem Semimóvel: esta unidade trabalha próxima à frente de lavra e é movida menos do que a britagem móvel e sendo necessário que a alimentação desta planta seja realizada por caminhões. O mecanismo de transporte da britagem pode fazer parte da estrutura do britador;

- c) Britagem Móvel: este britador trabalha na frente de lavra, diretamente alimentada pelas escavadeiras, e se move com o próprio mecanismo de transporte de acordo com os avanços de lavra.

2.3 TRANSPORTADOR DE CORREIAS DE LONGAS DISTÂNCIAS

O transportador de correias está diretamente ligado a uma britagem, pois o material para ser transportado deve ser previamente preparado. Segundo Ribeiro (2013), a configuração do sistema depende se o material é friável ou necessita de ser britado antes de transportar.

Segundo Lopes (2010), as correias transportadoras são um tapete apoiado sobre roletes e rolos movimentados por um motor, compondo um fluxo de material que inicia no carregamento da correia, passa pelo transporte e finaliza na descarga do material.

Para Hartman (1992) e Ribeiro (2013), o sistema de transporte por correias apresenta as seguintes vantagens:

- Redução da exposição de mão de obra na área de mina;
- Redução dos custos operacionais;
- Aumento da disponibilidade física em relação aos caminhões;
- Vida útil maior quando comparada aos caminhões.

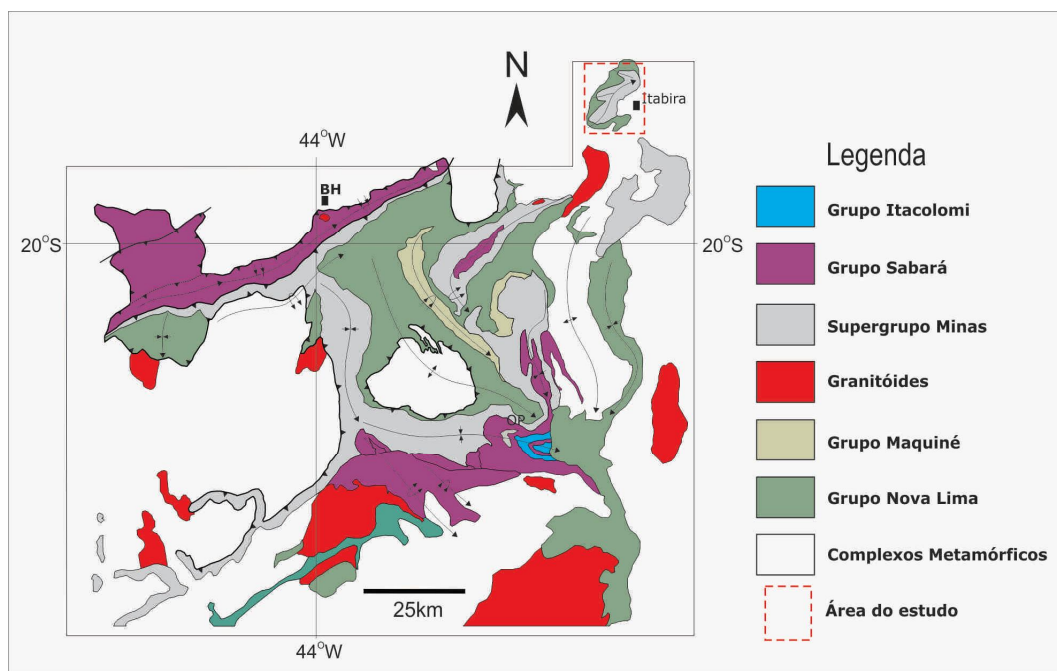
Ainda segundo Ribeiro (2013), a implantação do sistema de correias transportadoras é mais viável para projetos em implantação ou expansão de um projeto já em operação, sendo que, para este um estudo econômico e operacional, deve ser executado para adaptar suas configurações às especificidades de cada mina.

3 ESTUDO DE CASO

3.1 GEOLOGIA REGIONAL

O Quadrilátero Ferrífero (Figura 3) ocupa uma área de 7.200km² na porção central do estado de Minas Gerais e na porção sul do Cráton do São Francisco (ALMEIDA, 1977) e é considerado uma das mais importantes províncias minerais do Brasil.

Figura 3- Quadrilátero Ferrífero Dorr 1969, Almeida 2004, Endo et al. 2005.



Fonte: DORR, 1969; ALMEIDA, 2004; ENDO et al, 2005.

O Quadrilátero Ferrífero é composto pelas seguintes unidades estratigráficas (cf. Fig. 4):

- Complexo metamórfico;
- Sequência vulcano-sedimentar do Supergrupo Rio das Velhas;
- Unidades de sedimentares do Supergrupo Minas e Grupo Itacolomi.

3.1.1 Complexo Metamórfico

O embasamento das sequências supracrustais é representado por complexos metamórficos, sendo estes compostos por rochas gnáissicas de composição tonalítica a granítica, granitos, granodioritos, anfíbolitos, intrusões máficas e ultramáficas (HERZ, 1970).

3.1.2 Supergrupo Rio das Velhas

São rochas metavulcânicas e metassedimentares, subdividida em três grupos: Quebra Osso, Nova Lima e Maquiné.

- O Grupo Quebra Osso é a base do Supergrupo, composto por vulcanitos e sedimentos químicos/clásticos deformados (SCHORSCHER, 1978);
- O Grupo Nova Lima é constituído por rochas metavulcânicas e metassedimentares (DORR, 1969) sendo estas rochas metaultramáficas, metabasaltos, metacherts, filitos, formação ferrífera do tipo Algoma, carbonatos, xistos, metaconglomerados, quartzitos e quartzo xistos;
- O Grupo Maquiné constitui uma associação metassedimentar clástica não marinha (DORR, 1969) composta por quartzitos sericíticos, filitos e quartzo xistos.

3.1.3 Supergrupo Minas

O Supergrupo é dividido em quatro grupos: Tamanduá, Caraça, Itabira, Piracicaba Sabará.

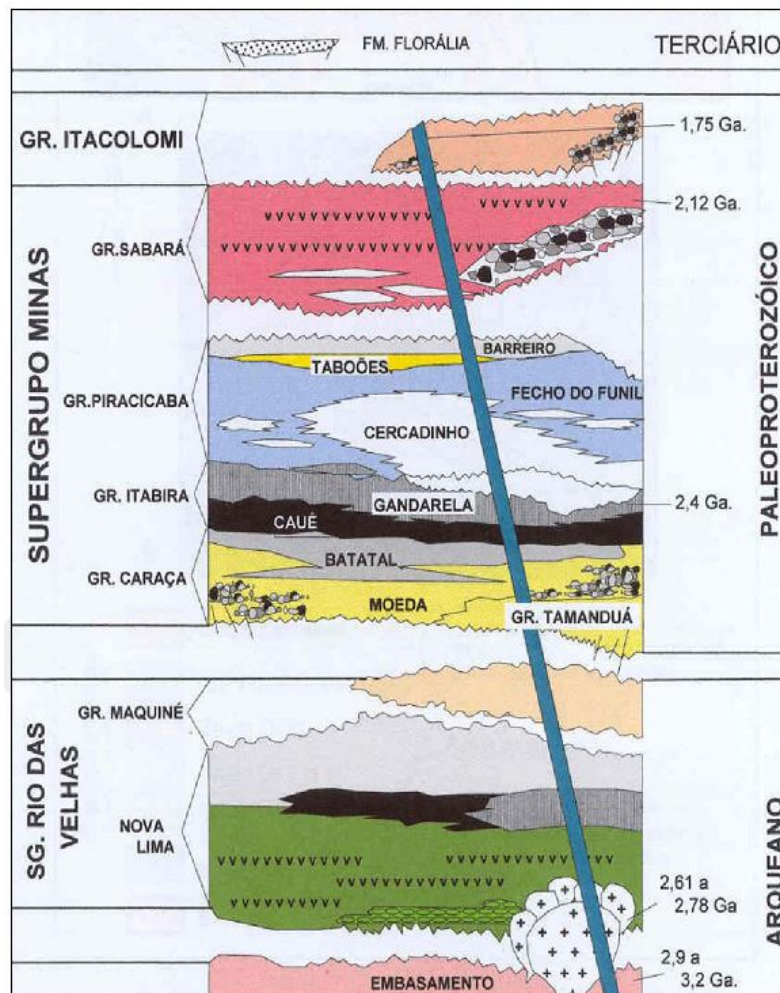
- O Grupo Tamanduá é composto por quartzitos, filitos, itabiritos filíticos e dolomíticos;
- O Grupo Caraça é composto por metassedimentos clásticos;
- O Grupo Itabira é constituído por uma sequência de sedimentos químicos (DORR, 1969), composta por formações ferríferas do tipo Lago Superior, itabiritos, filitos e rochas carbonáticas;
- O grupo Piracicaba é composto principalmente por quartzitos e filitos.

- No topo do Supergrupo Minas ocorre uma sequência de rochas imaturas com contribuição vulcanogênica (RENGER et al. 1994), que constitui o Grupo Sabará.

3.1.4 Grupo Itacolomi

O grupo Itacolomi possui a composição básica de quartzitos, quartzitos conglomeráticos e níveis de metaconglomerados com seixos de itabiritos, filitos e quartzo de veio (DORR, 1969).

Figura 4- Coluna estratigráfica simplificada do Quadrilátero Ferrífero



Fonte: Adaptada de ALKIMIN & MARSHAK, 1998).

3.2 GEOLOGIA LOCAL

O Complexo Minerador de Itabira está localizado na região nordeste do Quadrilátero Ferrífero, em uma região conhecida estruturalmente como sinclínório Itabira (DORR, 1969). Esta estrutura é caracterizada por um sinforme de direção NE-SW e composto pelas seguintes unidades geológicas: complexo metamórfico, sequência vulcano-sedimentar do Supergrupo Rio das Velhas, unidades metassedimentares do Supergrupo Minas, granitoides e intrusões máficas pós-Minas.

3.2.1 Complexo Metamórfico

Esta unidade é constituída por quartzo-muscovita xistos, biotita-gnaisses félsicos bandados e corpos de anfibolitos, localizados em todo o entorno das minas de Itabira.

3.2.2 Supergrupo Rio das Velhas

Esta unidade é representada na região pelo Grupo Nova Lima, constituído de quartzo-clorita xistos, quartzo-clorita-biotita xistos, filitos e xistos ferruginosos, que afloram a noroeste da cava camarinha e a sudeste da mina Conceição.

3.2.3 Supergrupo Minas

O Supergrupo Minas é representado na área estudada pelos grupos Caraça, Itabira e Piracicaba. O Grupo Caraça encontra-se indiviso na base do supergrupo e é formado por quartzitos, filitos, xistos. O Grupo Itabira é representado na área pelo Formação Cauê e compreende itabiritos e rochas carbonáticas. No topo dessa sequência encontra-se a Formação Cercadinho, do Grupo Piracicaba, formada por quartzitos e filitos prateados.

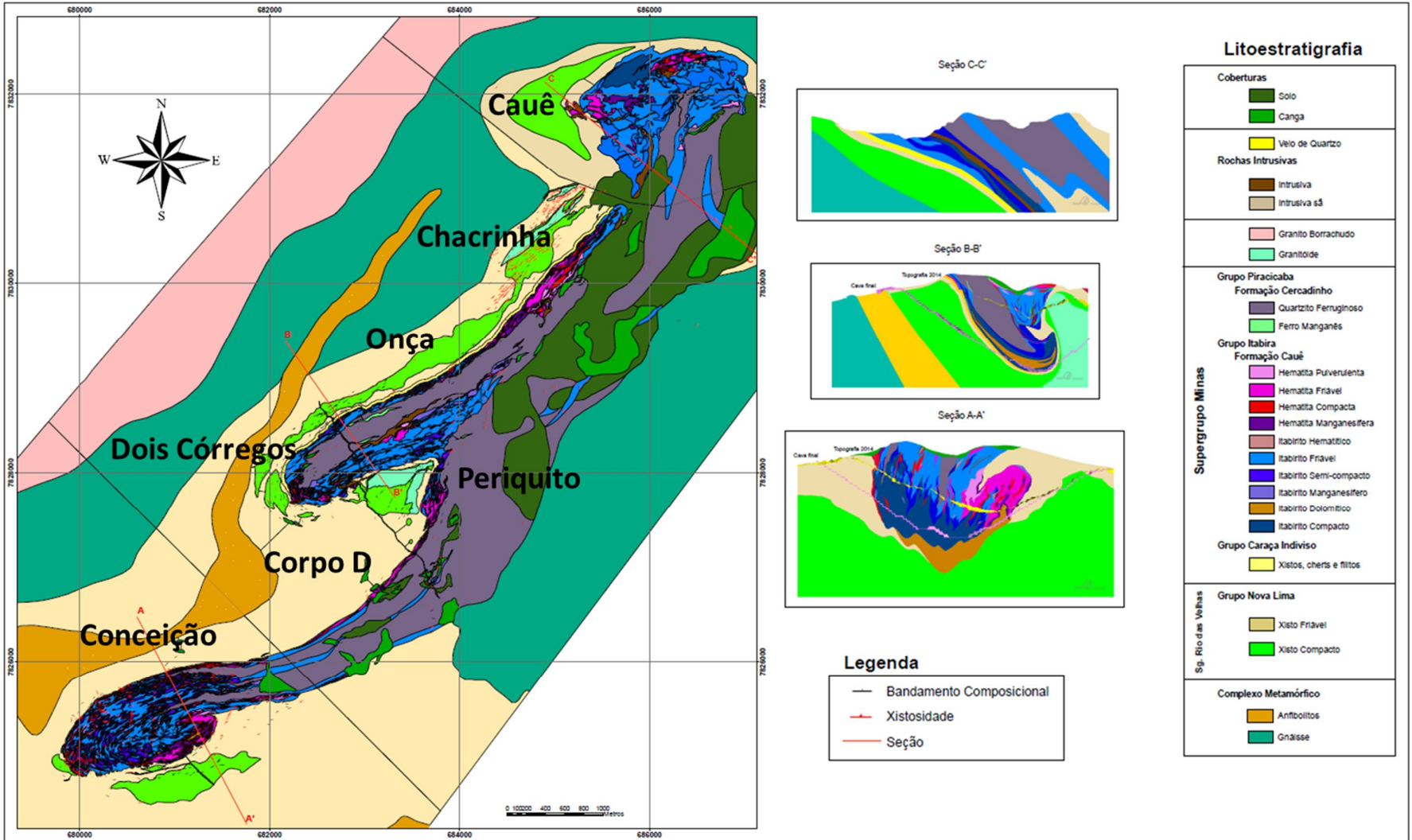
3.2.4 Granitóides

Os granitoides, mapeados na área do estudo, são rochas graníticas de granulação grossa, que afloram a noroeste das minas de Itabira. Essas rochas são associadas à Suite Borrachudos (DORR & BARBOSA, 1963).

