

## MODELAGEM DO PLANEJAMENTO DA PRODUÇÃO EM UMA INDÚSTRIA DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL

**Vitor Correia Alves**

Universidade Federal de Alagoas  
Av. Lourival Melo Mota, s/n, - Maceió - AL, CEP:57072-900  
vitorcorreia.ufal@gmail.com

**Rodrigo de Barros Paes**

Universidade Federal de Alagoas  
Av. Lourival Melo Mota, s/n, - Maceió - AL, CEP:57072-900  
rodrigo@ic.ufal.br

**Rafael Piatti Oiticica de Paiva**

Universidade Federal de São Carlos  
Departamento de Engenharia de Produção - DEP, Universidade Federal de São  
Carlos - UFSCar, 13565-905, São Carlos, SP  
rafaelpaiva@po2.com.br

### RESUMO

Neste trabalho apresenta-se um modelo baseado em programação linear inteira mista, especificamente na área de programação de produção e dimensionamento de lotes. A finalidade do modelo proposto é auxiliar o planejamento do controle de produção de uma indústria produtora de brita no estado de Alagoas. A proposta é baseada em diversos modelos conhecidos na literatura de problemas de produção, e foi resolvido utilizando o solver CPLEX. Para otimizar tal processo de seleção é necessário considerar a quantidade de produtos e a diversidade de processos envolvidos. Além disso, os prazos curtos de entrega diminuem consideravelmente o tempo para escolha destes processos, gerando a demanda por modelos que atendam rapidamente esta necessidade. Os resultados obtidos mostram que o modelo proposto é capaz de gerar soluções a serem utilizadas pela empresa estudada.

**PALAVRAS CHAVE. Otimização, Planejamento de produção, Dimensionamento de lotes.**

**Gestão da Produção**

### ABSTRACT

This work presents a linear programming and mixed integer programming based model, focused at production scheduling and lot sizing problems. The proposed model aims to aid the control and production planning of a gravel production industry located in Alagoas. The proposal is based on models in the literature about production planning, and was solved using the CPLEX solver. To optimize the selection process we need to considerate the number of products and the diversity of process involved. Short deadlines decreases the time to choose a process, requiring better tools or models to attend these needs. Obtained results shows that the proposed model is capable of generate solutions good enough to be used by the studied industry.

**KEYWORDS. Optimization, Production planning, lot sizing.**

**Production Management**

## 1. Introdução

A atividade de mineração constitui-se basicamente na extração, elaboração e beneficiamento de minerais encontrados na natureza, tanto no estado sólido, líquido ou gasoso. Dessa forma, a indústria mineral incorpora diferentes atividades, tais como: exploração de petróleo e gás natural; mineração subterrânea e superficial de produtos ferrosos ou não ferrosos; produção de agregados para construção civil e captação de água mineral. Além disso, incluem-se também as atividades complementares para preparar e beneficiar as substâncias na condição de torná-las comercializáveis.

Com uma demanda que vem crescendo, o setor de Planejamento e Controle de produção das empresas do ramo de pedra britada vem sentindo uma grande dificuldade em gerir as mudanças que acontecem na planta produtiva para atender ao mercado satisfatoriamente, além de controlar a quantidade de produto que permanecerá em estoque.

O objetivo de pesquisa deste trabalho é elaborar um modelo determinístico de otimização para representar as decisões envolvidas no planejamento agregado de produção de uma pedreira. O trabalho é baseado em um estudo de caso feito em uma empresa localizada no município de Rio Largo, Alagoas, que possui uma produção mensal de mais de duzentas mil toneladas de pedra britada.

Neste trabalho são discutidos alguns modelos de programação linear inteira mista para auxílio nas decisões de produção baseados em modelos de planejamento de produção e de lotes de produtos.

Realizar um agendamento de produção envolve uma grande quantidade de processos e produtos, o que torna a comunicação entre os setores de vendas e planejamento difícil. Além disso, a comunicação entre os setores não ocorre de maneira transparente, uma vez que, sem ter um horizonte de produção bem planejado, negociar e programar prazos se torna uma tarefa árdua. Através do modelo proposto neste trabalho é possível também analisar fatores externos como tempo de atividade da planta produtiva, que muitas vezes pode sofrer paradas devido a interrupções no fornecimento de energia e também fatores ambientais como uma remessa de matéria-prima ruim, que pode resultar em uma queda de eficiência da planta.

