UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA

ALINE MARTINS FERREIRA

OTIMIZAÇÃO DA PROGRAMAÇAO DE TRENS DE MINÉRIO: PROBLEMA DE SCHEDULING UTILIZANDO ALGORITMO BRANCH AND BOUND

JUIZ DE FORA
2010

ALINE MARTINS FERREIRA

OTIMIZAÇÃO DA PROGRAMAÇAO DE TRENS DE MINÉRIO: PROBLEMA DE SCHEDULING UTILIZANDO ALGORÍTMO BRANCH AND BOUND

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Produção.

Orientador: Dr., Fernando Marques de Almeida Nogueira

JUIZ DE FORA

2010

Ferreira, Aline Martins.

Otimização da programação de trens de minério: problema de *scheduling* utilizando algoritmo *branch and bound* / Aline Martins Ferreira. – 2010.
43 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção)—Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2010.

1. Transporte ferroviário – aspectos econômicos. 2. Programação. 3. Minérios de ferro. I. Título.

CDU 656.2:338(81)

ALINE MARTINS FERREIRA

OTIMIZAÇÃO DA PROGRAMAÇAO DE TRENS DE MINÉRIO: PROBLEMA DE SCHEDULING UTILIZANDO ALGORITMO BRANCH AND BOUND

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Produção.

Aprovada em 21 de julho de 2010.

BANCA EXAMINADORA

_____

Fernando Marques de Almeida Nogueira (Orientador)
Universidade Federal de Juiz de Fora

_____

Diogo Antônio Rodrigues
Universidade Federal de Juiz de Fora

_____

Marcelo Neder Machado
Universidade Federal de Juiz de Fora

Ao meu filho, João Vítor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

A meus pais, João e Dulcinéa, pela dedicação, apoio e amor incondicional. Por acreditarem no meu sonho e pelo exemplo de vida. Ao meu filho, João Vítor, minha maior riqueza. A minha irmã, Flávia, e toda minha família, por sempre me incentivarem durante toda minha vida.

Ao meu orientador Fernando que sempre foi atencioso e acessível, sempre pronto a resolver os problemas relacionados ao trabalho.

Aos demais membros da banca, Diogo e Marcelo, que prontamente atenderam ao convite de composição de banca deste trabalho.

Aos professores da UFJF pela atenção e pelo conhecimento transferido durante todo o curso.

A turma Tsunami e a todos os meus amigos pelo companheirismo.

RESUMO

Atualmente a sobrevivência e a competitividade das empresas estão relacionadas à eficiência na utilização dos seus recursos. Neste contexto, as empresas buscam soluções de otimização dos processos produtivos. Os problemas de otimização são complexos e envolvem significativas reduções de custos, melhorias de tempos de processos, ou melhor, alocação de recursos em atividades. O transporte ferroviário possui vários problemas de planejamento da estrutura logística, destacando a programação de rotas de trens. O propósito deste trabalho é resolver problema de *Scheduling* relacionado à programação de trens através de um modelo de Programação Linear Inteira utilizando o algoritmo *"Branch & Bound"* para sua resolução. Tal modelo pretende auxiliar a tomada de decisão, encontrando a melhor solução possível, tendo como conseqüência à redução da formação de filas de trens nos terminais de carga e descarga. O trabalho será baseado na empresa MRS Logística S. A. no transporte ferroviário de minério.

Palavras-chaves: Otimização. *Scheduling*. Programação de trens.

ABSTRACT

Currently the survival and competitiveness of organizations are related to the efficient use of resources. In this context, organizations are seeking solutions for optimization of production processes. The optimization problems are complex and involve significant cost reductions, improvements in process times, or better allocation of resources in activities. Rail transport has several problems of logistics planning and routing of trains. The purpose of this paper is to solve the problem related to scheduling of trains through an Integer Linear Programming model using the algorithm Branch & Bound for its resolution. This model aims to help decision making, finding the best possible solution, resulting in the reduction of queuing of trains at terminals for loading and unloading. The work will be based on data from the company MRS Logística S. A. rail transport of ore.

