

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO FLORESTAL

GABRIELLE HAMBRECHT LOUREIRO

**OTIMIZAÇÃO DO CARREGAMENTO E DESCARREGAMENTO
DE FORNOS EM UMA PLANTA DE CARBONIZAÇÃO**

CURITIBA

2014

GABRIELLE HAMBRECHT LOUREIRO

OTIMIZAÇÃO DO CARREGAMENTO E DESCARREGAMENTO DE
FORNOS EM UMA PLANTA DE CARBONIZAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso
Pós- Graduação em Gestão Florestal
Orientador: Julio Eduardo Arce

Curitiba, 2014

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Elson Farias Loureiro e Sandra Hambrecht Loureiro, e meu irmão Guilherme Hambrecht Loureiro, os maiores incentivadores dos meus estudos e sempre presentes nas minhas conquistas e vitórias;

Ao Programa de Educação Continuada em Ciências Agrárias pela concessão da bolsa de estudos em Gestão Florestal.

Ao Professor João Carlos Garzel Ledoro da Silva por ter acreditado no meu trabalho, pela confiança em mim depositada, e por ter proporcionado apoio e incentivo nos meus estudos.

À empresa Vetorial Energética, por ter fornecido os dados, pela contribuição e confiança. Principalmente ao senhor Peter Althoff, grande colaborador neste estudo.

Ao meu orientador Julio Eduardo Arce pela paciência e por dividir mais uma vez seu conhecimento comigo, além de acreditar neste trabalho.

À Pöyry por apoiar meus estudos e incentivar o crescimento pessoal e profissional de seus funcionários.

A Rafaella De Angeli Curto, amiga e parceira ao longo de todos os estudos durante a pós-graduação.

E a todos que contribuíram para a realização deste trabalho, mesmo que aqui não estejam citados, e que se sentem felizes com minha conquista.

RESUMO

O carregamento dos fornos nas plantas de carbonização é uma operação que exige planejamento e sincronia ao longo do ciclo, tornando-se mais complexo quando envolve um grande número de fornos. Por isso o objetivo deste estudo foi aplicar técnicas de Pesquisa Operacional para otimizar as operações de carregamento e descarregamento nos fornos de carvão vegetal em uma planta de carbonização localizada no Mato Grosso do Sul. A planta de carbonização possui 48 fornos retangulares, onde 2 máquinas são responsáveis pelo carregamento e descarregamento desses fornos, as quais trabalham 24 horas por dia. Uma Programação Linear Inteira Mista (PLIM), foi aplicada para gerar o modelo de otimização. Esse modelo foi gerado por meio da interação entre os tempos e processos de carregamento, carbonização, resfriamento e descarga dos fornos. Com isso, foi possível gerar o modelo de otimização para que 4 fornos fossem carregados e descarregados por dia, utilizando as 2 máquinas disponíveis na planta de carbonização, além de gerar uma agenda otimizada de gerenciamento dos fornos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Destino da madeira de florestas plantadas	9
Figura 2- Consumo nacional de carvão vegetal de florestas plantadas, 2005-2012.....	10
Figura 3- Distribuição dos fornos em estrelas na planta de carbonização	17
Figura 4- Etapas e processos para a produção de carvão vegetal	19

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Tempo de carbonização para a combinação das variáveis diâmetro e umidade.	21
Tabela 2- Tempo de resfriamento para a combinação das variáveis diâmetro e qualidade do forno.	22
Tabela 3- Agenda do carregamento/descarregamento dos fornos por meio do modelo de otimização	24

SUMÁRIO

1- INTRODUÇÃO	8
2- REVISÃO BIBLOGRÁFICA	9
2.1 O Carvão no Brasil	9
2.2 A evolução das plantas de carbonização	11
2.3.1 Espécies utilizadas.....	12
2.3.2 Plantio, Colheita e Transporte.....	13
2.3.3 Carregamento dos fornos.....	14
2.3.5 Outras atividades.....	15
2.4 Pesquisa operacional	16
3- METODOLOGIA	17
3.1 Descrição da área do estudo	17
3.2 Etapas do ciclo	18
3.3 Variáveis e tempos que influenciam no ciclo da produção de carvão vegetal ...	21
3.3.1 Carregamento.....	21
3.3.2 Carbonização.....	21
3.3.3 Resfriamento.....	22
3.3.4 Descarga	22
4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
5- CONCLUSÃO	25

1- INTRODUÇÃO

Desde o século XIX o Brasil é o maior produtor mundial de carvão vegetal, utilizado principalmente na indústria siderúrgica para a produção de ferro-gusa, ferroligas e aço (REZENDE E SANTOS, 2010).

Com a crise internacional houve acentuada redução no preço do carvão, reflexo do aumento da oferta deste produto, tanto de origem nativa quanto de florestas plantadas, sem a correspondente demanda pelo setor guseiro (ABRAF, 2013). Por isso as grandes empresas que se mantêm em funcionamento, buscam alternativas para reduzir os custos de produção.

No cotidiano de instituições e empresas, a tomada de decisão é determinada, geralmente, por experiências passadas, o que não leva, necessariamente, a soluções otimizadas e rentáveis. Deste modo, sob o ponto de vista operacional, podem significar apenas soluções viáveis para um problema (SANTOS, 2008).

O carregamento dos fornos nas plantas de carbonização é uma operação que exige planejamento e sincronia ao longo do ciclo, tornando-se mais complexo quando envolve um grande número de fornos. Por exemplo, se um forno permanece aberto sem atividade ao invés de gerar uma receita acarretará um custo à empresa. Já se todos os fornos estiverem em atividade e as máquinas paradas, também será gerado um custo.