3.2.5 Intrusões máficas pós-Minas

Essas rochas são encontradas em todas as minas do Complexo e são atribuídas a três gerações distintas, formadas por clorita-xisto, talco-xisto e anfibolito.

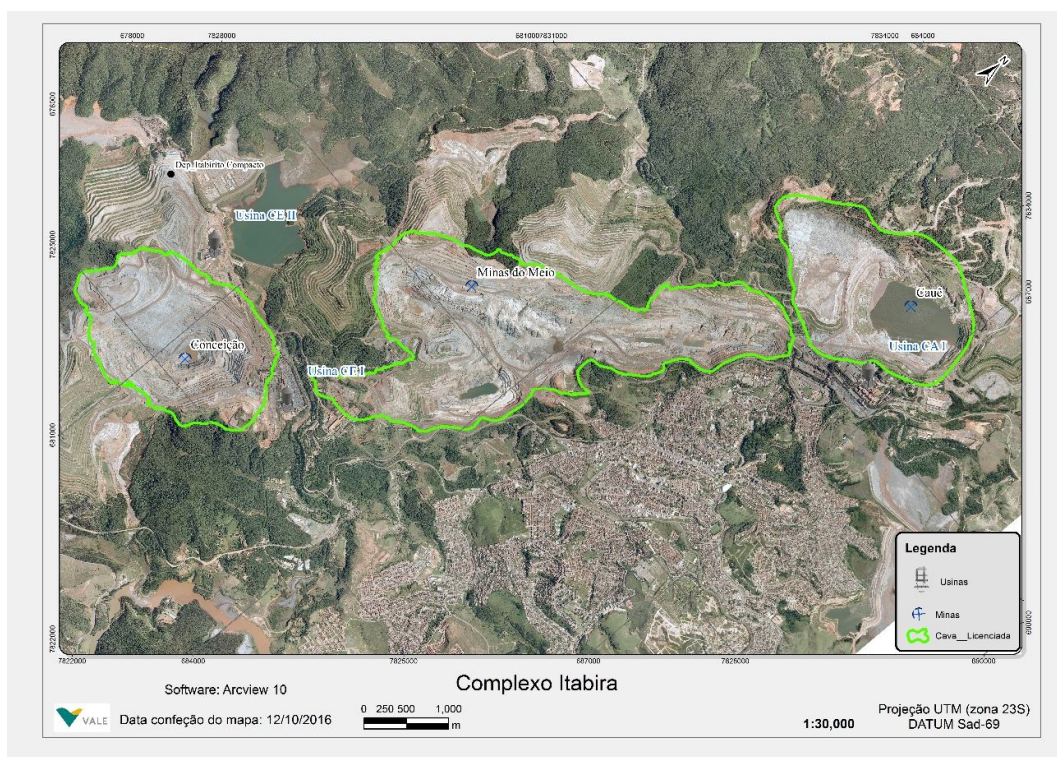
A Figura 5 a seguir evidencia o mapa geológico e três seções do Complexo Minerador de Itabira.



3.3 COMPLEXO MINERADOR DE ITABIRA

O Complexo Minerador de Itabira está localizado em Itabira Minas Gerais e é composto por três minas: Conceição, Minas do Meio e Cauê, esta última já exaurida. Na Mina de Conceição existe um depósito de Itabiritos compactos que neste trabalho será chamado de Depósito de Itabiritos Compactos (DEP_IC). Essa pilha começou a ser confeccionada nos anos 80, onde era depositado material que poderia ter potencial para aproveitamento no futuro, e hoje possui em torno de 80Mt de Itabirito. A Figura 6 mostra a disposição das minas e das usinas do Complexo.

Figura 6- Disposição das Minas, Depósito e Usinas do Complexo Itabira



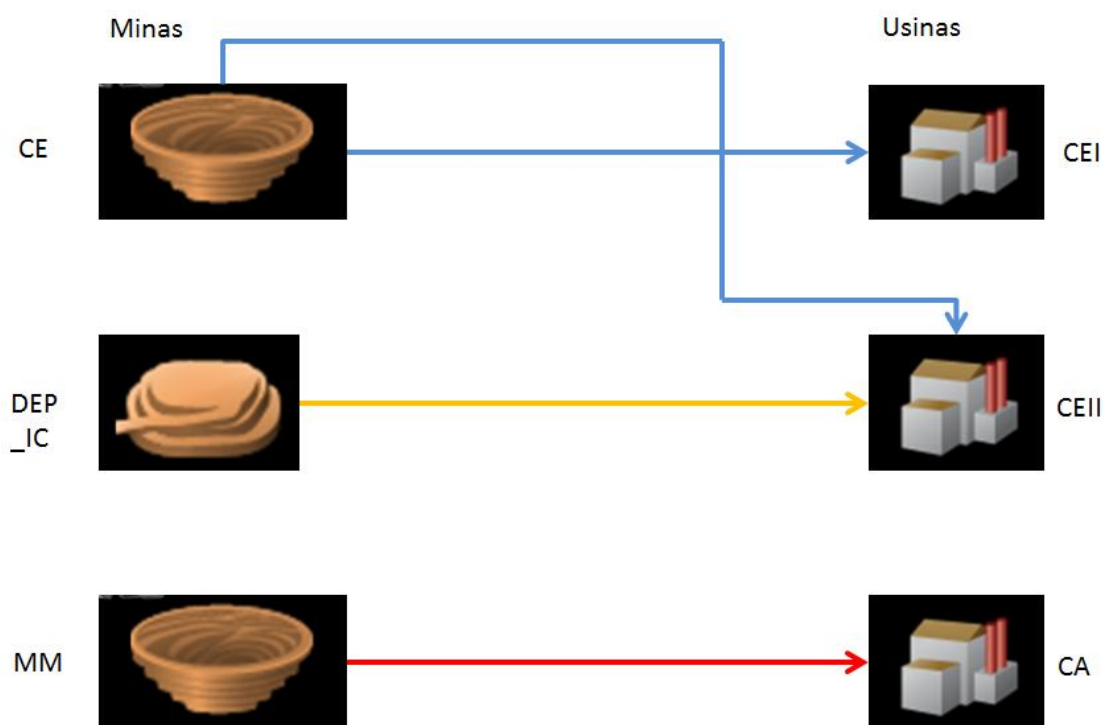
Fonte: VALE S/A, 2015.

Como na maioria das minas de ferro do Brasil, o processo produtivo empregado pela Vale no Complexo Minerador de Itabira, pode ser dividido em duas etapas principais: a lavra e o beneficiamento.

Atualmente, os métodos de lavra utilizados são lavra em encosta e lavra em cava. Esta etapa compreende as seguintes operações: perfuração, desmonte de rochas,

escavação, carregamento e transporte por caminhões. O processo de beneficiamento constitui basicamente de cominuição e concentração. A alimentação das Usinas é configurada da seguinte forma: Minas do Meio (MM) alimenta a Usina do Cauê (CA), Mina Conceição (CE) alimenta as Usinas de Conceição I (CEI) e Conceição II (CEII) e por último o DEP_IC que alimenta também a Usina de Conceição II. A distribuição da alimentação está exemplificada na Figura 7.

Figura 7- Matriz de alimentação das Usinas de Itabira: CE (Mina Conceição), DEP_IC (Depósito de Itabiritos Compactos), MM (Minas do Meio), CEI (Usina de Conceição I), CEII (Usina de Conceição II) e CA (Usina de Cauê)



Fonte: Próprio Autor, 2015

No presente trabalho foi feita uma nova proposta de configuração da alimentação das usinas para os anos de 2017 a 2021, sendo que todas as usinas a partir de 2017 estarão adaptadas para receber um ROM de itabirito com teor médio de 42% de Fe. Seguindo a adequação das usinas, poderá ser proposta uma nova distribuição de ROM entre minas e pilha para alimentação das usinas.

Para avaliar a viabilidade operacional da nova configuração, foi criado um modelo de programação linear por metas, que otimizará três alternativas de transporte para o novo sistema de alimentação, que variam de acordo com método de transporte e localização das britagens semimóveis (BSM):

- A. Transporte por Caminhões Fora de Estrada;
- B. Transporte por Caminhões Fora de Estrada para BSM Corpo D e BSM Camarinha;
- C. Transporte por Caminhões Fora de Estrada para BSM Camarinha.

É importante mencionar que para todas as alternativas apresentadas, só foi considerado o transporte de Itabiritos. Apresenta-se a seguir informações acerca das alternativas anteriormente apresentadas:

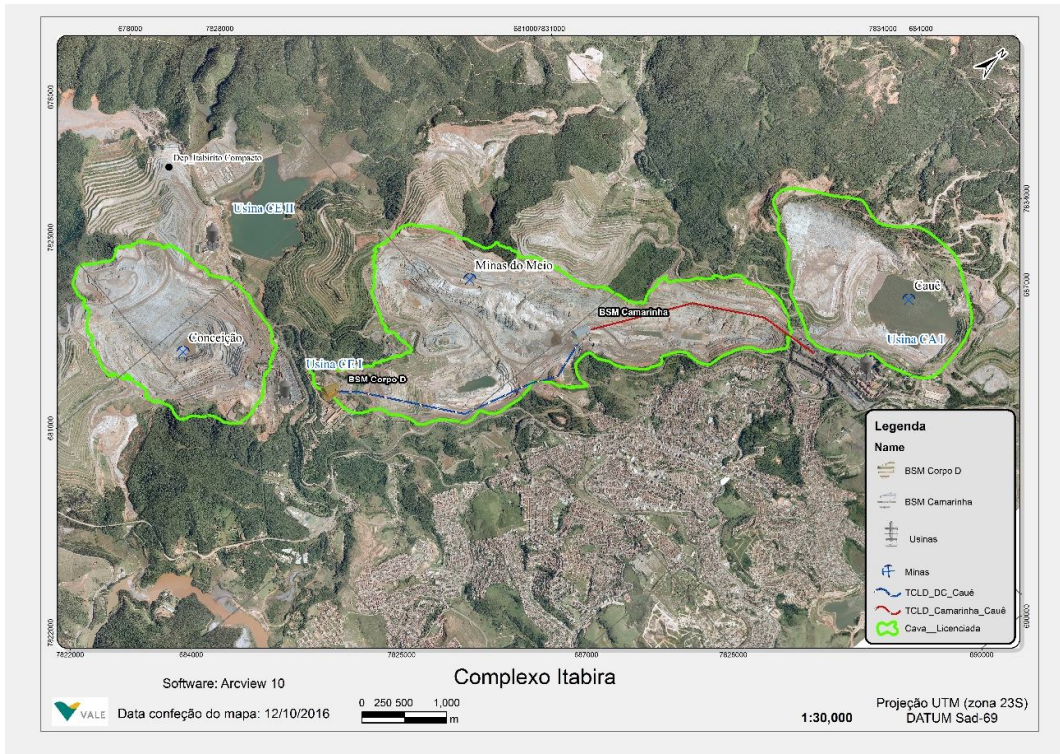
- A. Transporte por Caminhões Fora de Estrada

Esta alternativa representa o transporte feito por caminhões entre as minas e o depósito de itabirito compacto para as atuais britagens das usinas de CE I, CE II e CA.