Keywords: Optimization. Scheduling. Scheduling trains.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

ILUSTRAÇÃO 1 - MALHA MRS LOGÍTICA 21
ILUSTRAÇÃO 2 - PRODUÇÃO ANUAL EM MILHARES TONELADAS (2003/2008) 22
ILUSTRAÇÃO 3 – MAPA ESQUEMÁTICO DA MALHA DA MRS LOGÍSTICA 24
ILUSTRAÇÃO 4 - MALHA MRS LOGÍSTICA E OS TRENS DE MINÉRIO 25
ILUSTRAÇÃO 5 - PONTOS DE CARGA E DESCARGA DE MINÉRIO 26
QUADRO 1 – MODELO MATEMÁTICO UTILIZADO 29
QUADRO 2 – DESCRIÇÃO DAS VARIÁVEIS DO MODELO MATEMÁTICO. 30

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – DEMANDA..... 31
TABELA 2 – DEMANDAS VARIADAS PARA 15 TRENS..... 32
TABELA 3 – RESULTADOS ALCANÇADOS DAS DEMANDAS DAS TABELAS 1 E 2. 32
TABELA 4 – SOLUÇÃO ÓTIMA: VARIÁVEL FLUXO..... 33

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 10

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS 10

1.2 JUSTIFICATIVA 12

1.3 ESCOPO DO TRABALHO 12

1.4 OBJETIVO 12

1.5 DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA 13

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO 13

2 REVISÃO DE LITERATURA 15

2.1 PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO 15

2.2 SCHEDULING OU SEQUENCIAMENTO DA PRODUÇÃO 17

2.3 PROGRAMAÇÃO LINEAR 18

2.4 PROGRAMAÇÃO INTEIRA 19

2.5 BRANCH AND BOUND 20

3 DESENVOLVIMENTO 21

3.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA 21

3.1.1 DESCRIÇÃO DA UNIDADE DE ANÁLISE – MRS LOGÍSTICA 21

3.1.2 O TRANSPORTE FERROVIÁRIO DE MINÉRIO 24

3.2 MODELO DE OTIMIZAÇÃO 27

4 RESULTADOS 31

5 CONCLUSÕES 34

REFERÊNCIAS 35

ANEXOS 37

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O aumento das exportações brasileiras, principalmente de *commodities*, nos últimos anos levou a um considerável aumento na demanda de transporte ferroviário. Como não houve investimento significativo em infra-estrutura, o crescimento da demanda tem exigido um complexo planejamento para ser atendida. Desse modo, a otimização do planejamento do transporte é um alternativa ao baixo investimento na infra-estrutura física observada no setor.

Uma maneira de otimizar o planejamento do transporte no setor ferroviário consiste em otimizar a programação diária dos trens de uma empresa. No Brasil, a grande maioria do volume transportado pelo modal ferroviário é realizada por um modo de operação de transporte específico denominado erroneamente* por *Heavy Haul*. Os produtos típicos transportados no modo *Heavy Haul* são os minérios. No Brasil, pode-se destacar o minério de ferro, bauxita e carvão mineral (coque).

Os clientes que demandam o transporte de cargas *Heavy Haul* destacam-se no cenário nacional entre as maiores empresas do país. Com isso, o transporte de cargas *Heavy Haul* é um setor de extrema importância para o setor ferroviário, uma vez que mesmo pequenas alterações podem vir ocasionar fortes impactos na economia em geral de uma empresa.

No modo *Heavy Haul* um trem é designado para atender um único cliente (trem unitário) e geralmente um único produto é transportado. Os fluxos se dão entre um terminal de carga e um de descarga (fluxo carregado) e vice-versa (fluxo vazio). Os trens não possuem grades de horário fixas, estando a disposição para circulação tão logo finalize-se a carga ou a descarga.

Uma vez que os trens operam em um circuito fechado, é comum utilizar um pátio ferroviário como um marco de referência (Origem) do horário de chegada de cada trem neste pátio. Assim, para todo trem que partiu deste pátio de origem, pode-se estimar o horário que este mesmo trem irá retornar a este pátio, em função da definição da sua rota, que no caso do *Heavy Haul*, consiste basicamente em definir o terminal de carga e o de descarga.