Atualmente, ferramentas de otimização são alternativas para aumentar a produtividade e tomar decisões com embasamento científico, para poder atingir um estado sustentado de competitividade.

Neste contexto, buscando aumentar as receitas e diminuir os custos no processo que vai do carregamento ao descarregamento dos fornos de carvão, o objetivo deste estudo foi aplicar ferramentas matemáticas de auxílio à tomada de decisão com o uso de técnicas de Pesquisa Operacional.

2- REVISÃO BIBLOGRÁFICA

2.1 O Carvão no Brasil

Segundo o ABRAF (2013), em 2012, de toda a madeira de florestas plantadas produzida no país, 38,7% foi destinada à produção de carvão vegetal, lenha e outros produtos florestais. Além disso, o consumo está basicamente concentrado no mercado interno como pode ser visualizado na Figura 1.

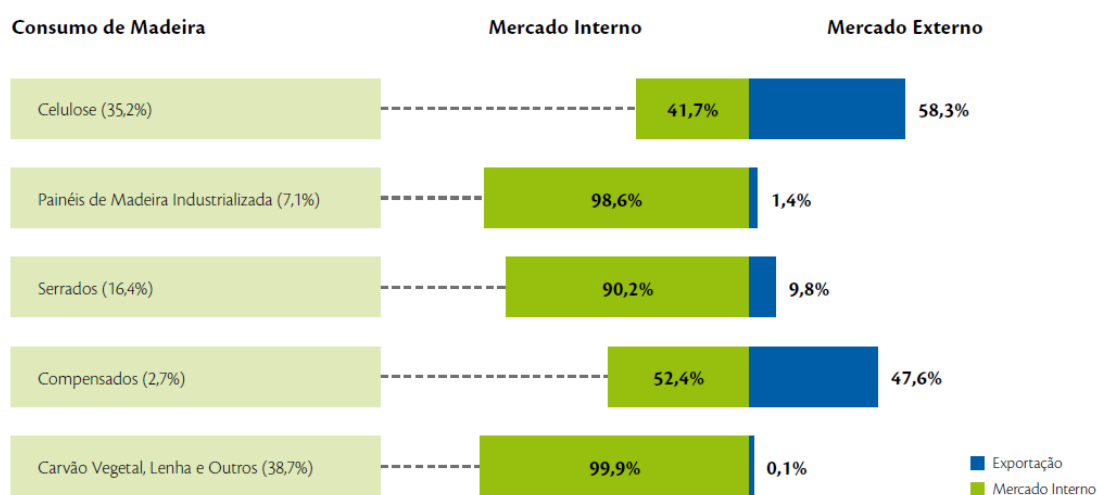


Figura 1- Destino da madeira de florestas plantadas

Fonte: ABRAF 2003

O Brasil é o único país no mundo em que o carvão vegetal tem aplicação industrial em grande escala tendo, como destinos principais, a produção de ferro gusa, aço, ferro ligas e silício metálico, destacando-se no setor mundial como maior produtor e consumidor desse insumo (AMS, 2009).

Segundo Rezende e Santos (2010), o carvão vegetal é utilizado como termorredutor de aproximadamente 1/3 da produção de ferro gusa e aço, e de mais da metade da produção de ferro ligas no Brasil.

A utilização de carvão vegetal como termorredutor na produção siderúrgica iniciou-se no estado de Minas Gerais, motivado pela farta disponibilidade de vegetação nativa e ausência de reservas de carvão mineral na região (REZENDE E SANTOS, 2010).

Em 1982, 80% da produção de carvão vegetal era originária de mata nativa, e em 1997, após 15 anos, houve uma inversão no quadro, onde 75% da produção tornou-se oriunda de reflorestamentos e 25% de matas nativas (ABRACAVE, 1998).

Entre 1997 e 2008 a produção de carvão aumentou de 23,6 milhões de metros de carvão (mdc) para 33,4 milhões de mdc, onde 40% foi de origem de florestas plantadas (AMS, 1997). Já entre 2009 e 2012 o consumo de carvão vegetal de origem de florestas plantadas apresentou um crescimento da ordem de 61,4% (ABRAF, 2013). Esse aumento ocorreu por vários fatores, dentre os quais podem destacar-se as exigências e a pressão constante dos grandes consumidores nacionais e internacionais de ferro-gusa para redução ou até eliminação da utilização de carvão de áreas nativas, aliado às exigências ambientais nacionais, cada vez mais intensas, por meio de leis e regulamentos (Figura 2) (ABRAF, 2013). Além disso, o consumo de carvão proveniente de matas nativas fez com que houvessem incentivos do governo brasileiro em 1975 por meio dos incentivos fiscais para o desenvolvimento florestal do país (ZUCHI, 2000).

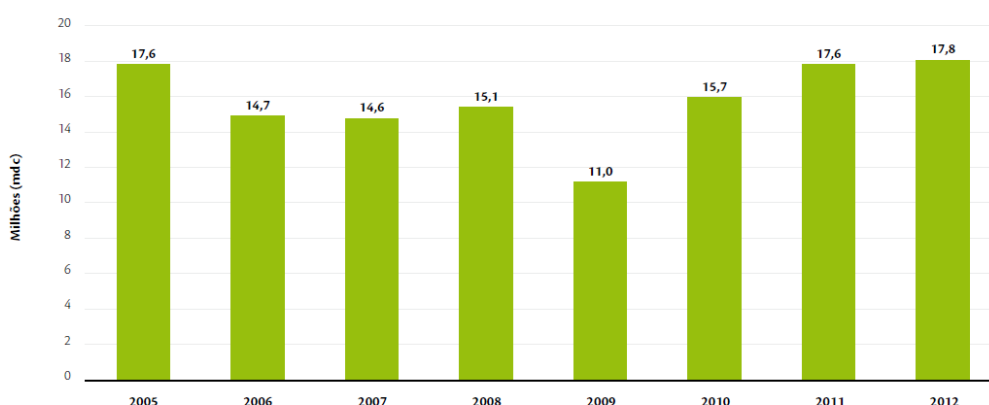


Figura 2- Consumo nacional de carvão vegetal de florestas plantadas, 2005-2012.