- B. Transporte por Caminhões Fora de Estrada para BSM Corpo D e BSM Camarinha

Esta alternativa representa o transporte feito por Caminhões entre a Mina de Conceição e o depósito para as atuais britagens das usinas de CE I, CE II e para a BSM Corpo D, e Minas do Meio alimentando a BSM Camarinha, sendo que, a partir das BSMs, serão utilizadas correias transportadoras para alimentar a Usina do CA. As BSMs e os TCLD estão representados na Figura 8.

Figura 8- Localização das BSMs Corpo D e Camarinha e seus respectivos TCLDs

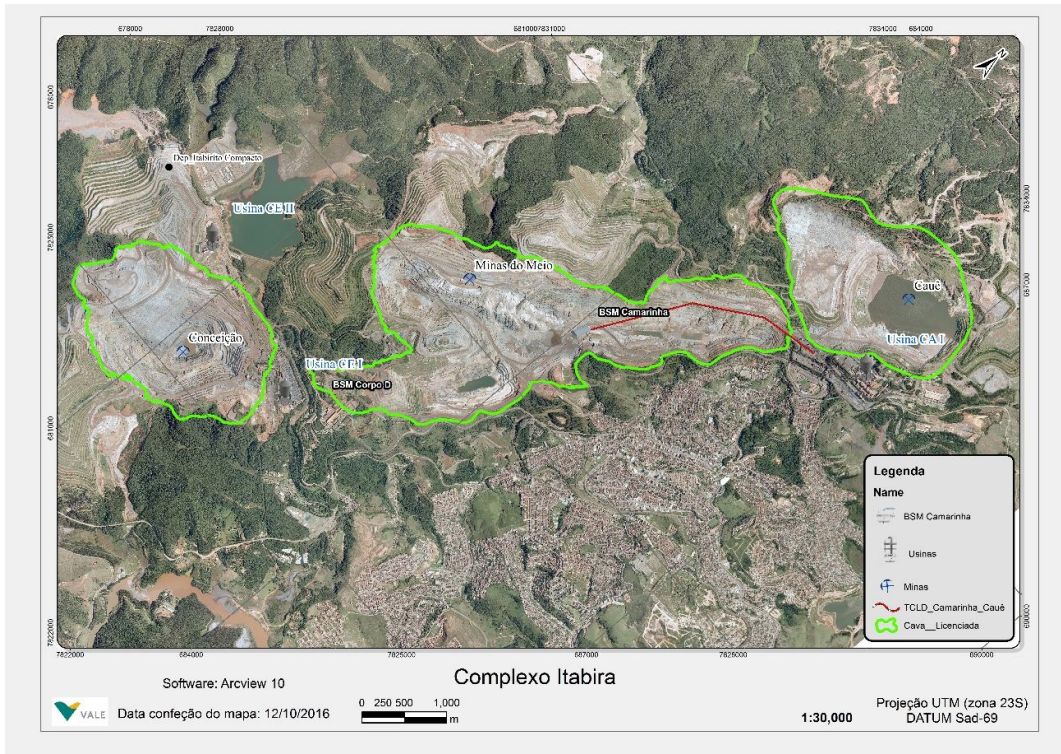


Fonte: VALE S/A, 2015.

C. Transporte por Caminhões Fora de Estrada para BSM Camarinha

Esta alternativa representa o transporte feito por Caminhões entre as minas e o depósito para as atuais britagens das usinas de CE I, CE II e para a BSM Camarinha que, a partir deste ponto, utilizará correias transportadoras para alimentar a Usina do CA. A BSM e o TCLD estão representados na Figura 9.

Figura 9- Localização das BSMs Corpo D e Camarinha e seus respectivos TCLDs



Fonte: VALE S/A, 2015.

Avaliando as seguintes propostas, fica clara a execução de um transporte por caminhões na alternativa A e um transporte misto de caminhões e correias transportadoras para as alternativas B e C.

3.4 MODELAGEM MATEMÁTICA

3.4.1 Introdução

O objetivo do presente trabalho é propor um modelo de programação linear por metas, baseado nos dados de Planejamento de Lavra dos anos de 2017 a 2021, que garanta a menor Relação Estéril Minério (REM), menor Distância Média de Transporte e alimentação da qualidade das Usinas, influenciando diretamente nos custos de transporte do minério.

3.5 MODELO MATEMÁTICO: MINIMIZAR RELAÇÃO ESTÉRIL MINÉRIO, DISTÂNCIA MÉDIA DE TRANSPORTE E DESVIOS DE TEOR DE ALIMENTAÇÃO

3.5.1 Dados de entrada

Iniciando o processo de modelagem matemática, foram determinados os dados de entrada, que estão listados abaixo:

Minas(i) = Conjunto de Minas;

Usinas(j) = Conjunto de Usinas;

Parâmetros(k) = Conjunto de Parâmetros;

Rom_i = Quantidade de minério, em toneladas, disponível na mina i;

Cap_Usinas_j = Quantidade de minério que deve ser ofertada para cada usina j;

Rem_i = Relação Estéril Minério de cada mina i;

disp_j = Disponibilidade da usina j;

dest_{ij} = Se a mina i pode ofertar minério para a usina j;

meta_{jk} = Meta de qualidade a ser fornecida para cada usina j em cada parâmetro k;

w_{mk} = Peso de desvio da meta dos parâmetros k;

teor_{ik} = Qualidade disponível em cada mina i para cada parâmetro k;

limite = Limite de massa em toneladas que pode ser enviada para Usina Cauê proveniente da; Mina de Conceição e Depósito IC simultaneamente.

3.5.2 Variáveis de decisão

A partir dos dados de entrada, as variáveis de decisão foram definidas por:

x_{ij} = Quantidade de minério, em toneladas, a ser transportado da mina i para a usina j.

3.5.3 Função objetivo

Definida a variável de decisão, o passo seguinte da modelagem matemática consiste na definição da função objetivo. Neste trabalho, ela é representada pela Equação 3.1, e tem como meta, minimizar a relação estéril minério, minimizar a distância média de transporte e garantir o teor mínimo da alimentação das usinas, conforme pode ser evidenciado a seguir:

$$\min \sum_{i \in \text{Minas}} \sum_{j \in \text{USinas}} \text{dist}_{ij} x_{ij} + \text{Re } m_{ij} x_{ij} + \sum_{j \in \text{USinas}} \sum_{k \in \text{Parametros}} w m_{kj} d p m_{jk} + w m_{kj} d n m_{jk} \quad 3.1$$

3.5.4 Restrições

Para o estudo de caso tratado neste trabalho, o conjunto de restrições, correspondentes às condições de contorno, é formado por:

a) *Uso de ROM de cada mina ou depósito*

Deve ser usado no máximo o ROM disponível em cada mina ou pilha.

$$\sum_{j \in \text{USinas}} x_{ij} \leq \text{Rom}_i \quad \forall i \in \text{Minas} \quad 3.2$$

b) *Capacidade de cada usina*

A capacidade de cada usina deve ser respeitada.

$$\sum_{i \in \text{Minas}} x_{ij} = \text{cap}_{\text{USinas}_j} \quad \forall j \in \text{USinas} \mid \text{disp}_j = 1 \quad 3.3$$

c) *Disponibilidade das usinas para determinada mina ou depósito*

As Usinas indisponíveis não podem ser usadas.

$$\sum_{i \in Minas} x_{ij} = 0 \quad \forall j \in USinas | disp_j = 0 \quad 3.4$$

d) Existência de transporte da mina ou depósito para determinada usina

Há transporte da mina i para usina j se $dest(i,j)=1$.

$$\sum_{j \in USinas} x_{ij} = 0 \quad \forall i \in Minas | dest_{ij} = 0 \quad 3.5$$

e) Limite de alimentação da usina do Cauê com materiais do Depósito de Itabiritos Compactos e da Mina de Conceição

Massa de Conceição + Depósito de Itabiritos Compactos enviados para Usina CA deve ser menor ou igual ao limite.

$$\sum_{i \in Minas} x(M_CE, U_CA) + x(M_DEP_IC, U_CA) \geq limite \quad 3.6$$

f) Garantia do teor na alimentação das usinas

A meta relativa ao parâmetro de controle deve ser satisfeita, sempre que possível.

$$\sum_{i \in Minas} (teor_{ik} - meta_{jk}) x_{ij} - dpm_{ij} + dnm_{ij} = 0 \quad \forall k \in Parametros, \forall j \in Usinas \quad 3.7$$

g) Garantia de não negatividade e integralidade

Não negatividade e integralidade.

$$x_{ij}, dnm_{ij}, dpm_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in Minas, \forall j \in Usinas \quad 3.8$$

3.6 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

O modelo baseado em programação matemática apresentado neste trabalho foi implementado usando o modelador e otimizador LINGO, versão 10.0, da Lindo Systems

Inc. em interface com o Microsoft Excel, através de planilhas eletrônicas. A implementação do modelo proposto no LINGO é descrita no Anexo I.

4 DADOS DE ENTRADA E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão analisadas as respostas obtidas pelo modelo matemático de otimização, descrito no capítulo anterior, considerando-se diferentes cenários de transportes para ROM de Itabiritos. Os cenários representam a movimentação mínima para garantia da alimentação das Usinas do Complexo Minerador de Itabira para os anos de 2017 a 2021.

Visando a quantificar o ganho da utilização do método de lavra de múltiplas minas, será feito um comparativo entre os indicadores de DMT e REM gerados pelo otimizador com os indicadores do método de lavra convencional apontado pelo Planejamento de Médio Prazo das Minas de Itabira.

Em um segundo momento, todos os ganhos serão revertidos em capital e todos os resultados serão comparados com o método atual de lavra mostrando qual a melhor viabilidade operacional dos sistemas de transporte de ROM.

4.1 DADOS ENTRADA

4.1.1 Necessidade e qualidade do ROM para alimentação das usinas

A partir de 2017 todas as Usinas de Itabira estarão adaptadas para receber itabiritos compactos, sendo assim, a qualidade de alimentação das usinas é única, 42 % de Fe.

As usinas de Conceição (CE I) e de Conceição II (CEII) possuem capacidade de 24Mt/ano de ROM de Itabiritos cada uma, enquanto a do Cauê (CA) possui capacidade de 26Mt/ano, considerando o Complexo de Itabira com uma capacidade de 74Mt/ano.

4.1.2 Disponibilidade e qualidade do ROM das minas e do depósito

As minas e o depósito possuem uma variável disponibilidade de ROM para os anos de 2017 a 2021, sendo esta variação de disponibilidade representada na Tabela 1 abaixo:

Tabela 1 - Disponibilidade de ROM: Mina de Conceição (CE), Minas do Meio (MM) e Depósito de Itabirito Compacto (DEP_IC)

Origem/ Ano	Massa Mt				
	2017	2018	2019	2020	2021
CE	53.90	54.00	54.00	54.00	54.20
MM	35.70	36.00	36.00	36.00	36.00
DEP_IC	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00
Total	103.60	104.00	104.00	104.00	104.20

O DEP_IC está representado com sua capacidade 14 Mt por ano e seu total é de aproximadamente 80 Mt.

As três áreas de retirada do ROM, além de apresentarem quantidades variáveis, apresentam, também, uma qualidade distinta, que é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Qualidade ROM anual: Mina de Conceição (CE), Minas do Meio (MM) e Depósito de Itabirito Compacto (DEP_IC)

Ano	MINAS	Qualidade ROM				
		Fegl %	Sigl %	P %	Algl %	Mngl %
2017	CE	42.32	37.07	0.020	0.92	0.111
	DEP_IC	41.00	38.55	0.015	0.50	0.054
	MM	42.92	36.66	0.018	1.08	0.146
2018	CE	42.02	37.50	0.020	1.02	0.890
	DEP_IC	41.00	38.55	0.015	0.50	0.054
	MM	42.71	36.76	0.018	1.08	0.146
2019	CE	42.32	37.07	0.020	0.92	0.111
	DEP_IC	41.00	38.55	0.015	0.50	0.054
	MM	42.93	36.54	0.016	1.06	0.151
2020	CE	42.48	38.33	0.024	0.92	0.140
	DEP_IC	41.00	38.55	0.015	0.50	0.054
	MM	43.12	35.63	0.015	1.07	0.182
2021	CE	42.49	38.28	0.024	0.92	0.140
	DEP_IC	41.00	38.55	0.015	0.50	0.054
	MM	43.58	34.93	0.015	1.08	0.185

Fegl: ferro global Sigl: sílica global P: fósforo Algl: alumina global Mngl: manganês global

A qualidade do DEP_IC está representada de forma padrão para os 5 anos por ser uma qualidade estimada.

4.1.3 Relação Estéril Minério (REM)

A relação estéril minério de cada mina foi obtida nos dados de Planejamento de Longo prazo, sendo estas representadas ano a ano na Tabela 3.

Tabela 3 - Relação Estéril Minério das Minas do Meio (MM) e Conceição (CE)

Mina/ Ano	2017	2018	2019	2020	2021
CE	0.41	0.39	0.39	0.45	0.45
MM	2.17	2.05	1.89	1.60	1.65

Para o depósito foi considerado a REM nula, pois nele só se encontra minério depositado.