O restante do artigo foi organizado nas seguintes seções. Na Seção 2.1 descreve-se o processo de produção de brita, tomando como base a planta da empresa estudada. Na Seção 2.2, o problema é descrito detalhadamente, abordando pontos que serão cruciais no desenvolvimento do modelo proposto. Na Seção 3 apresentam-se trabalhos relacionados, mostrando a importância dos mesmos e o porquê da necessidade de um modelo mais refinado para o caso estudado. A seção 4 mostra a modelagem do problema e em seguida é apresentado o estudo de caso para então serem apresentados os resultados obtidos, seguido por fim de uma análise e conclusões obtidas a partir destes.

## 2. Definição do Problema

### 2.1 A Indústria de pedra britada

Dentre estes materiais extraídos do solo, os agregados para a indústria da construção civil são os insumos mais consumidos no mundo. Estes são matérias granulares, sem volume definidos, de dimensões e propriedades adequadas para uso em obras de engenharia civil. Podem ser classificados levando-se em consideração a origem, a densidade e o tamanho dos fragmentos.

Segundo o serviço geológico americano (USGS - United States Geological Survey), o consumo anual de bens minerais por habitante nos EUA, em 2000, foi da ordem de 10000kg. Deste total, 5700kg foram de rocha britada e 4300kg de areia e cascalho. Considerando-se que parte da rocha britada foi usada com fins industriais - cimento, cal, indústria química e metalurgia - o total de agregados para a construção civil que cada americano consumiu em média ultrapassa 7500kg. Ou seja, 75% do consumo médio americano de bens minerais foram de agregados para a construção civil.

No caso brasileiro, apesar da grande variedade de substâncias obtidas pela

atividade de mineração, apenas cinco respondem por aproximadamente 80% do montante produzido nacionalmente, sendo eles: petróleo, ferro, gás natural, pedra britada e ouro. Caso essa mesma análise seja feita excluindo-se os dois principais hidrocarbonetos (petróleo e o gás natural), obtêm-se onze substâncias representando mais de 80% do total comercializado. Desta forma, o ferro pode ser considerado a principal substância lavrada no Brasil, seguida pelos agregados de construção (Koppe 2007).

Segundo a ANEPAC (Valverde 2009), a indústria de agregados graníticos para a construção civil é composta por aproximadamente 3100 empresas que produzem 465 milhões de toneladas por ano. O setor fatura anualmente 10.3 bilhões de reais e possui gastos de 121.4 milhões em energia elétrica e 5.21 bilhões em transporte. Estudos também apontam para um crescimento da demanda por agregados em torno de 27% entre 2009 e 2015. Entretanto, a demanda atual do setor já ocupa 91% da capacidade instalada, o que demonstra a necessidade de novos investimentos e da otimização dos recursos e processos atuais.

## 2.2 Descrição do processo produtivo

A jazida mineral é lavrada a céu aberto, na área de lavra ocorre o processo de desmonte de rochas, através da perfuração executadas por perfuratrizes pneumáticas, carregamento de explosivos e detonações das mesmas. Após este processo, a rocha desmontada com tamanhos acima do padrão para a britagem primária são reduzidos utilizando explosivos menores. As rochas em tamanhos adequados são carregadas com escavadeiras hidráulicas em caminhões conduzindo a matéria prima até o alimentador vibratório do britador primário, iniciando o processo de britagem.

Após a britagem primária, as rochas são conduzidas por correia transportadora para uma peneira primária. Esta peneira promove a classificação inicial do material, formando duas pilhas, uma de resto de pedreira (matéria que pode ser misturado para obter alguns tipos de produto final) e uma pilha pulmão que será utilizada adiante no processo chamada de pilha rachinha.

O material contido na pilha rachinha é encaminhado através de uma correia transportadora para os britadores secundários. Nestes equipamentos, a brita passa por um processo de rebitagem, com o objetivo de atingir a granulometria dos produtos finais. Em seguida passam por mais um processo de seleção através de peneiras vibratórias, e são então divididas em várias pilhas de produto final diferente de acordo com a granulometria apresentada. As etapas citadas acima podem ser vistas no diagrama de fluxo ilustrado pela figura 1. Por fim, são abastecidos caminhões para o posterior transporte da brita para o cliente.