Fonte: MAS, 2013 e ABRAF, 2013

A substituição da matéria-prima oriunda de florestas nativas por madeira de florestas plantadas gerou maior homogeneidade, modernidade e qualidade do produto (REZENDE e SANTOS, 2010). Os mesmos autores relatam que o consumo de carvão vegetal, embora crescente, é marcado por oscilações decorrentes dos desequilíbrios de ordem macroeconômica, provocando frequentes alterações nos investimentos públicos e privados, na produção industrial e, conseqüentemente, na menor ou maior utilização desta matéria-prima.

Com a crise internacional de 2008 houve o desaquecimento do setor siderúrgico, provocando redução na produção, demissões e a paralisação de fornos. A partir daí, ocorreu uma importante mudança no perfil do mercado externo. Os Estados Unidos reduziram suas aquisições e a China assumiu o posto de segundo maior comprador do ferro-gusa nacional, em especial de Minas Gerais (REZENDE e SANTOS, 2010).

Segundo o ABRAF (2013), o segmento siderúrgico ainda não se recuperou totalmente dessa crise financeira. A China reduziu as compras de ferro-gusa, e os americanos continuaram comprando volumes ainda reduzidos em relação aos anos anteriores. Esses fatores refletiram de maneira expressiva no mercado nacional de carvão vegetal, importante insumo utilizado na produção de ferro-gusa e ferro-ligas.

Em 2012, embora a produção de gusa, por carvão vegetal – maior consumidor do insumo – tenha se mantido em relação a 2011, cerca de 55,0% das siderúrgicas independentes produtoras de gusa mantiveram-se fechadas. Esses fatores refletiram nos preços médios praticados ao longo do ano de 2012, que caíram 11,3% em valores nominais (ABRAF, 2013).

Com a crise, as grandes empresas que mantêm as operações, buscam alternativas para reduzir custos a fim de poder manter a competitividade com os baixos preços de mercado praticados.

2.2 A evolução das plantas de carbonização

Antigamente a produção de carvão era nômade, sendo realizada por meio de fornos denominados “rabo quente” de baixa produtividade (4 a 8 m³ de carvão), os quais eram edificados e derrubados na medida em que o desmatamento avançava. Já na década de 60 iniciaram-se as construções de fornos de superfície (circulares) chegando a produzir 20 m³ de carvão por fornada (ZUCHI, 2001). Segundo o autor, as grandes empresas utilizam fornos retangulares que permitem o carregamento e descarregamento mecanizado chegando a produzir um volume muito superior de carvão quando comparado aos demais fornos. Essas empresas mantêm a Política de Recursos Humanos com planos de cargo e salários, jornada de trabalho oficial, padrões operacionais com atividades prescritas, metas de produção pré- estabelecidas, inclusive premiação quando estas são superadas.

Porém, os pequenos e médios produtores, responsáveis por cerca de 80% da produção total de carvão, optam pelos fornos de baixa capacidade volumétrica (tipo

“rabo quente”), devido ao elevado custo com maquinário e ao maior investimento inicial para a construção de fornos de maiores dimensões (OLIVEIRA et al., 2013).

2.3 Etapas do processo para a elaboração do carvão

Segundo Santos (2008), o ciclo de transformação da madeira em carvão inicia-se com o carregamento do forno, seguido do processo de carbonização, do processo de resfriamento e terminando com a descarga do carvão.

Porém os processos que antecipam o ciclo também são de suma importância, pois atividades como silvicultura e manejo do povoamento florestal são um dos determinantes da qualidade do carvão.

2.3.1 Espécies utilizadas

Segundo Chaebo et al. (2010), no Mato Grosso do Sul as atividades florestais iniciaram nos municípios de Três Lagoas e Ribas do Rio Pardo (porção leste do Estado) por conta do baixo valor relativo das terras, disponibilidade de recursos hídricos e expectativas voltadas para a indústria de celulose.

A siderurgia no Brasil utiliza madeira oriunda de florestas nativas (Mata Atlântica, Cerrados e Caatinga) desde sua introdução no Brasil (REZENDE et al., 2002).

Porém nos últimos anos a madeira de florestas nativas vem sendo substituída por madeira de florestas plantadas por inúmeros motivos, são eles:

- Incentivos fiscais do governo federal em meados da década de 60, e a obrigatoriedade legal (Código Florestal) das siderúrgicas passarem a ser auto sustentáveis, adequando-se a um novo perfil da indústria de base florestal (COELHO JUNIOR et al., 2006).

- A forma, dimensões, umidade, densidade, homogeneidade e teor de carbono fixo, são algumas características desejáveis para a produção do carvão vegetal (VALENTE, 1986), o que não pode ser controlado com madeira oriunda de floresta nativa. Essas características são essenciais para a qualidade do carvão, agregando assim valor ao produto.

- A floresta nativa produz carvão vegetal de qualidade variada por apresentar um conjunto de espécies que produz. Já o carvão oriundo de floresta plantada é homogêneo,

proporcionando qualidade melhor e maior preço no produto final (COELHO JUNIOR et al., 2006).