4.1.4 Distância Média de Transporte (DMT)

A distância média de transporte foi obtida nos planos de Longo Prazo, e foi gerada para cada um dos cenários estudados uma tabela de *inputs* de DMT, considerando-se todos os destinos possíveis para o ROM durante os cinco anos estudados.

a) *DMT cenário A. Transporte por Caminhões Fora de Estrada*

A distribuição da DMT de acordo com os trajetos dos caminhões fora de estrada para as atuais britagens estão representadas anualmente na Tabela 4.

Tabela 4 - DMT Caminhões: Mina de Conceição (CE), Minas do Meio (MM) e Depósito de Itabirito Compacto (DEP_IC), Mina de Cauê (CA), Usina de Conceição I (CE1) e Usina de Conceição 2 (CE2)

Origem/Destino	DMT Km				
	2017	2018	2019	2020	2021
CE/ CE1	3.76	3.66	3.47	3.82	4.16
CE/ CE2	2.26	2.32	2.52	2.86	3.22
CE/ CA	13.80	13.70	13.51	13.86	14.20
DEP_IC/ CA	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70
DEP_IC/ CE2	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
DEP_IC/ CE	2.95	2.95	2.95	2.95	2.95
MM/ CA	6.46	5.84	5.48	5.17	4.90

b) DMT cenário B. Transporte por Caminhões Fora de Estrada para BSM Corpo D e BSM Camarinha

A distribuição da DMT de acordo com a proposta de implantação das duas BSMs e seus respectivos TCLDs e os britadores de CEI e CEII estão representadas na Tabela 5 a seguir:

Tabela 5 - DMT BSM CPD e BSM CAM: Mina de Conceição (CE), Minas do Meio (MM) e Depósito de Itabirito Compacto (DEP_IC), Mina de Cauê (CA), Usina de Conceição I (CE1) e Usina de Conceição 2 (CE2)

Origem/Destino	DMT Km				
	2017	2018	2019	2020	2021
CE/ CE1	3.76	3.66	3.47	3.82	4.16
CE/ CE2	2.26	2.32	2.52	2.86	3.22
CE/ BSM CPD	6.50	6.40	6.21	6.56	6.90
DEP_IC/ BSM CPD	3.40	3.40	3.40	3.40	3.40
DEP_IC/ CE2	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
DEP_IC/ CE	2.95	2.95	2.95	2.95	2.95
MM/ BSM CAM	3.46	2.84	2.48	2.17	1.90

c) ***DMT cenário C. Transporte por Caminhões Fora de Estrada para BSM Camarinha.***

A distribuição da DMT de acordo com a proposta de implantação da BSM Camarinha e seu TCLD e os britadores de CEI e CEII estão representados na Tabela 6.

Tabela 6 - DMT BSM CAM: Mina de Conceição (CE), Minas do Meio (MM) e Depósito de Itabirito Compacto (DEP_IC), Mina de Cauê (CA), Usina de Conceição I (CE1) e Usina de Conceição 2 (CE2)

Origem/Destino	DMT Km				
	2017	2018	2019	2020	2021
CE/ CE1	3.76	3.66	3.47	3.82	4.16
CE/ CE2	2.26	2.32	2.52	2.86	3.22
CE/ BSM CAM	10.80	10.70	10.51	10.86	11.20
DEP_IC/ BSM CAM	7.70	7.70	7.70	7.70	7.70
DEP_IC/ CE2	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
DEP_IC/ CE	2.95	2.95	2.95	2.95	2.95
MM/ BSM CAM	3.46	2.84	2.48	2.17	1.90

4.1.5 Restrição de alimentação

Para o estudo de caso do método de múltiplas minas foi considerada apenas uma restrição de combinação entre minas e usinas, sendo assim, está proibida a alimentação

das usinas de CEI e CEII com ROM proveniente das Minas do Meio, esta restrição se deve ao fato de Minas do Meio possui uma REM mais alta em relação a Conceição e um perfil de transporte menos favorável. Isto formatou a matriz de origem alimentação representada pela Tabela 7.

Tabela 7 - Matriz de Alimentação: CE (Mina Conceição), DEP_IC (Depósito de Itabiritos Compactos), MM (Minas do Meio), CEI (Usina de Conceição I), CEII (Usina de Conceição II) e CA (Usina de Cauê)

Mina/Usina	CEI	CEII	CA
CE	1	1	1
DEP_IC	1	1	1
CA	0	0	1

4.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos do modelo de programação por metas proposto no capítulo, serão analisados seguindo essas etapas:

- Primeiramente serão analisados os indicadores operacionais;
- Posteriormente, serão analisados os ganhos de capital relacionados a cada um dos cenários.

Cabe ressaltar que os resultados do modelo matemático estão apresentados no Anexo II.

4.2.1 Resultados dos indicadores operacionais

Para quantificar todos os ganhos, cada cenário será comparado com o cenário original apresentado pelo Planejamento de Longo prazo. Serão analisados, então, distância média de transporte (DMT), relação estéril minério (REM) e o cumprimento da qualidade de no mínimo 42 % de ferro na alimentação.

a) **Resultados cenário A**

O modelo matemático retornou para o cenário A os seguintes resultados para DMT e REM, que são representados junto aos valores do plano original na Tabela 8.

Tabela 8 - Resultados Cenário A: Relação Estéril Minério (REM), Distância Média de Transporte (DMT)

	Ano	2017	2018	2019	2020	2021
Plano Original	REM	1.11	1.05	0.99	0.91	0.93
	DMT Km	4.30	4.40	3.95	4.10	4.21
Cenário A	REM	0.50	0.67	0.44	0.46	0.46
	DMT Km	5.63	4.69	5.58	5.78	6.01

Para o Cenário A foram obtidas as seguintes qualidades anuais para alimentação das Usinas, que estão representadas na Tabela 9.

Tabela 9 - Qualidade Anual Alimentação Cenário A: CEI (Usina de Conceição I), CEII (Usina de Conceição II) e CA (Usina de Cauê)

Ano	USINAS	Qualidade Alimentação Usinas				
		Fegl %	Sigl %	P %	Algl %	Mngl %
2017	CEI	42.27	37.13	0.020	0.91	0.109
	CEII	42.12	37.30	0.020	0.86	0.102
	CA	42.00	37.50	0.018	0.81	0.100
2018	CEI	42.00	37.52	0.020	1.01	0.874
	CEII	42.00	37.52	0.020	1.01	0.874
	CA	42.00	37.50	0.017	0.84	0.108
2019	CEI	42.32	37.07	0.020	0.92	0.111
	CEII	42.05	37.37	0.019	0.84	0.099
	CA	42.00	37.47	0.018	0.81	0.100
2020	CEI	42.48	38.33	0.024	0.92	0.140
	CEII	42.30	38.36	0.023	0.87	0.129
	CA	42.00	37.80	0.018	0.78	0.113
2021	CEI	42.49	38.28	0.024	0.92	0.140
	CEII	42.42	38.29	0.024	0.90	0.136
	CA	42.00	37.67	0.018	0.75	0.108

Fegl: ferro global Sigl: sílica global P: fósforo Algl: alumina global Mngl: manganês global

Observa-se que o Cenário A garante uma entrega dos teores necessários para as usinas e a relação estéril minério apresenta uma redução de aproximadamente 50% enquanto a distância média de transporte apresenta um acréscimo de 32%.

b) Resultados cenário B

O modelo matemático retornou para o cenário B os seguintes resultados para DMT e REM, que são representados junto aos valores do plano original na Tabela 10.

Tabela 10 - Resultados Cenário B: Relação Estéril Minério (REM), Distância Média de Transporte (DMT)

	Ano	2017	2018	2019	2020	2021
Plano Original	REM	1.11	1.05	0.99	0.91	0.93
	DMT Km	4.30	4.40	3.95	4.10	4.21
Cenário B	REM	0.50	0.67	0.44	0.46	0.46
	DMT Km	3.47	3.00	3.36	3.56	3.78

Para o Cenário B foram obtidas as seguintes qualidades anuais para alimentação das Usinas, que estão representadas na Tabela 11.

Tabela 11- Qualidade Anual Alimentação Cenário B: CEI (Usina de Conceição I), CEII (Usina de Conceição II) e CA (Usina de Cauê)

		Qualidade Alimentação Usinas				
Ano	USINAS	Fegl %	Sigl %	P %	Algl %	Mngl %
2017	CEI	42.27	37.13	0.020	0.91	0.109
	CEII	42.12	37.30	0.020	0.86	0.102
	CA	42.00	37.50	0.018	0.81	0.100
2018	CEI	42.00	37.52	0.020	1.01	0.874
	CEII	42.00	37.52	0.020	1.01	0.874
	CA	42.00	37.50	0.017	0.84	0.108
2019	CEI	42.32	37.07	0.020	0.92	0.111
	CEII	42.05	37.37	0.019	0.84	0.099
	CA	42.00	37.47	0.018	0.81	0.100
2020	CEI	42.48	38.33	0.024	0.92	0.140
	CEII	42.30	38.36	0.023	0.87	0.129
	CA	42.00	37.80	0.018	0.78	0.113
2021	CEI	42.49	38.28	0.024	0.92	0.140
	CEII	42.42	38.29	0.024	0.90	0.136
	CA	42.00	37.67	0.018	0.75	0.108

Fegl: ferro global Sigl: sílica global P: fósforo Algl: alumina global Mngl: manganês global

Diante do exposto, observa-se que o Cenário B garante a alimentação das usinas dentro dos teores exigidos e propõe uma grande redução de aproximadamente 50% na relação estéril minério aliada a uma redução da distância média de transporte de 18%.

c) **Resultados cenário C**

O modelo matemático retornou para o cenário C os seguintes resultados para DMT e REM, que são representados junto aos valores do plano original na Tabela 12.

Tabela 12 - Resultados Cenário C: Relação Estéril Minério (REM), Distância Média de Transporte (DMT)

	Ano	2017	2018	2019	2020	2021
Plano Original	REM	1.11	1.05	0.99	0.91	0.93
	DMT Km	4.30	4.40	3.95	4.10	4.21
Cenário C	REM	0.50	0.67	0.44	0.46	0.46
	DMT Km	4.57	3.63	4.52	4.72	4.96

Para o Cenário C foram obtidos os seguintes teores anuais para alimentação das Usinas, que estão representadas na Tabela 13.

Tabela 13 - Qualidade Anual de Alimentação Cenário C: CEI (Usina de Conceição I), CEII (Usina de Conceição II) e CA (Usina de Cauê)

		Qualidade Alimentação Usinas				
Ano	USINAS	Fegl %	Sigl %	P %	Algl %	Mngl %
2017	CEI	42.27	37.13	0.020	0.91	0.109
	CEII	42.12	37.30	0.020	0.86	0.102
	CA	42.00	37.50	0.018	0.81	0.100
2018	CEI	42.00	37.52	0.020	1.01	0.874
	CEII	42.00	37.52	0.020	1.01	0.874
	CA	42.00	37.50	0.017	0.84	0.108
2019	CEI	42.32	37.07	0.020	0.92	0.111
	CEII	42.05	37.37	0.019	0.84	0.099
	CA	42.00	37.47	0.018	0.81	0.100
2020	CEI	42.48	38.33	0.024	0.92	0.140
	CEII	42.30	38.36	0.023	0.87	0.129
	CA	42.00	37.80	0.018	0.78	0.113
2021	CEI	42.49	38.28	0.024	0.92	0.140
	CEII	42.42	38.29	0.024	0.90	0.136
	CA	42.00	37.67	0.018	0.75	0.108

Fegl: ferro global Sigl: sílica global P: fósforo Algl: alumina global Mngl: manganês global

É possível observar que o Cenário C mostra uma queda da relação estéril minério de aproximadamente 50% e um aumento da distância média de transporte de aproximadamente 7%, mas garante a entrega dos teores necessários para alimentação das usinas.

d) Resumo dos resultados operacionais

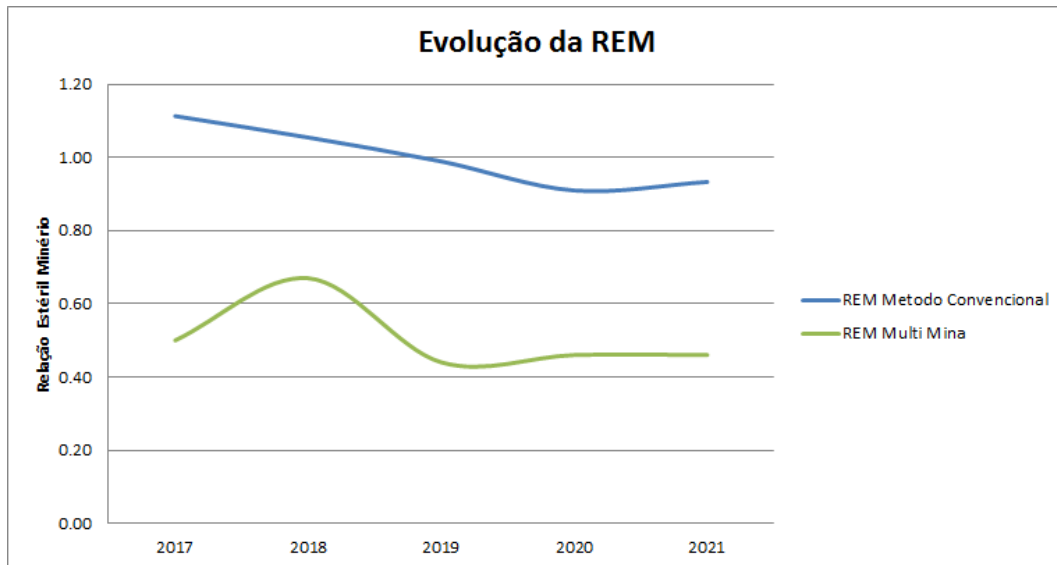
A análise dos resultados da simulação para os três cenários gera uma única distribuição de origem e destino do ROM, sendo esta a distribuição ótima, a distribuição das massas em toneladas, que está exemplificada na Tabela 14.