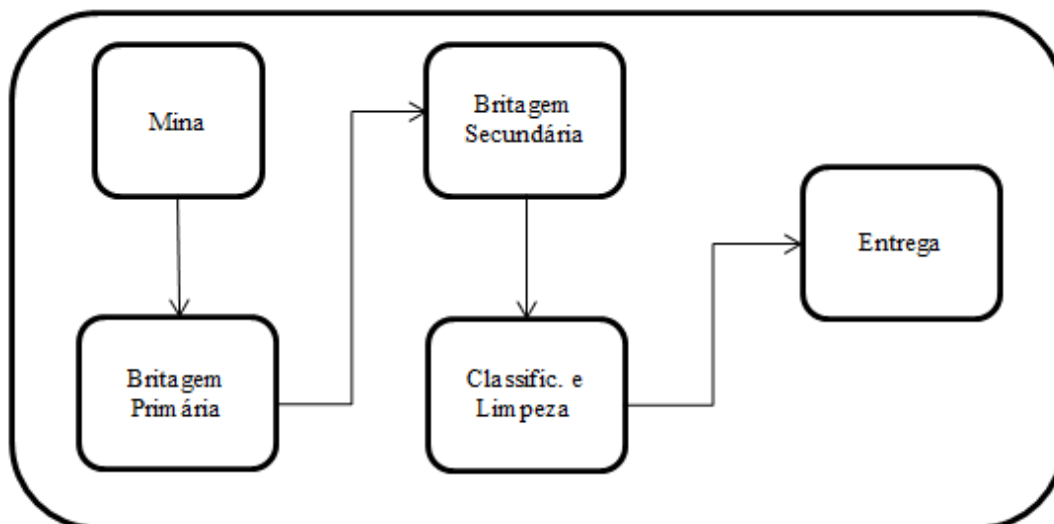


Figura 1 Diagrama de fluxo do processo produtivo

A planta produtiva é composta por uma série de equipamentos, como britadores, peneiras classificadoras e correias transportadoras. Após todo o processo de britagem e classificação, os produtos finais são encaminhados para os clientes.

Um grande problema que a indústria sofre é que nem sempre toda a brita de um certo tipo produzido é vendida, gerando pilhas que acumulam um produto não desejado pelo mercado naquele momento. Portanto, existe a necessidade de uma maior flexibilidade no momento de decidir quais produtos finais resultarão no fim do processo produtivo.

### 2.3 Foco do problema

Os equipamentos utilizados podem ser reconfigurados, gerando um novo conjunto de produtos finais ao término do processo produtivo. No caso de britadores, é possível configurar a abertura de sua boca, alterando a quantidade de pedra que pode entrar e a granulometria de saída da pedra britada, no caso de peneiras classificadoras, é possível trocar as suas telas, aumentando ou diminuindo a quantidade de furos por polegada, permitindo selecionar os materiais de maneira diferente. A tabela abaixo mostra o comportamento de um britador de acordo com sua abertura.

Tamanho da pedra(mm)	ABERTURA DO BRITADOR (LADO FECHADO) mm									
	50	75	100	125	150	175	200	225	250	300
300						97	96	92	87	75
250					100	96	91	86	75	67
225				100	97	91	84	75	68	57
200				98	94	84	75	67	61	52
175			100	94	86	75	67	59	54	45
150		100	96	89	75	65	57	51	47	38
125		98	91	75	63	55	48	43	38	32
100		94	75	61	51	44	38	34	30	25
88	100	86	66	54	45	38	33	29	27	24
75	96	75	57	46	38	32	28	25	23	20
63	90	63	48	38	32	27	24	22	20	17
50	75	51	38	31	26	22	20	18	16	14
38	57	39	28	24	20	17	15	14	13	12
25	38	26	20	17	15	13	12	11	10	9
13	20	14	14	10	9	8	8	7	7	6

**Tabela 1 Percentual de pedra passante de acordo com abertura do britador**

Ao conjunto de configurações de cada equipamento na planta produtiva dá-se o nome de processo. Além da configuração dos equipamentos, é possível realizar pequenas alterações na planta no período de preparação que ocorre antes de iniciar o expediente de produção. É possível adicionar um retorno em alguma peneira seletora, para gerar um processo de rebitagem em pedras da granulometria selecionada, ou adicionando um ponto de escape em algum trecho da planta e gerar algum produto diferente. A essas pequenas alterações é possível configurar os equipamentos de maneiras diferentes, gerando mais saídas para a planta. Dada a natureza combinatória destas configurações, a quantidade de processos que a planta pode ser configurada se torna enorme, inviabilizando uma melhor escolha de processo manualmente para a produção.