- A madeira de floresta nativa gera mais cinzas (maiores perdas) quando comparada com madeira de floresta plantada, devido à variabilidade de espécies e consequente heterogeneidade de densidades. Madeiras menos densas, bem como lenha de menor diâmetro, carbonizam-se mais rapidamente, produzem maior quantidade de cinzas (COELHO JUNIOR et al., 2006).

2.3.2 Plantio, Colheita e Transporte

Atualmente, a maioria das grandes empresas utilizam florestas plantadas de *Eucalyptus sp.* Para a produção de carvão vegetal. A silvicultura e manejo da floresta com o objetivo para carvão variam de acordo com a região e empresa.

Autores como Santos (2008) recomendam a colheita após sete anos, sem retirada das raízes, esperando um novo brotamento e, depois de sete anos, derruba-se as árvores novamente, mas dessa vez as raízes são arrancadas sendo realizado um novo plantio.

Segundo Paludzysyn Filho (2008) o rendimento na produção de carvão é maximizado com o uso de madeiras mais densas, de maior poder calorífico e constituição química adequada, resultando também em um carvão de melhor qualidade. Uma tendência em plantios para produção de carvão vegetal é a redução do ciclo de corte. O ciclo que era de 7 ou 6 anos, vem sendo diminuído por algumas empresas para 5 anos, e já se fala em 4 e 3,5 anos. Mas é preciso saber quanto se pode reduzir no ciclo sem prejudicar a qualidade da madeira para este fim (OLIVEIRA et al., 2013).

Grossi (2004) recomenda o plantio nos meses chuvosos. No período de desenvolvimento inicial das plantas deve-se adubar as mudas e evitar a competição por luz, água e nutrientes por meio da capina manual, mecânica ou química

Após o corte e desgalhamento das árvores, as toras são enfileiradas no campo, processo chamado de embandeiramento, permanecendo por 90 dias com objetivo de perder água (JUVILLAR, 1980). O tempo e local de secagem também dependem da região e empresa, podendo ser bastante variável.

A madeira seca é transportada por meio de caminhões até as plantas de carbonização estrategicamente localizadas próximas às florestas, as quais são descarregadas próximas aos fornos (GROSSI, 2004).

2.3.3 Carregamento dos fornos

Nos fornos retangulares o caminhão entra no forno e a lenha é descarregada e empilhada na posição horizontal. Esse carregamento pode ser mecanizado por meio de uma grua ou manual (ZUCHI, 2000).

No carregamento mecanizado utilizando a grua, é ela que retira a lenha da pilha ao lado do forno e deposita em seu interior, não havendo trabalho manual.

2.3.4 Carbonização e Resfriamento

A carbonização é um processo de decomposição térmica onde a madeira é submetida às temperaturas elevadas, sofrendo transformações sucessivas e tendo como resíduo sólido o carvão vegetal (SANTOS, 2008).

A carbonização é a etapa fundamental do processo de produção de carvão vegetal. Se a carbonização não for bem conduzida, mesmo que tenham sido observados todos os fatores como: tipo de lenha, teor de umidade, carregamento correto do forno etc., o carvão produzido não atingirá a produtividade e qualidade esperada (PENEDO, 1980; GOMES e OLIVEIRA, 1980).

O processo de carbonização, que é controlado, inicia-se a partir da ignição do forno. A fumaça inicialmente é esbranquiçada com a presença predominante de vapor d'água, monóxido e dióxido de carbono (incondensáveis), indicando que a lenha está perdendo umidade, a partir daí a coloração da fumaça torna-se amarelada indicando a presença de vapores condensáveis (alcatrão e ácido pirolenhoso) e ao final da carbonização a fumaça apresenta cor azulada onde predomina monóxido e dióxido de carbono (JUVILLAR, 1980).

No processo de carbonização, a madeira passa por aquecimento, secagem, até que entre em temperatura de carbonização (GROSSI, 2004).

Na secagem (até 270°C) a madeira aquece e a água é liberada. Um aquecimento posterior libera a água residual e leva a lenha até a temperatura de carbonização (GROSSI, 2004).

O terceiro estágio é quando ocorre a carbonização propriamente dita (270 a 450°C). Quando a madeira atinge aproximadamente 270°C, ela alcança a umidade próxima à zero, ocorrendo uma reação exotérmica, a qual resulta na quebra da celulose e da lignina. Neste momento, o fornecimento de energia não é mais necessário para dar

continuidade ao processo: a entrada de ar é parcialmente fechada e o processo de carbonização avança até que toda a lenha seja transformada em carvão. Esse estágio dura, em média de 4 (quatro) a 6 (seis) dias (GROSSI, 2004).

A qualidade do carvão vegetal é influenciada pela temperatura final na carbonização (TRUGILHO e SILVA, 2001). Segundo Raad (2006), quanto maior a temperatura final, mais elementos voláteis são eliminados. Porém, o rápido aumento de temperatura faz com que haja a rápida expansão dos gases dentro da madeira, reduzindo as chances de reações secundárias que, por consequência, reduzem o teor de carbono do carvão final (VELLA, 1989).

No final da carbonização inicia a fase de resfriamento e o carbonizador abre todos os tatus, deixando a chaminé e a janela no fundo do forno aberta (Figura 4) quando é iniciada a sequência de nebulizações, que tem por objetivo acelerar o resfriamento do forno. Quando a temperatura do forno alcançar 40°C, o descarregamento é liberado (ZUCHI, 2000). O processo de resfriamento dura entre 6 e 8 dias.