Tabela 14 - Massas ROM (t) origem e destino: CEI (Usina de Conceição I), CEII (Usina de Conceição II) e CA (Usina de Cauê)

			Usinas			Total ROM
			CEI	CEII	CA	
2017	Minas	Conceição	23,128,483	20,349,816	9,521,701	53,000,000
		Deposito Itabiritos	871,517	3,650,184	9,478,299	14,000,000
		Minas do Meio	-	-	7,000,000	7,000,000
		Total Usinas	24,000,000	24,000,000	26,000,000	74,000,000
2018	Minas	Conceição	23,529,412	23,529,412	-	47,058,824
		Deposito Itabiritos	470,588	470,588	10,795,322	11,736,498
		Minas do Meio	-	-	15,204,678	15,204,678
		Total Usinas	24,000,000	24,000,000	26,000,000	74,000,000
2019	Minas	Conceição	24,000,000	19,097,723	10,902,277	54,000,000
		Deposito Itabiritos	-	4,902,277	9,097,723	14,000,000
		Minas do Meio	-	-	6,000,000	6,000,000
		Total Usinas	24,000,000	24,000,000	26,000,000	74,000,000
2020	Minas	Conceição	24,000,000	21,027,027	8,972,973	54,000,000
		Deposito Itabiritos	-	2,972,973	11,027,027	14,000,000
		Minas do Meio	-	-	6,000,000	6,000,000
		Total Usinas	24,000,000	24,000,000	26,000,000	74,000,000
2021	Minas	Conceição	24,000,000	22,793,289	7,406,711	54,200,000
		Deposito Itabiritos	-	1,206,711	12,793,289	14,000,000
		Minas do Meio	-	-	5,800,000	5,800,000
		Total Usinas	24,000,000	24,000,000	26,000,000	74,000,000

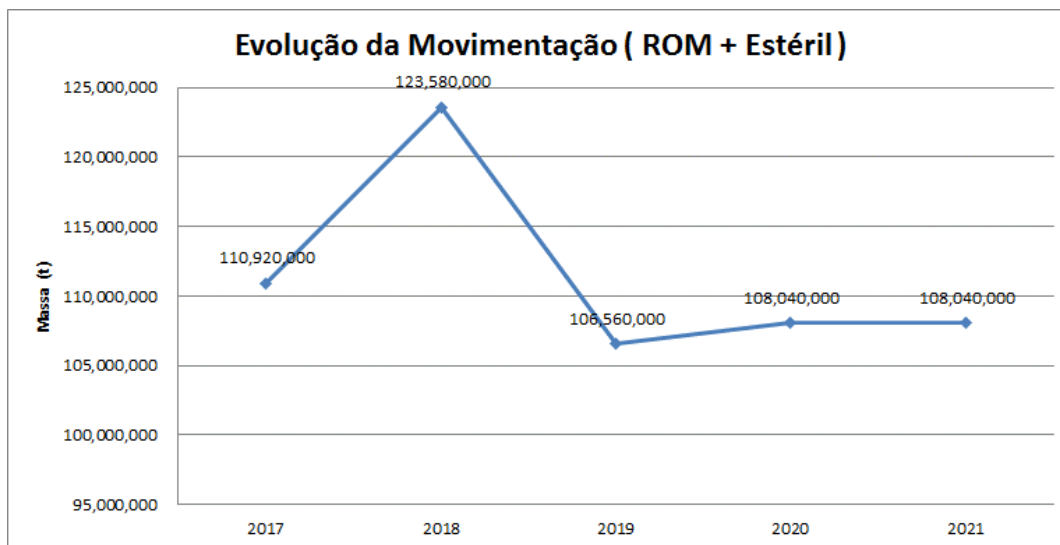
Com uma distribuição única de origem e destino, tem-se uma mesma relação estéril minério para todos os cenários, uma comparação anual entre a REM do método de lavra convencional e o método de múltiplas minas, que está exemplificado na Figura 10.

Figura 10- Gráfico comparativo de evolução da REM



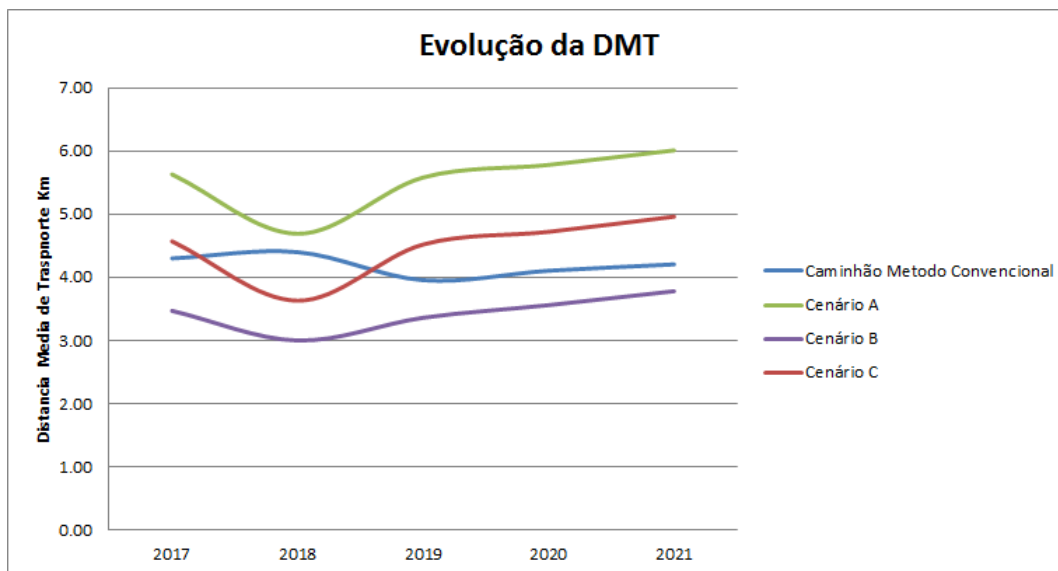
Com a distribuição ROM de cada mina e a REM associada a cada uma, foi determinada a movimentação de estéril e ROM mínima das minas para atender as necessidades das usinas, a evolução anual desta movimentação pode ser vista na Figura 11.

Figura 11- Gráfico da evolução da movimentação (ROM + Estéril)



Garantida a movimentação mínima, outro passo importante é um comparativo anual entre as distancias média de transporte dos cenários propostos e o método de lavra convencional, que é apresentado na Figura 12.

Figura 12- Evolução anual da DMT



Tendo em vista o que foi exposto anteriormente, analisando todos os índices tratados até o presente momento, os cenários apresentam perdas e ganhos entre si. Para melhor comparação, todos esses índices serão transformados em custos, sendo essa transformação mostrada e analisada nos próximos tópicos deste capítulo.

4.2.2 Resultados dos custos operacionais e ganhos de capital

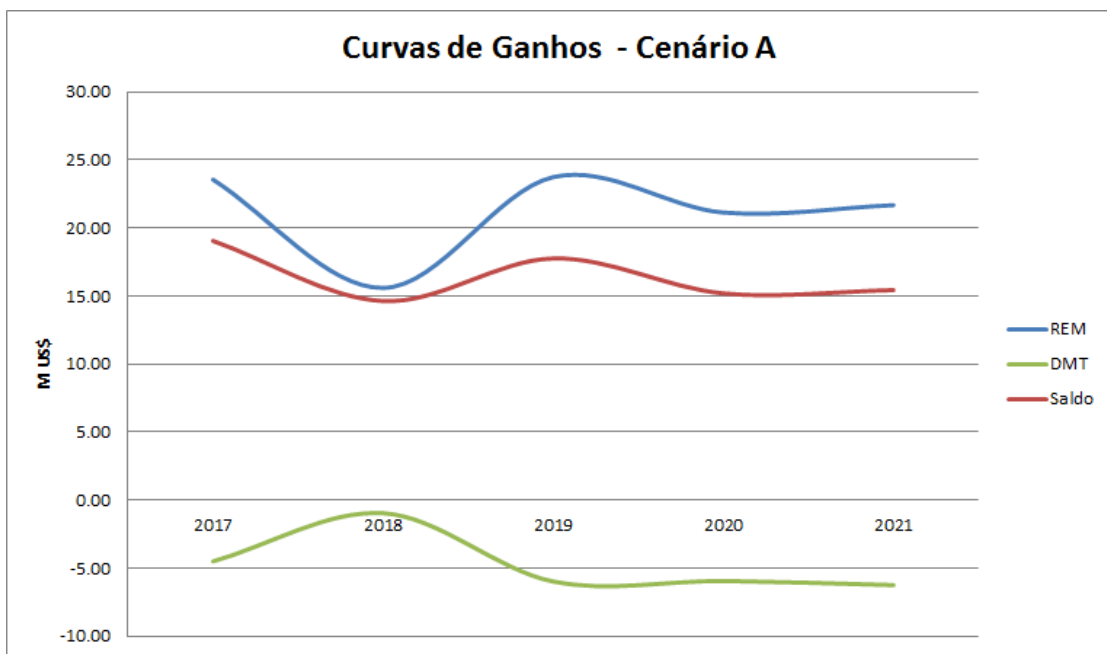
Para uma melhor análise dos indicadores operacionais, todos os índices serão transportados para uma mesma base de comparação, sendo os custos associados a base que melhor correlaciona todos estes índices.

Os custos associados à distância média de transporte e à relação estéril minério acumuladas no ano de 2015 até maio foram obtidos dos controles internos da VALE S/A. Esses valores foram associados ao ganho ou demérito de 1% dos indicadores estudados, sendo assim, todos os parâmetros foram transformados em percentual dos valores de cada indicador informados pelo planejamento de Longo Prazo.

a) Resultados cenário A

Após a quantificação dos ganhos de capital associados a esse cenário, que mostrou uma economia de aproximadamente 82 milhões de dólares para os cinco anos, fica comprovada a viabilidade econômica da otimização dos índices operacionais. Esses valores distribuídos anualmente estão exemplificados na Figura 13 abaixo:

Figura 13- Gráfico de ganhos cenário A



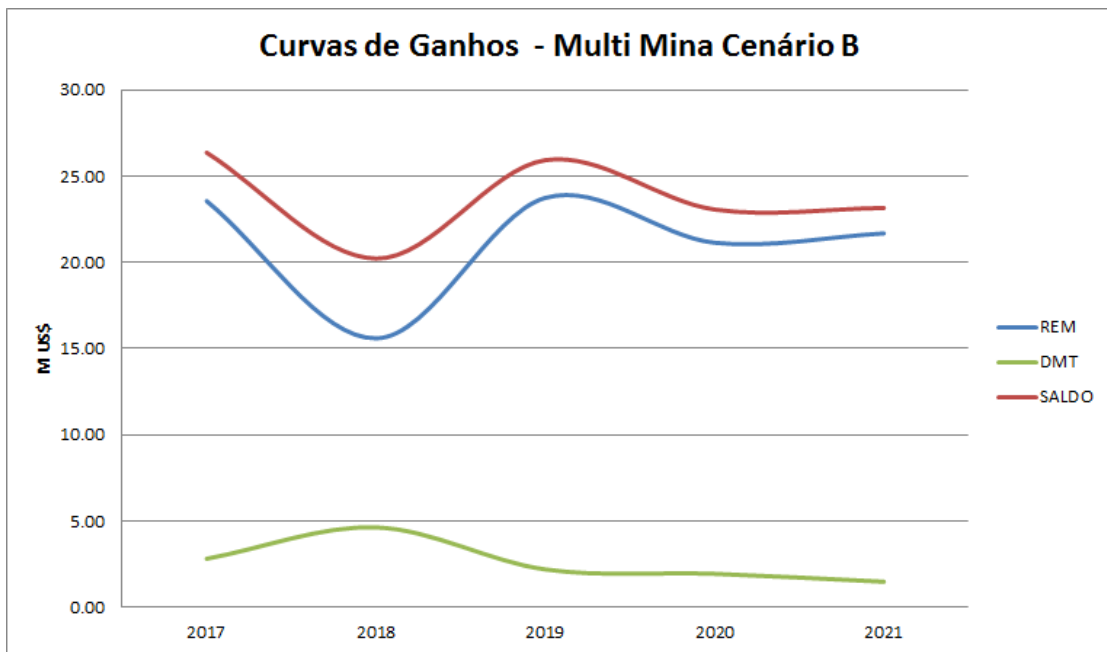
Para confecção do gráfico foi utilizado uma referência aos dados do método convencional de lavra, sendo assim o eixo das abcissas representa o método convencional. Os valores acima deste valor significam ganho ou economia dos custos do novo cenário proposto, enquanto os valores abaixo representam a perda ou acréscimo de gastos em relação ao método convencional.