A planta produtiva estudada trabalha com mais de 150 processos, que são escolhidos pelo setor de produção de acordo com a demanda dada através do setor de vendas. A figura a seguir ilustra a planta produtiva.

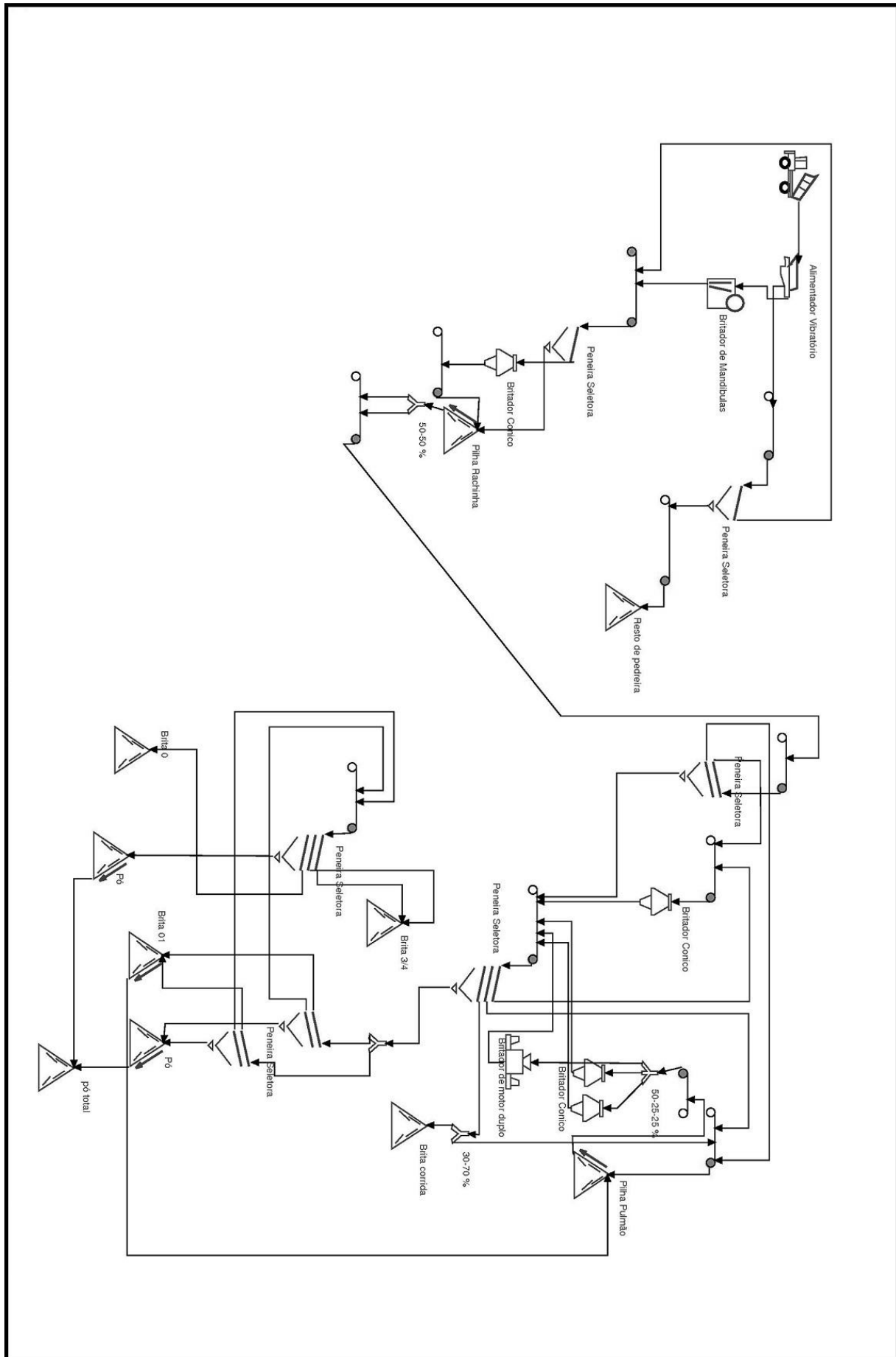


Figura 2 Planta produtiva da pedreira estudada

### 3. Modelagem do problema

A modelagem matemática deste problema foi concebida utilizando conceitos da literatura de problemas de seleção de processos e dimensionamento de lotes conforme (Johnson 1974, Hax 1984, Williams 1993, Nahmias 1995). Entende-se aqui por processo uma configuração específica da planta produtiva que gere um determinado conjunto de produtos finais (pedra britada). Problemas desta categoria vêm encontrando dificuldades uma vez que o processo industrial vem se tornando cada vez mais complexo. Estas preocupações são discutidas em (Feng 1998), sendo pertinentes ao nosso problema a questão da existência de vários produtos compartilhando o mesmo recurso e planejamento multi-período e demanda variável.