2.3.5 Outras atividades

Na etapa de descarregamento mecanizado, trabalham um operador de pá carregadeira e ajudantes, sendo esses responsáveis por observar os focos de fogo após a abertura do forno, e por extingui-lo com jatos de água ou com a limitação da entrada de ar fechando novamente as portas (extinguindo oxigênio). Se não houver fogo o operador da pá carregadeira retira gradativamente o carvão no sentido da porta para o fundo do forno realizando um movimento que provoque pequena vibração para acomodação da carga, evitando queda do carvão no trajeto da descarga (ZUCHI, 2000).

Além disso, os ajudantes têm ainda como atividade, limpeza da canaleta do forno retirando borra de alcatrão, piche e pedaços de carvão com uso de pá, enxada e carrinho de mão, além de vedar possíveis vazamentos no forno durante o período de resfriamento.

2. 4 Pesquisa operacional

A Pesquisa Operacional (P.O.) teve origem na 2ª Guerra Mundial, onde muitas decisões importantes relacionadas a operações militares tiveram de ser tomadas (TAHA, 1994; BUONGIORNO e GILLESS, 1987).

A pesquisa operacional consiste na descrição de um sistema organizado com o auxílio de um modelo, e através da experimentação com o modelo, na descoberta da melhor maneira de operar o sistema (SILVA et al., 1995).

A melhor definição para modelo é: representação externa e explícita de parte da realidade vista pelas pessoas que desejam usá-lo para entender, mudar, gerenciar e controlar aquela parte da realidade (GROSSI, 2004).

Dentre os vários modelos de suporte à decisão, os modelos de Pesquisa Operacional ocupam papel de destaque na alocação ótima dos recursos entre as diversas atividades competitivas (RODRIGUES et al., 2006).

Segundo Arce (2000), embora os modelos matemáticos representem a base para a Pesquisa Operacional, a questão consiste mais em resolver um problema do que em construir e resolver modelos matemáticos.

A quantidade de fatores que devem ser considerados no planejamento das atividades florestais torna necessária a aplicação da Pesquisa Operacional quando se pensa em utilizar eficientemente os recursos naturais, humanos e financeiros que anualmente são destinados aos plantios florestais comerciais (ARCE, 2000).

A utilização de modelos para representar os processos trabalhados também é uma característica importante, sendo que a P.O. envolve as seguintes ciências fundamentais: Matemática, Estatística, Economia e Computação (SANTOS, 2008)

3- METODOLOGIA

3.1 Descrição da área do estudo

O estudo foi conduzido em uma planta de carbonização localizada no Mato Grosso do Sul. A planta de carbonização possui 48 fornos retangulares dispostos em 4 “estrelas” (Figura 3).

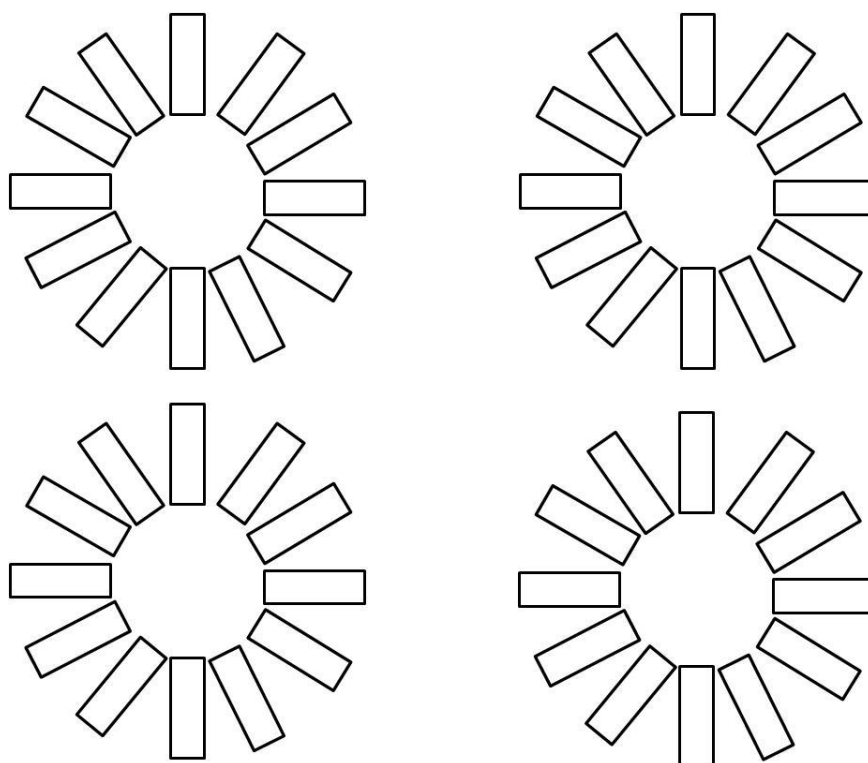


Figura 3- Distribuição dos fornos em estrelas na planta de carbonização

Cada forno tem capacidade para 310 st de madeira, com um fator de conversão de 1,95 para mdc¹.

Existem 2 máquinas responsáveis pelo carregamento e descarregamento desses fornos, as quais trabalham 24 horas por dia. São 8 operários para conduzi-las com carga horária de 12 horas e 36 horas de descanso.

¹ Unidade de medida para o carvão vegetal que equivale à quantidade de carvão que cabe em um metro cúbico

3.2 Etapas do ciclo

O ciclo é composto por 4 etapas: carregamento, carbonização, resfriamento e descarregamento, e entre os ciclos acrescenta-se um período de manutenção.

O carregamento é a fase em que o forno é preenchido com madeira a qual pode ter duas dimensões e dois teores de umidade: dimensões média/fina ou média/grossa e umidade alta ou baixa.

A tora classificada como média/fina, possui dimensões menores de 8 cm na ponta fina e a madeira média/grossa, dimensões superiores a esse diâmetro.