---

* *Heavy Haul* é o tipo de carga, porém este termo é também utilizado para especificar o modo de operação de transporte.

O principal indicador de produção no modo *Heavy Haul* é o tempo de ciclo dos trens em função de seus fluxos. Após a partida de um trem do pátio de origem, entende-se como o tempo de ciclo o período demandado por este trem retornar a este pátio de origem. Uma vez que os períodos de transito entre os terminais de carga e descarga, bem como os períodos de carga e de descarga são tratados como parâmetros (são fixos), a otimização na atividade de programação consiste em minimizar os períodos de filas nos terminais de carga e descarga dos trens, ou em termos práticos, a programação ótima dos trens *Heavy Haul* para um dado horizonte temporal é aquela que minimiza a quantidade total de tempo em fila dos trens.

A programação diária dos trens que operam no modo *Heavy Haul* consiste, resumidamente, em programar a quantidade, as rotas e demais necessidades envolvidas em cada trem, visando o atendimento pleno do volume de transporte demandado por cada cliente em cada terminal ferroviário. (BRINA, 2002 apud NOGUEIRA *et. al.*, 2006).

A programação de trens que operam no modo *Heavy Haul* pode ser entendida como um problema de *Scheduling* (Pinedo, 2002; Leung, 2000).

Scheduling trata em geral de alocações de recursos escassos para tarefas em função do tempo. É um processo de tomada de decisão com meta de otimização de um ou mais objetivos (Pinedo, 2002). No caso da programação de trens que operam no modo *Heavy Haul* e utilizando o jargão da área de *Scheduling*, os terminais de carga e descarga são os recursos (ou máquinas) e os trens os jobs (produtos).

Conforme é destacado por MARÓTI (2006), o homem tem obtido ganhos de habilidade na resolução de grandes problemas ou problemas de elevada complexidade, graças ao uso da computação associada à modelagem matemática, que tem permitido auferir ganhos econômicos e operacionais significativos.

Diversos desses problemas podem ser modelados e resolvidos usando métodos de solução exato ou heurístico, gerando bons resultados no que diz respeito à economia de custos. O modelo proposto é baseado no método exato, em programação linear inteira utilizando o algoritmo *Branch & Bound*.

1.2 JUSTIFICATIVA

A área de Logística de Transporte é considerada por alguns autores como a última grande fronteira inexplorada para a redução de custos. Em um contexto de demandas crescentes e recursos limitados, os modelos de otimização tem um papel de destaque no melhor gerenciamento eficiente destes recursos.

O mercado mundial de minério tem uma expectativa de crescimento, com isso há uma demanda crescente pelo transporte ferroviário de cargas. A MRS Logística S.A. tem o minério de ferro como o principal produto transportado em termos de volume e receita gerados. Para se adequar a este cenário é importante a busca por soluções que aumente a eficiência da programação de trens de minério. Devido à complexidade no processo de planejamento e programação de operações ferroviárias a Pesquisa Operacional facilita a otimização destes recursos.

1.3 ESCOPO DO TRABALHO

O tema aborda o problema de *Scheduling* relacionada à programação de trens, tais soluções auxiliam as empresas ferroviárias na tomada de decisão.

A MRS Logística já possui um Sistema de Otimização da Programação de Trens de Minério, no entanto, no Brasil, muitas empresas de transporte ferroviário utilizam o bom senso e experiências passadas para solucionar os problemas de tomada de decisão. Tais decisões apesar de conduzirem a soluções adequadas, em geral não garantem uma decisão ótima sob o aspecto considerado, com isso este trabalho pode servir como referência a essas empresas. Cabe ressaltar que este trabalho é uma apresentação do problema e mostra o método de resolução de uma forma simplificada.

1.4 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é propor uma solução para o problema de *Scheduling* relacionado à programação diária de trens *Heavy Haul*, através da técnica *Branch & Bound*.