Em (Luche 2003) são discutidos modelos aplicados à produção de grãos eletrofundidos. Estes modelos se baseiam na entrega total de produção e, em caso de não ser possível entregar todas as demandas solicitadas pelo departamento de vendas, reduzir ao máximo a falta gerada. Problemas relacionados podem ser encontrados na literatura e modelos para solução de cada problema podem ser vistos em, por exemplo, (Araújo 2004, Toso 2005, Karimi 2003, Askin 1993 e Bodt 1984).

O modelo proposto engloba conceitos discutidos nos trabalhos citados acima porém com o enfoque nas menores perdas financeiras possíveis, dadas multas fixadas em contratos. Além disso, são levados em consideração fatores como tempo disponível de produção por dia, eficiência do equipamento e estoque limitado. Por fim, após as entregas serem realizadas o modelo proposto procura manter em estoque os produtos que possuem o mais alto valor de mercado.

#### 3.1 A formulação matemática

Para a formulação e solução do problema, são utilizados três sub-modelos, onde o resultado obtido em um é utilizado como parâmetro de entrada para o próximo. O primeiro destes modelos, encontrado em (Luche 2003), procura minimizar a falta do problema, evitando problemas de quebra de contrato. Em um segundo momento, é colocado na função objetivo a preocupação financeira, desta maneira, reduzindo ao máximo a multa gerada pelas faltas em contratos. Por fim, é executado um modelo que foca em manter no estoque, ao fim da seleção de processos de produção, os produtos com maior valor de mercado. Como não se trata de um processo que não gera apenas um produto ao seu fim, é necessário manter um controle do que fica em estoque para um controle de recursos.

A seguir são definidos todos os parâmetros e variáveis utilizadas nesta formulação (este modelo não admite valores negativos para as variáveis). Em todos os casos, o índice  $j$  está associado à processo,  $i$  representa um produto,  $k$  denomina um contrato enquanto  $t$  é utilizado para períodos.

##### 3.1.1 Parâmetros

$\phi_t$	Porcentagem de disponibilidade do tempo operacional da planta no período $t$ (%)
$\gamma_t$	Eficiência esperada da planta para o período $t$ (%)
$a_{ij}$	Quantidade do item $i$ produzido pelo processo $j$
$d_{it}$	Demanda do item $i$ no período $t$
$R_{ik}$	Valor de venda do item $i$ no contrato $k$
$D_{kit}$	Demanda do item $i$ no período $t$ no contrato $k$
$M_{ik}$	Multa do item $i$ no contrato $k$

##### 3.1.2 Variáveis

$Q_{kit}$	Quantidade do item $i$ produzido para o período $t$ no contrato $k$
$f_{it}$	Falta do item $i$ no período $t$
$e_{it}$	Excesso do item $i$ no período $t$
$x_{jt}$	Indica se o processo $j$ será utilizado no período $t$

### 3.1.3 Sub-modelos

#### 3.1.3.1 Minimização de falta

$$\text{Min } Z = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^m f_{it} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\left( \sum_{t'=1}^T \sum_{j=1}^n a_{ij} x_{jt'} \gamma_t \phi_t \right) + f_{it} - e_{it} = \sum_{t'}^t d_{it'} \quad i = 1, \dots, m; t = 1, \dots, T \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{jt} \leq 1 \quad t = 1, \dots, T \quad (3)$$

$$x_{jt} \in \{0,1\}, f_{it}, e_{it} \geq 0 \quad i = 1, \dots, m; t = 1, \dots, T \quad (4)$$

A Função objetivo (1) minimiza a falta de produção. A restrição (2) garante que a demanda de cada item em cada período seja atendida e, em caso de falta, seja adicionada à variável  $f$  o valor remanescente para o atendimento da entrega. De maneira similar, em caso de excesso de produção o valor é acrescentado à variável  $e$ . A restrição (3) restringe a utilização de processos a no máximo um por dia.