Logo ocorre a carbonização, etapa em que é dada a ignição no forno. A próxima fase é o resfriamento, na qual o forno é lacrado (fecham-se todas as comportas) para que o ar seja extinto e as chamas apagadas, assim a temperatura começa a diminuir. Quando a temperatura está baixa, o forno é aberto realizando o descarregamento.

A temperatura do forno é mensurada por sensores instalados ao longo do mesmo, os quais passam essa informação ao CARBORAAD, um programa de gerenciamento do processo de carbonização em fornos de alvenaria.

Todas as temperaturas lidas durante o processo de carbonização e resfriamento são armazenadas num banco de dados do CARBORAAD estruturado por forno, tipo de forno, unidade de produção e fazenda. As tomadas de decisão são discutidas várias vezes ao dia permitindo um acompanhamento contínuo do processo.

Na Figura 4 estão ilustrados os processos realizados na planta de carbonização. Na Figura A está o carregamento do forno por meio mecanizado, seguido da carbonização na B. Na Figura C está apresentado o “tatu”, responsável pela entrada de ar para a carbonização e também pelo acompanhamento deste processo ao longo do forno, pois estes estão distribuídos por toda a extensão do forno. Na Figura D consta a vedação do forno para evitar a entrada de ar para extinguir as chamas e iniciar o processo de resfriamento. Nas Figuras E e F está a retirada dos tiços (madeira carbonizada que não foi transformada em carvão) e retirada do carvão propriamente dito por meio mecanizado.



Figura 4- Etapas e processos para a produção de carvão vegetal



Figura 4- Etapas e processos para a produção de carvão vegetal continuação...

3.3 Variáveis e tempos que influenciam no ciclo da produção de carvão vegetal

No processo da produção de carvão vegetal existem diferentes variáveis que influenciam no tempo dos procedimentos. Portanto, é a interação entre essas variáveis que irá definir os tempos de carregamento, carbonização, resfriamento e descarga dos fornos e, conseqüentemente, o tempo do ciclo como um todo.

3.3.1 Carregamento

É possível carregar e descarregar 2 fornos por dia por máquina. Ou seja, considerando que são 2 máquinas são carregados/d Descarregados 4 fornos por dia. Conseqüentemente, com o número de máquinas é possível carregar/d Descarregar 120 fornos por mês.

O tempo de carregamento depende do porte da máquina. Existe uma máquina pequena a qual possui uma produtividade menor que a de maior porte. Porém neste estudo os tempos de carregamento foram considerados os mesmos.

3.3.2 Carbonização

O tempo de carbonização varia de acordo com o diâmetro e a umidade das toras. O diâmetro médio/fino e diâmetro médio/grosso e umidade da madeira classificadas como alta e baixa.

Os tempos de carbonização foram estimados conforme a combinação dessas variáveis, e estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1- Tempo de carbonização para a combinação das variáveis diâmetro e umidade.

Diâmetro	Umidade	Tempo de carbonização (dias)
1 (médio/fino)	1 (baixa)	2
1 (médio/fino)	2 (alta)	3
2 (médio/grosso)	1 (baixa)	4
2 (médio/grosso)	2 (alta)	5

3.3.3 Resfriamento

A qualidade dos fornos está diretamente relacionada ao desempenho destes no resfriamento do carvão. Para o presente estudo os fornos foram classificados como tendo qualidade baixa e alta. As dimensões das toras também estão relacionadas ao tempo de resfriamento.

A combinação entre essas duas variáveis que definem o tempo de resfriamento e estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2- Tempo de resfriamento para a combinação das variáveis diâmetro e qualidade do forno.

Diâmetro	Qualidade do forno	Tempo de carbonização (dias)
1 (médio/fino)	Baixa	7
1 (médio/fino)	Alta	8
2 (médio/grosso)	Baixa	9
2 (médio/grosso)	Alta	10

3.3.4 Descarga

O tempo de descarregamento do forno depende do porte da máquina. O tempo médio é de 0,5 dia, onde a máquina de maior porte possui um desempenho de 0,35 dia enquanto a menor 0,15.

Vale ressaltar que a temperatura do forno também influencia diretamente no tempo de carbonização e resfriamento, mas para o presente estudo, essa variável não foi considerada.

4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo matemático de otimização desenvolvido no presente trabalho baseia-se na ferramenta conhecida como Programação Linear Inteira Mista (PLIM). A função Objetivo (FO) e as restrições do modelo são apresentadas na sequência.

Função Objetivo

$$\text{Min } \sum_i \sum_j \sum_t \sum_m (C_{ijtm} + Q_{ijtm} + R_{ijtm} + D_{ijtm})$$

Nas seguintes restrições, cada tipo de máquina m deve carregar e descarregar 2 fornos por dia j .

$$\sum_i \sum_t (C_{ijtm}) = 2 \quad j = 1, 2, \dots, 30; m = 1, 2$$

$$\sum_i \sum_t (D_{ijtm}) = 2 \quad j = 1, 2, \dots, 30; m = 1, 2$$

A seguinte restrição impede que o mesmo forno seja carregado enquanto estiver nas fases de queima, resfriamento ou descarregamento.

$$\sum_i \sum_{j2 > j \text{ AND } j2 \leq TQ_{it} + TR_{it}} \sum_t \sum_m (C_{ijtm}) \leq 1 \quad j = 1, 2, \dots, 30$$

O modelo de otimização foi implementado no software LINGO versão 13.0 de 64 bits e os dados de entrada e saída foram organizados em planilha eletrônica MS Excel.

A Tabela 3 apresenta a agenda otimizada de gerenciamento dos fornos, onde é possível perceber que nunca são carregados e descarregados mais de 4 fornos por dia e para isso existe uma combinação entre as classificações das toras.