Pode-se observar que os valores positivos do gráfico representam a economia em relação ao cenário convencional e os negativos representam um acréscimo nos custos do cenário convencional.

b) Resultados cenário B

O cenário B apresenta o maior ganho, ou seja, o cenário garante a maior economia nos custos para os índices operacionais estudados e uma economia de aproximadamente 118 milhões de dólares para o período estudado. A Figura 14 ilustra a evolução dos ganhos dos índices operacionais nesse período.

Figura 14- Gráfico de ganhos cenário B



Para confecção do gráfico foi utilizado uma referência aos dados do método convencional de lavra, sendo assim o eixo das abcissas representa o método convencional. Os valores acima deste valor significam ganho ou economia dos custos do novo cenário proposto, enquanto os valores abaixo representam a perda ou acréscimo de gastos em relação ao método convencional.

Observa-se na figura 14 que os valores positivos do gráfico representam a economia em relação ao cenário convencional e os negativos representam um acréscimo nos custos do cenário convencional.

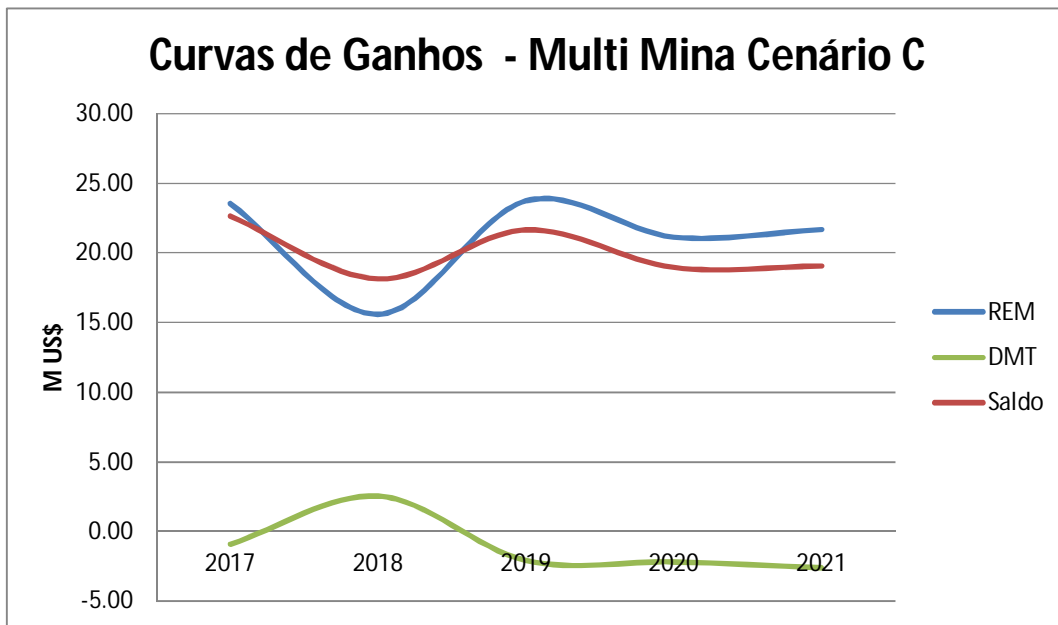
Outro fator importante que deve ser levado em consideração sobre a implantação do TCLD é o de cunho ambiental, a implantação de 7,3 quilômetros de correias

transportadores corresponde a menos 13 caminhões em relação ao transporte de itabiritos do cenário A. A queima de combustível referente a esta frota caminhões segundo os dados do projeto possui uma emissão anual de aproximadamente 34639.00t de gás carbônico, 2.09t de Metano e 14.38t de oxido nitroso.

c) Resultados cenário C

O cenário C apresenta um ganho intermediário entre os cenários A e B, gerando uma economia de aproximadamente 100 milhões de dólares. A Figura 15 mostra a evolução anual da economia dos índices operacionais.

Figura 15- Gráfico de ganhos cenário B



Para confecção do gráfico foi utilizado uma referência aos dados do método convencional de lavra, sendo assim o eixo das abcissas representa o método convencional. Os valores acima deste valor significam ganho ou economia dos custos do novo cenário proposto, enquanto os valores abaixo representam a perda ou acréscimo de gastos em relação ao método convencional.

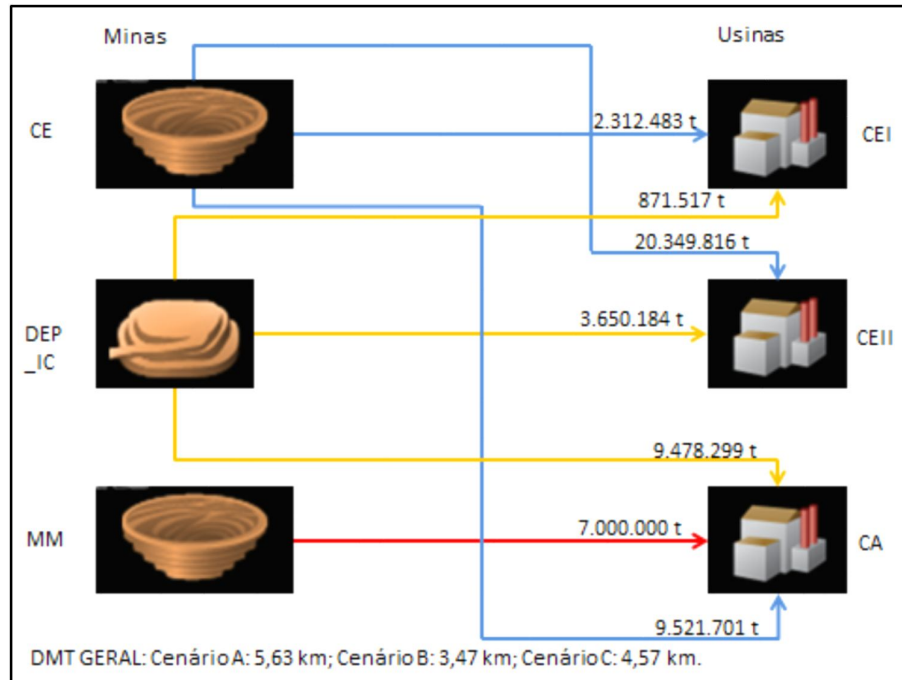
A Figura 15 mostra que os valores positivos do gráfico representam a economia em relação ao cenário convencional e os negativos representam um acréscimo nos custos do cenário convencional.

Outro fator importante que deve ser levado em consideração sobre a implantação do TCLD é o de cunho ambiental, a implantação de 3 quilômetros de correias transportadoras corresponde a menos 9 caminhões em relação ao transporte de itabiritos do cenário A. A queima de combustível referente a esta frota caminhões segundo os dados do projeto possui uma emissão anual de aproximadamente 14043.00t de gás carbônico, 0.85t de Metano e 5.83t de oxido nitroso.

d) *Resumo dos ganhos de capital e custos operacionais*

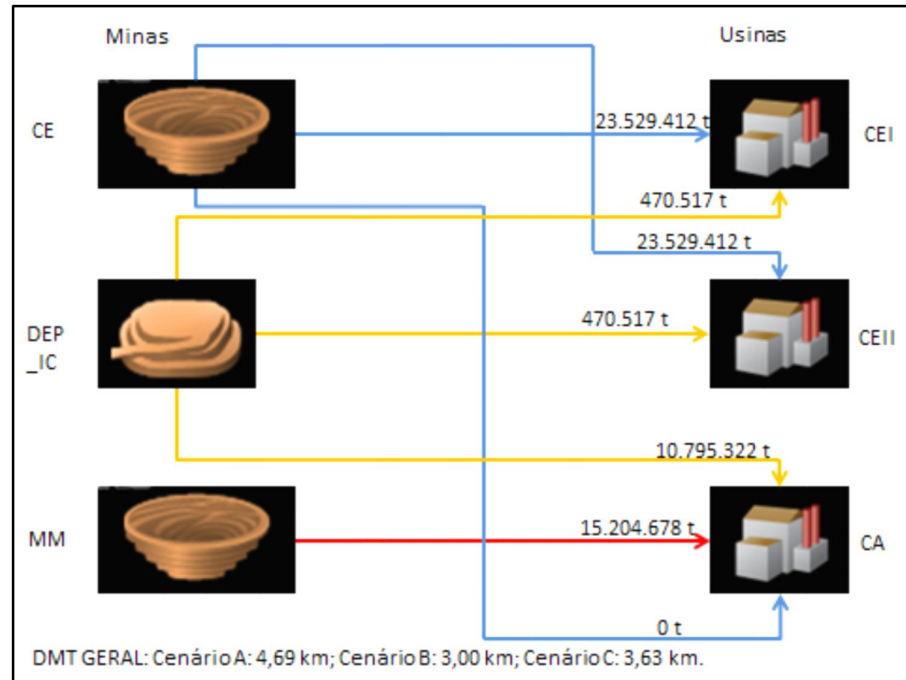
Diante do que foi evidenciado anteriormente, analisando somente índices operacionais, perdas e ganhos foram observados entre os cenários. E ao transformar esses ganhos em custos, fica evidenciado que todos os cenários apresentam uma solução economicamente viável, sendo que o cenário B apresenta maior economia nos custos em relação ao método convencional de lavra, garantindo assim que o método de lavra de múltiplas minas é uma solução para o decréscimo dos custos e validando a nova matriz de alimentação para o complexo minerador de Itabira e a dmt geral, representando o ano de 2017 na Figura 16, o ano de 2018 na Figura 17, o ano de 2019 na Figura 18, o ano de 2020 na Figura 19 e o ano de 2021 a Figura20.

Figura 16 - Proposta de nova matriz de alimentação das Usinas de Itabira e dmt geral para o ano de 2017:
 CE (Mina Conceição), DEP_IC (Depósito de Itabiritos Compactos), MM (Minas do Meio), CEI (Usina de Conceição I), CEII (Usina de Conceição II) e CA (Usina de Cauê)



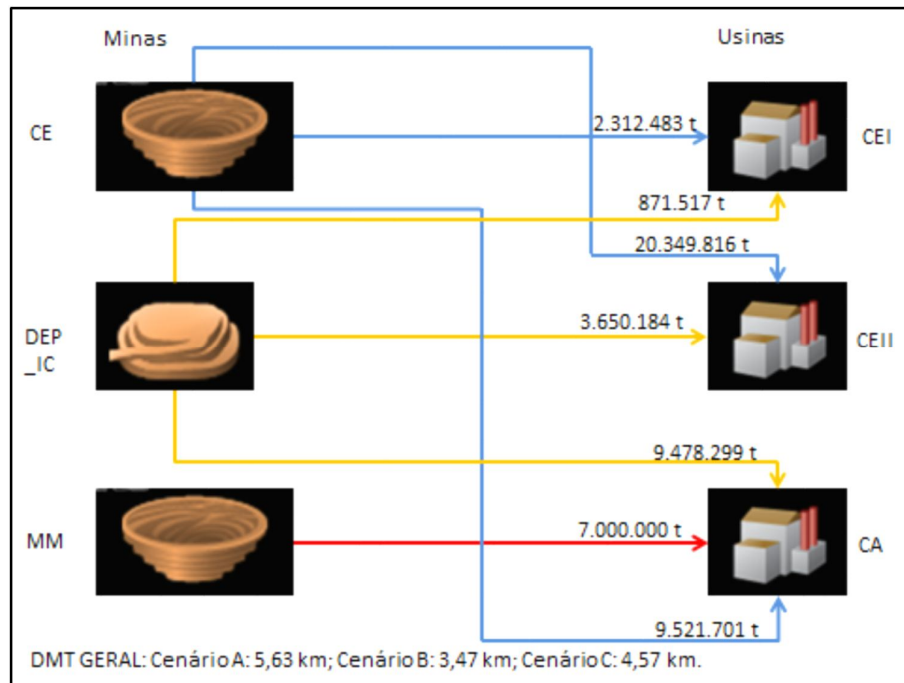
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 17 - Proposta de nova matriz de alimentação das Usinas de Itabira e dmt geral para o ano de 2018:
 CE (Mina Conceição), DEP_IC (Depósito de Itabiritos Compactos), MM (Minas do Meio), CEI (Usina de Conceição I), CEII (Usina de Conceição II) e CA (Usina de Cauê)