#### 3.1.3.2 Maximizar valor de receita minimizando valor de multa

$$\text{Max } R = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T Q_{kit} R_{ik} - (D_{kit} - Q_{kit}) M_{ik} \quad (5)$$

Sujeito a:

$$\left( \sum_{t'=1}^T \sum_{j=1}^n a_{ij} x_{jt'} \gamma_t \phi_t \right) + f_{it} - e_{it} = \sum_{t'}^t d_{it'} \quad i = 1, \dots, m; t = 1, \dots, T \quad (6)$$

$$\sum_{k=1}^K Q_{kit} \leq \left( \sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^T a_{ij} x_{jt} \right) + e_{it} \quad (7)$$

$$\left( \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^m f_{it} - Z = 0 \right) \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{jt} \leq 1 \quad t = 1, \dots, T \quad (9)$$

$$Q_{kit} \leq D_{kit} \quad (10)$$

$$x_{jt} \in \{0,1\}, f_{it}, e_{it} \geq 0 \quad i = 1, \dots, m; t = 1, \dots, T \quad (11)$$

A função objetivo em (5) leva em consideração o valor de venda de cada produto final e quantidade adquirida. Para maximizar os lucros, a função opta por deixar de entregar os produtos a contratos que possuem a multa de menor valor em detrimento de contratos com penalidades maiores. A restrição (7) garante que o valor atribuído a cada produto de cada contrato somado a seu respectivo excesso não ultrapasse seu limite e a restrição (8) garante que a falta será a menor possível. Nesta

restrição, o valor de Z foi obtido a partir da execução do sub-modelo do item 3.2.3.1.

### 3.1.3.3 Maximizar valos dos produtos restantes em estoque

$$Max W = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^m p_i e_{it} \quad (12)$$

Sujeito a:

$$\left( \sum_{t'=1}^T \sum_{j=1}^n a_{ij} x_{jt'} \gamma_t \phi_t \right) + f_{it} - e_{it} = \sum_{t'}^t d_{it'} \quad i = 1, \dots, m; t = 1, \dots, T \quad (13)$$

$$\left( \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^m f_{it} \right) - Z = 0 \quad (14)$$

$$Q_{kit} = Q_{kit}^* \quad (15)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{jt} \leq 1 \quad t = 1, \dots, T \quad (16)$$

$$x_{jt} \in \{0,1\}, f_{it}, e_{it} \geq 0 \quad i = 1, \dots, m; t = 1, \dots, T \quad (17)$$

A função objetivo (12) maximiza o valor em estoque (excesso) multiplicando o valor acumulado pelo seu valor de venda. A restrição (14) obriga à menor falta possível e em (15) atribuímos ao valor de cada contrato os valores obtidos na execução do sub-modelo 3.1.3.2 através da variável  $Q_{kit}^*$ , desta forma, é obtido a menor falta possível (3.1.3.1) e a menor multa (3.1.3.2), com estes elementos, podemos garantir no modelo 3.1.3.3 a menor falta e multa e maximizar o valor mantido em estoque, respeitando contratos e faltas e variando os processos selecionados para manter em estoque os produtos de maior valor de mercado.

Como a empresa estudada não trabalha com mais de um processo por dia, não foi estudada a necessidade da utilização de processos como uma fração do período produtivo, tal como tempos de *setup* para a substituição de um processo para outro, sendo esta atividade apenas realizada no período de preparação da planta que antecede o expediente produtivo. Entretanto, tais implementações são um tópico para trabalhos futuros.

## 4. Resultados computacionais

Durante a formulação e implementação do modelo foi utilizado um computador com 4gb de memória RAM, processador Intel® Core i3 CPU 2.93Ghz e sistema operacional Windows 7®. Para implementação do modelo foi utilizado solver CPLEX versão 12.4, utilizado a partir de sua implementação na linguagem de programação JAVA. O tempo de execução em todos os casos experimentados durou entre quinze segundos à cento e vinte segundos.

### 4.1 Dados simulados

Para a validação do modelo proposto, foram recolhidos dados da empresa estudada referente a seus processos produtivos e carta de vendas de um período de seis meses. A escolha do processo no dia a dia da empresa envolve muitas variáveis e, para tornar o processo de decisão viável, a equipe de produção mantém apenas um pequeno conjunto de processos para decidir qual será seleciona, assim reduzindo a flexibilidade da produção.