Tabela 3- Agenda do carregamento/d Descarregamento dos fornos por meio do modelo de otimização

Forno \ Dia	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30				
1	-	-	-	-	-	-	-	C	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	D	C	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	R	D	C			
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	C	Q	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	R	C	Q	Q	R	R	R	R			
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	C	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	D	-	-	C	Q	Q	Q	R	R	R	R				
4	-	-	-	-	-	-	-	-	C	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	R	D	C	Q	Q	Q	R	R	R	R	R	R				
5	-	-	-	-	-	-	C	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	R	D	C	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	D	C	Q			
6	-	-	-	-	C	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	D	C	Q	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	R	C	Q		
7	C	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	D	C	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	R	D	-	-	C	Q	Q	Q	R	R			
8	-	-	-	C	Q	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	R	R	D	C	Q	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	R	D	C			
9	-	-	-	C	Q	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	R	R	D	C	Q	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	C	Q	Q			
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	C	Q	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	Q	Q	R	R	R	R	R	R			
11	-	-	C	Q	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	R	R	D	C	Q	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	R	C	Q	Q			
12	-	-	-	-	-	C	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	R	D	C	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	R	D	-	-	C		
13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	C	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	D	-	-	C	Q	Q	Q	R	R	R	R	R			
14	-	-	-	-	-	C	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	R	D	C	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	D	C	Q	Q			
15	-	-	C	Q	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	D	C	Q	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	C	Q	Q			
16	-	-	-	-	C	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	R	R	D	C	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	D	-	-	C	Q		
17	-	C	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	D	C	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R			
18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	C	Q	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	D	C	Q	Q	Q	
19	C	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	D	C	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	R	R	D	-	-	C	Q	Q	Q	R	R		
20	-	-	-	-	C	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	R	R	D	C	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	D	-	-	C	Q		
21	-	-	-	-	-	-	C	Q	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	R	R	D	C	Q	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R			
22	-	-	-	-	-	-	C	Q	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	D	C	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	D	-	C			
23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	C	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	R	R	D	C	Q	Q	R	R	R	R	R			
24	-	-	-	-	-	-	C	Q	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	R	R	D	C	Q	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R			
25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	C	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	D	C	Q	Q	R	R	R	R	R	R	D	-			
26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	C	Q	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	Q	Q	R	R	R	R	R	R		
27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	C	Q	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	R	R	D	C	Q	Q	R	R	R	R	R		
28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	C	Q	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	Q	Q	R	R	R	R	R		
29	-	-	-	-	C	Q	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	R	R	D	C	Q	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	R	R	D		
30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	C	Q	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	D	C	Q	Q	Q	R		
31	-	-	-	C	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	D	C	Q	Q	R	R	R	R	R	R	D	C	Q	Q	R	R		
32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	C	Q	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	D	C	Q	Q	Q	R	R	R	R		
33	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	C	Q	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	Q	Q	R	R	R	R	R		
34	-	-	-	-	-	-	-	-	-	C	Q	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	R	R	D	C	Q	Q	Q	R	R	R	R	R		
35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	C	Q	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	R	R	D	C	Q	Q	Q	R	R	R	R		
36	-	-	-	C	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	D	C	Q	Q	R	R	R	R	R	R	D	-	-	C	Q	Q		
37	-	-	-	-	-	-	-	-	-	C	Q	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	D	C	Q	Q	Q	R	R	R	R	R	
38	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	C	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	R	R	D	C	Q	Q	R	R	R	R	R	R	D	
39	-	C	Q	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	D	C	Q	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	C	Q	Q	R	R	
40	-	-	C	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	D	C	Q	Q	R	R	R	R	R	R	D	C	Q	Q	R	R		
41	C	Q	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	D	C	Q	Q	Q	R	R	R	R	R	R	D	C	Q	Q	Q		
42	C	Q	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	D	C	Q	Q	Q	R	R	R	R	R	R	C	Q	Q	R	R		
43	-	-	-	-	-	C	Q	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	R	D	C	Q	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R		
44	-	C	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	D	C	Q	Q	R	R	R	R	R	R	D	-	-	C	Q	Q	Q	R
45	-	-	C	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	D	C	Q	Q	R	R	R	R	R	D	-	-	C	Q	Q	Q	
46	-	C	Q	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	D	C	Q	Q	Q	R	R	R	R	R	R	D	C	Q	Q	Q		
47	-	-	-	-	-	C	Q	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	R	D	C	Q	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	
48	-	-	-	-	-	-	-	-	-	C	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	D	C	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	D
Carga	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4			
Queima	0	4	8	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10			
Resfriamento	0	0	0	2	6	10	14	18	22	26	28	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	28	30	28	29	29	29	28	29	29	30			
Descarga	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	4	2	3	3	3	2	3	3		

5- CONCLUSÃO

- Com o auxílio da Programação Linear Inteira Mista foi possível ajustar o carregamento e descarregamento dos fornos da planta de carbonização.
- O modelo desenvolvido permitiu que apenas 4 fornos fossem carregados e descarregados no dia, utilizando as 2 máquinas disponíveis na planta de carbonização.
- Como algumas variáveis foram simuladas utilizando um embasamento teórico, um modelo mais completo pode ser gerado com uma análise mais complexa das variáveis por meio de medições de tempos e movimentos.

Bibliografia

ARCE, J. E. **Um sistema de análise, simulação e otimização do sortimento florestal em função da demanda por multiprodutos e dos custos de transporte.** Tese. Curitiba, 2000. 121 p.

ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA - AMS. Números do setor. Belo Horizonte: AMS, 2009. Disponível em: <<http://www.silviminas.com.br>>. Acesso em: 20 de outubro de 2013.

ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA - AMS. Números do setor. Belo Horizonte: AMS, 1997. Disponível em: <<http://www.silviminas.com.br>>. Acesso em: 20 de outubro de 2013.

ABRAF- Anuário Estatístico da Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas- Ano base 2012. 146p, 2013

ABRACAVE - Associação Brasileira de Carvão Vegetal- Anuário Estatístico. 1998.

BUONGIORNO J.; GILLESS J.K.. Forest management and economics. A primer in Quantitative Methods. **Macmillan Publishing Co. New York.** 285 p. 1987

CHAEBO, G, CAMPEÃO, P, KODAMA, A. K, SANTOS, A. B, NORILLER, R. M. Silvicultura em Mato Grosso do Sul: Desafios e perspectivas a formulação de um arranjo produtivo local. **In:** 48º Congresso da Sociedade Brasileira de Economia e , Administração e Sociedade Rural. 2010, 1-17p.

COELHO JUNIOR, L. M., REZENDE, J. L. P., SÁFADI, T., CALEGARIO, N. Análise temporal do preço do carvão vegetal oriundo de floresta nativa e de floresta plantada. **Scientia Forestalis.** n. 70, p. 39-48, abril 2006.

GOMES,P.A, OLIVEIRA, M. R. Teoria da carbonização da madeira. **In:** PENEDO, W.R. (comp), Uso da madeira para fins energéticos. Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais, CETEC-MG/SPT-001, Belo Horizonte, 1980, p 27-42.

GROSSI, Â. L. M. **Gerenciamento e simulação das operações de carbonização da V&M florestal.** Projeto Final do Curso. Belo Horizonte, 86p, 2004.

JUVILLAR, J.B. Tecnología de transformação de madeira em carvão, *In:* PENEDO, W.R. (comp.) Uso da madeira para fins energéticos. CETEC-MG/SPT-001, Belo Horizonte,1980, p 62-82.

OLIVEIRA, A. C., CARNEIRO, A. C. O., PEREIRA, B. L. C.; VITAL , B.R.; CARVALHO, A. M. M. L.; TRUGILHO, P. F.; DAMÁSIO, R. A.P. Otimização da produção do carvão vegetal por meio do controle de temperaturas de carbonização. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.37, n.3, p.557-566, 2013.

PALUDZYSYN FILHO, E. Melhoramento do eucalipto para a produção de energia. **Revista Opiniões**, Ribeirão Preto, jun-ago 2008. Disponível em:

<http://www.revistaopinioes.com.br/cp/edicao_materias.php?id=15> Acesso em: 20 de outubro 2013.

PENEDO, W.R. Madeira, carvão e gusa, In Penedo, W.R. (comp.) Uso da madeira para fins energéticos, Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais, CETEC- MG/SPT-001, Belo Horizonte, 1980, p.113 -142.

RAAD, TÚLIO JARDIM; PINHEIRO, PAULO CÉSAR DA C. E YOSHIDA, MARIA IRENE. Equação Geral de mecanismos cinéticos da Carbonização do Eucalyptus spp. **Revista Cerne**, Lavras, v. 12, n. 2, p. 93-106, abr./jun. 2006.

REZENDE, J. B.; SANTOS, A. C. A cadeia produtiva do carvão vegetal em Minas Gerais: pontos críticos e potencialidades. **Boletim Técnico** n 95. Viçosa, 2010.

REZENDE, J.L.P; COELHO JUNIOR, L.M; OLIVEIRA, A.D.A. Economia florestal mineira vis-a-vis à economia florestal brasileira. Simpósio de sólidos de eucalipto: avanço científicos e tecnológicos. **Anais...** Lavras: UFLA, 2002.

RODRIGUES, F. L, SILVA, G. F., LEITE, H. G., XAVIER, A. C., PEZZOPANE, J. E. M. Um modelo de regulação florestal e suas implicações na formulação e solução de problemas com restrições de recobrimento. **R. Árvore**, Viçosa-MG, v.30, n.5, p.769-778, 2006.

SANTOS, A. C. B. **Modelagem e Controle de um Forno de Carbonização da VMFL**. Monografia. Belo Horizonte. 53 p, 2008.

SILVA, E. M.; SILVA, E. M.; GONÇALVES, V.; MUROLO, A. C. Pesquisa operacional. São Paulo: Ed. Atlas, 1995.

TAHA H.A. 1994. Investigación de operaciones. 5ª ed. Ed. Alfaomega, México. 960 p.

TRUGILHO, Paulo Fernando e SILVA, Dimas Agostinho da. Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas e químicas do carvão vegetal de Jatobá (*Himenea courbaril* L.). **Scientia Agraria** (UFPR), UFPR-Curitiba, v. 2, n. 1-2, p. 45-53, 2001.

VALENTE, O. F. Carbonização de madeira de eucalipto. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.12, n.141, p.74-82, set. 1986.

VELLA, M. M. C. F., VALENTE, O. F., VITAL, B. R., LELLES, J. G. Influência da velocidade de carbonização da madeira nos rendimentos e nas propriedades do carvão produzido. IPEF, n.41/42, p.64-76, Viçosa – MG. Jan./Dez.1989.

ZUCHI, P. S. Avaliação ergonômica do trabalho na atividade de carvoejamento. **In:** 1o Simpósio Brasileiro sobre Ergonomia e Segurança do Trabalho Florestal e Agrícola – ERGOFLOR, 2000. 33-46p

ZUCHI, P. S. **A evolução na produção de carvão vegetal e suas repercussões na produtividade e qualidade do carvão, nas condições de trabalho**. 2001. 143f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