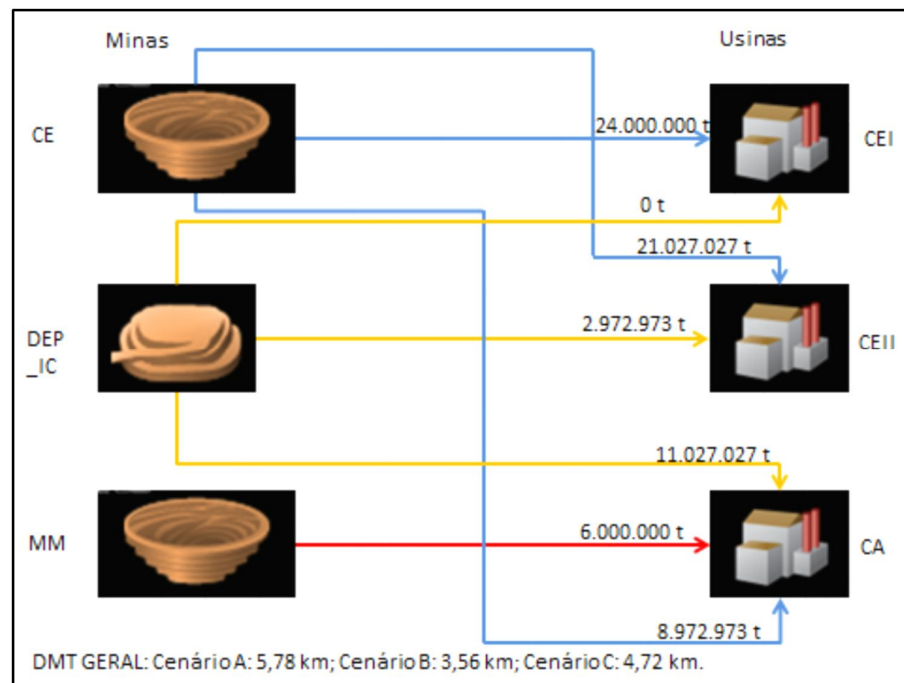
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 18- Proposta de nova matriz de alimentação das Usinas de Itabira e dmt geral para o ano de 2019: CE (Mina Conceição), DEP_IC (Depósito de Itabiritos Compactos), MM (Minas do Meio), CEI (Usina de Conceição I), CEII (Usina de Conceição II) e CA (Usina de Cauê)



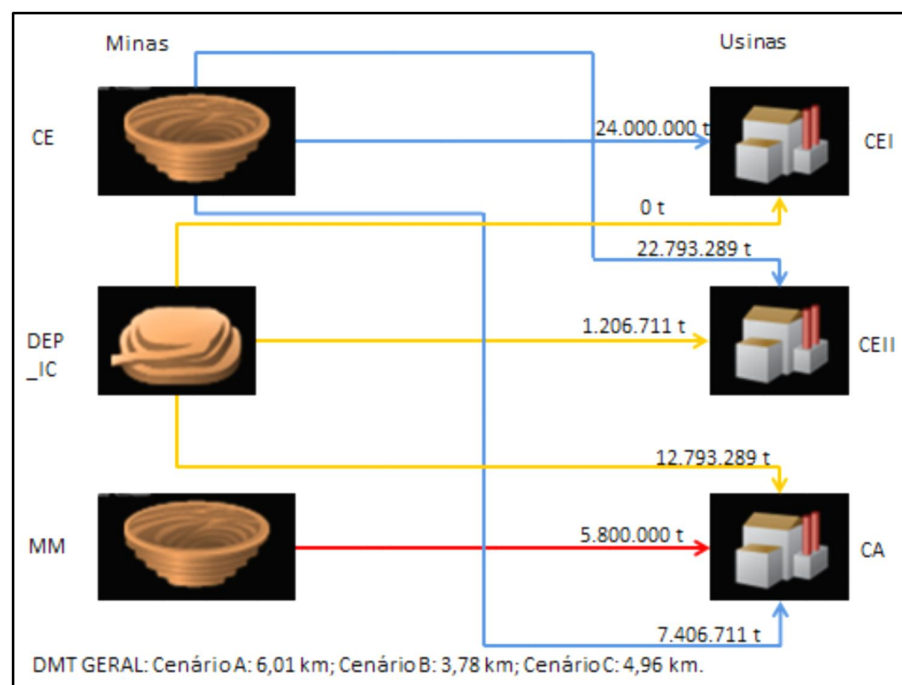
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 19- Proposta de nova matriz de alimentação das Usinas de Itabira e DMT geral para o ano de 2020: CE (Mina Conceição), DEP_IC (Depósito de Itabiritos Compactos), MM (Minas do Meio), CEI (Usina de Conceição I), CEII (Usina de Conceição II) e CA (Usina de Cauê)



Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 20 - Proposta de nova matriz de alimentação das Usinas de Itabira e dmt geral para o ano de 2021: CE (Mina Conceição), DEP_IC (Depósito de Itabiritos Compactos), MM (Minas do Meio), CEI (Usina de Conceição I), CEII (Usina de Conceição II) e CA (Usina de Cauê)



Fonte: Dados da pesquisa.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como finalidade utilizar da PO para analisar os ganhos da implantação de um projeto de lavra multimina e a implementação de transportadores de correias no Complexo Minerador de Itabira. Foi possível desenvolver um modelo matemático que otimiza as variáveis operacionais e que auxilia na análise de viabilidade de mudanças nos atuais meios de lavra e alimentação das usinas.

A partir da metodologia adotada, foi possível alcançar os objetivos específicos deste trabalho, quais sejam: i) criar o modelo matemático que represente a lavra e a alimentação do beneficiamento; ii) otimizar os cenários de alimentação do

beneficiamento; iii) definir alimentação das usinas com garantia de qualidade do ROM e iv) analisar a viabilidade do projeto multimina.

O modelo matemático foi criado com base na PO por metas, tendo como objetivo principal a otimização da relação estéril minério e da distância média de transporte, garantindo a alimentação e a qualidade do ROM nas usinas.

Com os resultados fornecidos pelo otimizador, foi alcançado uma redução de 50% da REM para todos os cenários, um acréscimo de 32% na DMT do Cenário A, uma redução de 18% na DMT do Cenário B e um acréscimo de 7% na DMT do Cenário C. Transformando esses índices em ganhos de capitais, foram obtidas as seguintes economias: Cenário A apresentou uma economia de aproximadamente US\$82 milhões, o Cenário B apresentou uma economia de aproximadamente US\$100 milhões enquanto o Cenário C apresentou uma economia de aproximadamente US\$188 milhões. Com esses valores foi possível validar a viabilidade do método multimina com ou sem a implantação dos transportadores de correias, mas as maiores economias foram obtidas considerando a sua implantação.

Sendo assim, um novo esboço de lavra e alimentação do beneficiamento foi validado, o que está representado pelas figuras de Figura 16 a Figura 20.

5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante do exposto, o presente trabalho apresenta as seguintes recomendações:

- Substituir as usinas por pilhas de estéril e utilizar o simulador para otimizar a distância média de transporte do estéril;
- Limitar os teores de MgO associados ao ROM, para estudos de alimentação das usinas de beneficiamento;
- Expansão do otimizador para outras minas da Empresa;
- Uso do simulador em conjunto com um modelo econômico de blocos.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F. F. M. O Cráton de São Francisco. In: **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, 1977. 7(4): 349-364.

CARVALHO JUNIOR, J.A. **Otimização E Análise De Riscos Aplicados Ao Planejamento Mineiro**. 2005. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas). PPGEM/DEMIN, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

CARVALHO JUNIOR, J.A.; KOPPE, J.C., COSTA, J.F.C.L. **A case study application of linear programming and simulation to mine planning**. The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy 112, pp 477-484, Johannesburg, 2012

CASTEEL, K. **New Focus on In-Pit Crushing Systems**. Engineering & Mining Journal. Jacksonville, v 5, p.46-52, June 2008.

DANTZIG, G. B. **Linear Programming and Extensions**, Princeton University Press, USA, 1963.

DORR, J. V. **Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil**. USGS/DNPM, 1969. Professional Paper 641-A. N. II. 110p.

DORR, J.V.; BARBOSA, A.L.M. **Geology and ore deposits of the Itabira District, Minas Gerais, Brazil**. Washington: USGS, 1963. Professional Paper 341C. 2 nd. 110 p.

HARTMAN, H.L. **SME Mining Engineering Handbook**. Littleton: SME, 1992.

HERZ, N. **Gneissic and igneous rocks of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil**. USGS/DNPM, 1970. Professional Paper, 641-B. 57p.

HILLIER, F.S.; LIEBERMAN, G.J. **Introdução à Pesquisa Operacional**. 9 ed. Porto Alegre: Mc Graw Hill, 2013. 1005p. ISBN:0073376299/9780073376299.

HUSTRULID, W.; KUCHTA, M.; MARTIN, R. **Open Pit Mine Planning & Design**, 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2013. 1004p. ISBN:978-1-4665-7512-7.

LADEIRA, E. A. **Metallogenesis of gold at the Morro Velho mine and in the Nova Lima district, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais**. University of Western Ontario, Canadá, Ontario, PhD. Thesis, 272p. 1980.

LOPES, J. R. **Viabilização técnica e econômica da lavra contínua de minério de ferro com o uso de sistema de britagem móvel “in pit” auto propelido**. 2010. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas). PPGEM/DEMIN, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

MARTINS, A.G. **Simulação Das Operações De Lavra Da Mina De Brucutu Utilizando Um Modelo De Programação Linear Para Alocar Os Equipamentos De**

Carregamento. 2005. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas). PPGEM/DEMIN, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.

MORAES, E. F. **Um modelo de programação matemática para otimizar a composição de lotes de minério de ferro da mina Cauê da CVRD.** Dissertação de mestrado, PPGEM/DEMIN, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2005.

NEWMAN, A.M.; RUBIO E.; CARO R.; WEINTRAUB A.; EUREK K; **A Review of Operations Research in Mine Planning**, Interfaces 40(3), pp. 222–245, Catonsville. 2010

RAO, S.S. **Engineering Optimization Theory and Practice.** 4th. ed. Hoboken: JOHN WILEY & SONS INC, 2009.813p.ISBN:978-0-470-18352-6.

RENGER F. E.; NOCE C. M.; ROMANO A. W.; MACHADO, N. Evolução sedimentar do Supergrupo Minas: 500 Ma de registro geológico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. In: **Geonomos**, 2(1): 1-11. 1994.

RIBEIRO, B.G.C. **Estudo de viabilidade econômica para a implantação de correias transportadoras de ROM de minério de ferro. Estudo de caso da mina Fábrica em Congonhas, estado de Minas Gerais.** 2013. 69 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas). PPGEM/DEMIN, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.

SCHORSCHER, H. D. Komatiitos na estrutura greenstone belt da Série Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. Congresso Brasileiro De Geologia, 30. Recife, 1978. In: **Anais do Congresso Brasileiro de Geologia.** Recife, SBG. 1, p.292-293.

VALE. **Vale:** nossa história. Rio de Janeiro: Verso Brasil, 2012. 420p.

_____. Índices Minério de Ferro. Disponível em: <http://www.vale.com/PT/business/mining/iron-ore-pellets/Paginas/Iron-Ore-Indices.aspx>. Acesso em: 24 set 2015.

ANEXO A - MODELO LINGO

A seguir, tem-se o modelo matemático apresentado na seção 3.4 (Modelagem matemática), implementado no software Lingo:

```

title: Otimizar Relacao Esteril Minerio, DMT e desvios de
qualidades;

sets:
  Minas / @ole('REM_qual.xlsx','Minas') /: Rom,
  Rem;
  Usinas / @ole('REM_qual.xlsx','Usinas') /:
  Cap_usinas, disp;
  Parametros / @ole('REM_qual.xlsx','Parametros')
  /:wm;

  Matriz_MU(Minas, Usinas): x,dist,dest;
  Matriz_UP(Usinas,Parametros): meta, dpm, dnm;
  Matriz_MP(Minas,Parametros): teor;
endsets
data:
  Rom = @ole('REM_qual.xlsx','Rom');
  Cap_Usinas = @ole('REM_qual.xlsx','Cap_usinas');
  dist = @ole('REM_qual.xlsx','dist');
  Rem = @ole('REM_qual.xlsx','Rem');
  disp = @ole('REM_qual.xlsx','disp');
  dest = @ole('REM_qual.xlsx','dest');
  meta = @ole('REM_qual.xlsx','meta');
  wm = @ole('REM_qual.xlsx','wm');
  teor = @ole('REM_qual.xlsx','teor');
  limite = @ole('REM_qual.xlsx','limite');
enddata
!Função objetivo minimiza REM, distância de
transporte e desvios de qualidade;
[fo] min = @sum(Minas(i):
              @sum(Usinas(j): Rem(i)*x(i,j) +
dist(i,j)*x(i,j)))+
              @sum(Usinas(j):
                  @sum(Parametros(k):
wm(k)*dpm(j,k) + wm(k)*dnm(j,k)));