### 4.2 Resultados do modelo

Como caso de teste utilizaremos valores baseados nos dados reais da empresa, desta forma protegendo a privacidade da mesma. Para isso, seguem nas tabelas abaixo a lista de processos (reduzido), uma carta de vendas e os valores referentes à demanda de cada



contrato. Além disso, para reduzir o volume de informação neste artigo, será tomado como 100% o tempo de disponibilidade da planta e sua eficiência neste estudo.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
<b>B01</b>	0	400	0	0	0	120	53
<b>B02</b>	1100	560	1140	980	1050	0	580
<b>B03</b>	1630	1200	1690	1360	1440	780	1150
<b>B04</b>	620	590	0	870	750	2000	490
<b>B05</b>	0	750	0	0	0	220	780
<b>B06</b>	1690	1550	2210	1450	1580	500	1620
<b>B07</b>	0	0	0	330	220	490	0

Tabela 2 Quantidade da brita i produzida pelo processo j (em toneladas).

	T1	T2	T3	T4	T5
<b>B01</b>	400				
<b>B02</b>					
<b>B03</b>	1000	400	400	400	400
<b>B04</b>					
<b>B05</b>					
<b>B06</b>		100	100	100	100
<b>B07</b>					

Tabela 3 Quantidade do produto i demandado pelo contrato 01 no período t

	T1	T2	T3	T4	T5
<b>B01</b>					
<b>B02</b>	500		500	500	500
<b>B03</b>	600	400	400	400	400
<b>B04</b>		2000			
<b>B05</b>					
<b>B06</b>	1000	1000	1000	1000	1000
<b>B07</b>					

Tabela 4 Quantidade do produto i demandado pelo contrato 02 no período t

	Contrato 01	Contrato 02
B01	58	65
B02	7	12
B03	40	20
B04	12	9
B05	1	6
B06	13	6
B07	3	6

Tabela 5 Multa do item i no contrato k (%)

<i>Produto</i>	<i>Valor</i>
<b>B01</b>	13
<b>B02</b>	15
<b>B03</b>	25
<b>B04</b>	12
<b>B05</b>	16
<b>B06</b>	11
<b>B07</b>	12

Tabela 6 Valor de mercado de cada produto

O resultado obtido a partir da execução do modelo proposto dadas as entradas dispostas nas tabelas 2 a 6 podem ser vistas na tabela 7. Primeiramente, observa-se a falta mínima possível no caso com  $Z = 400$  (falta do item B03 no período T1). Como a demanda é dividida em contratos, a falta pode ser atribuída a qualquer um deles sem impactos para a mesma, a decisão sobre qual contrato ficará atrasado é tomada no submodelo 3.1.3.2, onde é feita análise da tabela 5. Para os períodos T3, T4 e T5, nota-se que qualquer um dos processos (P1-P7) é capaz de satisfazer à demanda solicitada, porém, com o objetivo de manter o maior valor de produtos possível em estoque, obtido pela execução do modelo 3.1.3.3.

T1	T2	T3	T4	T5
P2	P6	P3	P3	P3

Tabela 7 Lista do processo j utilizado no período t

Como efeito comparativo, consideremos um processo de decisão que escolheu os processos dispostos na tabela 8.

T1	T2	T3	T4	T5
P2	P6	P7	P5	P6

Tabela 8 Lista do processo j utilizado no período t

Considere também que a falta foi atribuída ao contrato 02. Neste caso, a multa subiu de 7% para 12% do valor do produto. Apesar de uma escolha que obtém a menor falta possível, além de uma escolha errada para a questão da multa, não se obtém os valores ótimos para estoque mostrado na tabela 9, onde observa-se um aumento de 28.33% no valor de produtos remanescentes em estoque em relação à decisão de processos tomados pela logística.

	Modelo	Logística
<b>B01</b>	1560	3120
<b>B02</b>	34200	2850
<b>B03</b>	56250	13750
<b>B04</b>	7080	45960
<b>B05</b>	15520	31520
<b>B06</b>	36080	3850
<b>B07</b>	5880	11160
<b>Total</b>	<b>156570</b>	<b>112210</b>

Tabela 9 Valor de mercado do estoque remanescente para as escolhas de processo

## 5. Conclusões e trabalhos futuros

Neste trabalho foi proposta uma abordagem para problemas de decisão de seleção de processos de produção. O modelo apresentado, baseado em programação linear, se comporta de maneira satisfatória para atender a demanda do problema tratado. Um ponto importante a ser observado é que em uma primeira instância, como processos podem ser concebidos diariamente, o modelo não seria capaz de prover tanta flexibilidade como os engenheiros de produção da empresa. Entretanto, uma vez que se cria um novo processo e este é adicionado à base de dados do modelo, passa a ser analisado junto aos outros pré-existentes.

Devido ao tempo de processamento do modelo através do CPLEX ser baixo, não só é possível gerar o planejamento de produção da planta como também realizar estimativas e capacidade. Desta forma, é possível melhorar a comunicação existente entre os setores de produção e vendas, pois torna-se possível uma resposta imediata acerca da capacidade de entrega dos produtos em determinada data, diminuindo também a possibilidade de atrasos nas entregas.

Uma perspectiva para pesquisa futura é adicionar tempos de setup no modelo apresentado e comparar as soluções obtidas no modelo atual para analisar se existe um ganho real no caso da indústria estudada. Além disso, é importante estudar questões baseadas na incerteza inerente aos parâmetros do planejamento, utilizando otimização robusta e programação estocástica.

## **6. Agradecimentos**

Os autores agradecem à revisão criteriosa do Prof. Dr. Alejandro César Frery Orgambide e à colaboração da Britex Minerações LTDA pelo auxílio com o estudo de caso para o trabalho apresentado.

## Referências

- ARAÚJO, S. A.; ARENALES, M. N.; CLARK, A. R.** “Dimensionamento de lotes e programação do forno numa fundição de pequeno porte”. *Gestão & Produção*, v. 11, n. 2, p. 165-176, maio/ago. 2004.
- ASKIN, R.; STANDRIDGE, C.** “Modeling and analysis of manufacturing systems”. New York: Wiley & Sons, 1993.
- BERTRAND J. W. M., FRANSOO, J. C.** “Operations management research methodologies using quantitative modeling”. *International Journal of Operations & Production Management*, v.22, n.2, p.241-264, 2002.
- BODT, M. A.; GELDERS, L. F.; WASSENHOVE, L. N.** “Lot sizing under dynamic demand conditions: a review”. *Engineering Costs and Production Economics*, v. 8, p. 165-187, 1984.
- HAX, Arnold, CANDEA, Dan.** “Production and Inventory Management”. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1984, ISBN 0137248806, 9780137248803.
- JOHNSON, L. A., MONTGOMERY, D.G.** “Operations Research in Production Planning, Scheduling and Inventory Control. Nova York: Wiley, 1974.
- KARIMI, B.; FATEMI GHOMI, S. M. T.; WILSON, J. M.** “The capacitated lot sizing problem: a review of models and algorithms”. *Omega – the International Journal of Management Science*, v. 31, n. 5, p. 365-378, out. 2003.
- KOPPE, Jair Carlos.** “A Lavra e a indústria Mineral – Estado da arte e tendências tecnológicas”. *Tendências Tecnológicas Brasil 2015, Geociências e Tecnologia Mineral*. pp. 81-103. SGB/CPRM – Serviço Geológico do Brasil, CETEM – Centro de Tecnologia Mineral. 2007 ISBN 978-85-7227-243-8
- LUCHE, José Roberto Dale e MORABITO, Reinaldo.** “Otimização na programação de produção de grãos eletrofundidos: um estudo de caso. *Gest. Prod.* [online]. 2005, vol.12, n.1, pp. 135-149
- NAHMIAS, Steven.** “Production and Operation analysis”. McGraw-Hill/Irwin Series Operations and Decision Sciences 6ed. 2008 ISBN-10: 0073377856.
- TOSO, E. A. V.; MORABITO, R.** “Otimização no dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção: estudo de caso numa fábrica de rações”. *Gestão & Produção*, v. 12, n. 2, p. 203-217, maio/ago. 2005
- VALVERDE, Fernando M., TSUCHIYA, Osvaldo Yutaka.** “Agregados para a Construção Civil no Brasil. Comissão de Serviços de Infraestrutura do Senado Federal. Brasília, 2009.
- WILLIAMS, H. Paul.** “Model Building in Mathematical Programming”. John Wiley, 4ed ISBN 0471997889, 1999.
- YI-FENG Hung, YI-CCHENG Hu.** “Solving mixed integer programming production planning problems with setups by shadow price information”, *Computers & Operations Research*, vol. 25, n. 12, Dezembro 1998, pp. 1027-1042, ISSN 0305-0548, 10.1016/S0305-0548(98)00037-9.