```

```

! Deve ser usado no máximo o ROM disponível em
cada mina;
@for (Minas(i):
    @sum(Usinas(j): x(i,j)) <= Rom(i));
! A capacidade de cada usina deve ser respeitada;
@for (Usinas(j) | disp(j) #EQ# 1:
    @sum(Minas(i): x(i,j)) = Cap_usinas);
! As Usinas em que disp = 0 não podem ser usadas;
@for(Usinas(j) | disp(j) #EQ# 0:
    @sum(Minas(i):x(i,j))=0);
! Há transporte da mina i para usina j se
dest(i,j)=1;
@for(Minas(i):
    @sum(usinas(j)| dest(i,j) #EQ# 0: x(i,j))=0);
! Massa de Conceição + Depósito IC enviada para
Usina CA deve ser menor ou igual ao limite;
    @sum(Minas(i):
x(@index(M_CE),@index(U_CA))+x(@index(M_DEP_IC),@i
ndex(U_CA)))>= limite;
! A meta relativa ao parâmetro de controle deve
ser satisfeita,
    sempre que possível;
@for(Usinas(j):
    @for(Parametros(k):
        @sum(minas(i): (teor(i,k)-meta(j,k))*x(i,j))
+ dnm(j,k) - dpm(j,k) = 0));
! Não negatividade e integralidade;
@for (Minas(i):
    @sum(Usinas(j): x(i,j)) >= 0);
! Imprimir valores no Excel;
data:
    @ole('REM_qual.xlsx','x','dnm','dpm') =
x,dnm,dpm;
enddata

```

ANEXO B – RESULTADOS DO SIMULADOR

Apresentam-se, abaixo, os resultados oriundos do otimizador:

1. Cenário A: Caminhões

		Caminhões				
		Usinas			ROM Mina	
		Conceição I	Conceição II	Cauê		
2017	Minas	Conceição	23.128.483	20.349.816	9.521.701	53.000.000
		Deposito Itabiritos	871.517	3.650.184	9.478.299	14.000.000
		Minas do Meio	-	-	7.000.000	7.000.000
		Total Usinas	24.000.000	24.000.000	26.000.000	
		Qualidade Usinas				
USINAS	Fegl	Sigl	P	Algl	Mngl	
Conceição I	42,27	37,13	0,020	0,91	0,109	
Conceição II	42,12	37,30	0,020	0,86	0,102	
Cauê	42,00	37,50	0,018	0,81	0,100	
	REM	0,50				
	DMT	5,63				
	Movimentação Mínima	110.920.000				

		Caminhões				
		Usinas			ROM Mina	
		Conceição I	Conceição II	Cauê		
2018	Minas	Conceição	23.529.412	23.529.412	-	47.058.824
		Deposito Itabiritos	470.588	470.588	10.795.322	11.736.498
		Minas do Meio	-	-	15.204.678	15.204.678
		Total Usinas	24.000.000	24.000.000	26.000.000	
		Qualidade Usinas				
USINAS	Fegl	Sigl	P	Algl	Mngl	
Conceição I	42,00	37,52	0,020	1,01	0,874	
Conceição II	42,00	37,52	0,020	1,01	0,874	
Cauê	42,00	37,50	0,017	0,84	0,108	
	REM	0,67				
	DMT	4,69				
	Movimentação Mínima	123.580.000				

		Caminhões			
		Usinas			ROM Mina
		Conceição I	Conceição II	Cauê	
Minas	Conceição	24.000.000	19.097.723	10.902.277	54.000.000
	Deposito Itabiritos	-	4.902.277	9.097.723	14.000.000
	Minas do Meio	-	-	6.000.000	6.000.000
	Total Usinas	24.000.000	24.000.000	26.000.000	

Qualidade Usinas					
USINAS	Fegl	Sigl	P	Algl	Mngl
Conceição I	42,32	37,07	0,020	0,92	0,111
Conceição II	42,05	37,37	0,019	0,84	0,099
Cauê	42,00	37,47	0,018	0,81	0,100

REM	0,44
DMT	5,58

Movimentação Mínima	106.560.000
---------------------	-------------

		Caminhões			
		Usinas			ROM Mina
		Conceição I	Conceição II	Cauê	
Minas	Conceição	24.000.000	21.027.027	8.972.973	54.000.000
	Deposito Itabiritos	-	2.972.973	11.027.027	14.000.000
	Minas do Meio	-	-	6.000.000	6.000.000
	Total Usinas	24.000.000	24.000.000	26.000.000	

Qualidade Usinas					
USINAS	Fegl	Sigl	P	Algl	Mngl
Conceição I	42,48	38,33	0,024	0,92	0,140
Conceição II	42,30	38,36	0,023	0,87	0,129
Cauê	42,00	37,80	0,018	0,78	0,113

REM	0,46
DMT	5,78

Movimentação Mínima	108.040.000
---------------------	-------------

		Caminhões			
		Usinas			ROM Mina
		Conceição I	Conceição II	Cauê	
Minas	Conceição	24.000.000	22.793.289	7.406.711	54.200.000
	Deposito Itabiritos	-	1.206.711	12.793.289	14.000.000
	Minas do Meio	-	-	5.800.000	5.800.000
	Total Usinas	24.000.000	24.000.000	26.000.000	

Qualidade Usinas					
USINAS	Fegl	Sigl	P	Algl	Mngl
Conceição I	42,49	38,28	0,024	0,92	0,140
Conceição II	42,42	38,29	0,024	0,90	0,136
Cauê	42,00	37,67	0,018	0,75	0,108

REM	0,46
DMT	5,63

Movimentação Mínima	108.040.000
---------------------	-------------

2. Cenário B: Transporte por caminhões fora de estrada para BSM Corpo D e BSM Camarinha

		Caminhões BSM Corpo D e BSM Camarinha				ROM Mina
		Usinas				
		Conceição I	Conceição II	Cauê		
2017	Minas	Conceição	23.128.483	20.349.816	9.521.701	53.000.000
		Deposito Itabiritos	871.517	3.650.184	9.478.299	14.000.000
		Minas do Meio	-	-	7.000.000	7.000.000
		Total Usinas	24.000.000	24.000.000	26.000.000	
Qualidade Usinas						
USINAS	Fegl	Sigl	P	Algl	Mngl	
Conceição I	42,27	37,13	0,020	0,91	0,109	
Conceição II	42,12	37,30	0,020	0,86	0,102	
Cauê	42,00	37,50	0,018	0,81	0,100	
	REM	0,50				
	DMT	3,47				
	Movimentação Mínima	110.920.000				

		Caminhões BSM Corpo D e BSM Camarinha				ROM Mina
		Usinas				
		Conceição I	Conceição II	Cauê		
2018	Minas	Conceição	23.529.412	23.529.412	-	47.058.824
		Deposito Itabiritos	470.588	470.588	10.795.322	11.736.498
		Minas do Meio	-	-	15.204.678	15.204.678
		Total Usinas	24.000.000	24.000.000	26.000.000	
Qualidade Usinas						
USINAS	Fegl	Sigl	P	Algl	Mngl	
Conceição I	42,00	37,52	0,020	1,01	0,874	
Conceição II	42,00	37,52	0,020	1,01	0,874	
Cauê	42,00	37,50	0,017	0,84	0,108	
	REM	0,67				
	DMT	3,00				
	Movimentação Mínima	123.580.000				

Caminhões BSM Corpo D e BSM Camarinha					
		Usinas			ROM Mina
		Conceição I	Conceição II	Cauê	
Minas	Conceição	24.000.000	19.097.723	10.902.277	54.000.000
	Deposito Itabiritos	-	4.902.277	9.097.723	14.000.000
	Minas do Meio	-	-	6.000.000	6.000.000
	Total Usinas	24.000.000	24.000.000	26.000.000	

Qualidade Usinas					
USINAS	Fegl	Sigl	P	Algl	Mngl
Conceição I	42,32	37,07	0,020	0,92	0,111
Conceição II	42,05	37,37	0,019	0,84	0,099
Cauê	42,00	37,47	0,018	0,81	0,100

REM	0,44
DMT	3,36
Movimentação Mínima	106.560.000

Caminhões BSM Corpo D e BSM Camarinha					
		Usinas			ROM Mina
		Conceição I	Conceição II	Cauê	
Minas	Conceição	24.000.000	21.027.027	8.972.973	54.000.000
	Deposito Itabiritos	-	2.972.973	11.027.027	14.000.000
	Minas do Meio	-	-	6.000.000	6.000.000
	Total Usinas	24.000.000	24.000.000	26.000.000	

Qualidade Usinas					
USINAS	Fegl	Sigl	P	Algl	Mngl
Conceição I	42,48	38,33	0,024	0,92	0,140
Conceição II	42,30	38,36	0,023	0,87	0,129
Cauê	42,00	37,80	0,018	0,78	0,113

REM	0,46
DMT	3,56
Movimentação Mínima	108.040.000

Caminhões BSM Corpo D e BSM Camarinha					
		Usinas			ROM Mina
		Conceição I	Conceição II	Cauê	
Minas	Conceição	24.000.000	22.793.289	7.406.711	54.200.000
	Deposito Itabiritos	-	1.206.711	12.793.289	14.000.000
	Minas do Meio	-	-	5.800.000	5.800.000
	Total Usinas	24.000.000	24.000.000	26.000.000	

Qualidade Usinas					
USINAS	Fegl	Sigl	P	Algl	Mngl
Conceição I	42,49	38,28	0,024	0,92	0,140
Conceição II	42,42	38,29	0,024	0,90	0,136
Cauê	42,00	37,67	0,018	0,75	0,108

REM	0,46
DMT	3,78
Movimentação Mínima	108.040.000

3. Cenário C: Transporte por caminhões fora de estrada para BSM Camarinha:

		Caminhões BSM Camarinha				
		Usinas			ROM Mina	
		Conceição I	Conceição II	Cauê		
2017	Minas	Conceição	23.128.483	20.349.816	9.521.701	53.000.000
		Deposito Itabiritos	871.517	3.650.184	9.478.299	14.000.000
		Minas do Meio	-	-	7.000.000	7.000.000
		Total Usinas	24.000.000	24.000.000	26.000.000	
Qualidade Usinas						
	USINAS	Fegl	Sigl	P	Algl	Mngl
	Conceição I	42,27	37,13	0,020	0,91	0,109
	Conceição II	42,12	37,30	0,020	0,86	0,102
	Cauê	42,00	37,50	0,018	0,81	0,100
	REM	0,50				
	DMT	4,57				
	Movimentação Mínima	110.920.000				

		Caminhões BSM Camarinha				
		Usinas			ROM Mina	
		Conceição I	Conceição II	Cauê		
2018	Minas	Conceição	23.529.412	23.529.412	-	47.058.824
		Deposito Itabiritos	470.588	470.588	10.795.322	11.736.498
		Minas do Meio	-	-	15.204.678	15.204.678
		Total Usinas	24.000.000	24.000.000	26.000.000	
Qualidade Usinas						
	USINAS	Fegl	Sigl	P	Algl	Mngl
	Conceição I	42,00	37,52	0,020	1,01	0,874
	Conceição II	42,00	37,52	0,020	1,01	0,874
	Cauê	42,00	37,50	0,017	0,84	0,108
	REM	0,67				
	DMT	3,63				
	Movimentação Mínima	123.580.000				

		Caminhões BSM Camarinha			
		Usinas			ROM Mina
		Conceição I	Conceição II	Cauê	
Minas	Conceição	24.000.000	19.097.723	10.902.277	54.000.000
	Deposito Itabiritos	-	4.902.277	9.097.723	14.000.000
	Minas do Meio	-	-	6.000.000	6.000.000
	Total Usinas	24.000.000	24.000.000	26.000.000	

Qualidade Usinas					
USINAS	Fegl	Sigl	P	Algl	Mngl
Conceição I	42,32	37,07	0,020	0,92	0,111
Conceição II	42,05	37,37	0,019	0,84	0,099
Cauê	42,00	37,47	0,018	0,81	0,100

REM	0,50
DMT	4,52

Movimentação Mínima	110.920.000
---------------------	-------------

		Caminhões BSM Camarinha			
		Usinas			ROM Mina
		Conceição I	Conceição II	Cauê	
Minas	Conceição	24.000.000	21.027.027	8.972.973	54.000.000
	Deposito Itabiritos	-	2.972.973	11.027.027	14.000.000
	Minas do Meio	-	-	6.000.000	6.000.000
	Total Usinas	24.000.000	24.000.000	26.000.000	

Qualidade Usinas					
USINAS	Fegl	Sigl	P	Algl	Mngl
Conceição I	42,48	38,33	0,024	0,92	0,140
Conceição II	42,30	38,36	0,023	0,87	0,129
Cauê	42,00	37,80	0,018	0,78	0,113

REM	0,46
DMT	4,72

Movimentação Mínima	108.040.000
---------------------	-------------

		Caminhões BSM Camarinha			
		Usinas			ROM Mina
		Conceição I	Conceição II	Cauê	
Minas	Conceição	24.000.000	22.793.289	7.406.711	54.200.000
	Deposito Itabiritos	-	1.206.711	12.793.289	14.000.000
	Minas do Meio	-	-	5.800.000	5.800.000
	Total Usinas	24.000.000	24.000.000	26.000.000	

Qualidade Usinas					
USINAS	Fegl	Sigl	P	Algl	Mngl
Conceição I	42,49	38,28	0,024	0,92	0,140
Conceição II	42,42	38,29	0,024	0,90	0,136
Cauê	42,00	37,67	0,018	0,75	0,108

REM	0,46
DMT	4,96

Movimentação Mínima	108.040.000
---------------------	-------------