1.5 DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA

A elaboração do diagnóstico da atividade de programação de trens de minério aborda o mapeamento do problema, análise da dinâmica do transporte ferroviário e o desenvolvimento de um modelo matemático de otimização da programação de trens de minério. Para isto, é necessário extrair informações através de coleta de dados e sua respectiva análise.

O modelo de otimização emprega técnicas de *Scheduling*, com o desenvolvimento de um programa baseado em Programação Linear Inteira. O programa utiliza o *software* Lingo 8.0. Este *software* é uma ferramenta de simples utilização e serve para resolver e analisar soluções para problemas de grande porte em Programação Linear e não Linear. Possui linguagem de modelagem própria e trabalha com 4 *solvers*: direto, linear, não linear e um gerenciador *de Branch & Bound*. Os modelos inteiros são resolvidos através do método *Branch & Bound*.

A justificativa para a elaboração do método *Branch & Bound* se deve ao fato do mesmo garantir a solução ótima para o problema *Scheduling*, o que não ocorre com os métodos heurísticos que podem oferecer soluções sub-ótimas.

Vale salientar que com este trabalho obteve-se um modelo para o seqüenciamento, ou seja, foram definidos parâmetros e regras aplicadas, que se utilizados irão gerar melhores resultados para a atividade, não se criou uma ferramenta para uso cotidiano pela empresa. Objetiva-se a apresentação de um algoritmo que seja passível de solucionar o problema em questão.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O Capítulo 1 situa o leitor quanto ao assunto abordado e a proposta desenvolvida, bem como as limitações desta pesquisa. No seu desenvolver, são descritos o objetivo do trabalho, a metodologia e a descrição sucinta de cada capítulo.

O Capitulo 2 envolve a revisão bibliográfica com levantamento de livros e publicações que auxiliaram no desenvolvimento do estudo. São introduzidos os conceitos de planejamento e controle da produção, *Scheduling*, programação linear, programação linear inteira e o método *Branch & Bound*.

No capítulo 3 é descrito em detalhes o problema abordado. Na primeira parte contextualiza a empresa MRS Logística e o transporte ferroviário de minério. Na segunda parte, apresenta o modelo de otimização, desenvolvendo a modelagem de programação matemática, abordando suas definições e peculiaridades.

No capítulo 4 são apresentados, discutidos e analisados os resultados obtidos pela aplicação do modelo proposto a um conjunto de diferentes cenários de demanda. E no capítulo 5 apresentam-se as considerações finais e recomendações para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO

Segundo BONNEY (2000), a função Planejamento e Controle da Produção (PCP) e seus sistemas associados tem o objetivo de planejar e controlar a produção de forma que a empresa atinja os requisitos de produção do modo mais eficiente possível.

Para SLACK *et al.* (2002) o PCP tem o propósito de garantir que a produção ocorra eficaz e eficientemente e produza produtos e serviços conforme requeridos pelos consumidores. Isto requer que os recursos produtivos estejam disponíveis: na quantidade adequada; no momento adequado; e no nível de qualidade adequado.

De acordo com CORREA *et al.* (2001) o planejamento e controle da produção envolve uma série de decisões com o objetivo de definir o que, quanto e quando produzir e comprar, além dos recursos a serem utilizados.

CARSON apud RUSSOMANO (1986, p.42) define o planejamento e controle de produção como:

> "[...] ele envolve geralmente a organização e o planejamento do processo de fabricação. Especificamente, se constitui no planejamento do sequenciamento de operações, da programação, da movimentação e da coordenação da inspeção, e no controle de materiais, métodos, ferramentas e tempos operacionais. O objetivo final é a organização do suprimento e movimentação dos recursos humanos, utilização de máquinas e atividade relacionadas, de modo a atingir os resultados de produção desejados, em termos de quantidade, qualidade, tempo e lugar".

O planejamento e controle da produção otimiza as áreas produtivas, buscando os melhores resultados de produtividade e funcionamento de máquinas, sem esquecer dos compromissos assumidos com os clientes referentes à volumes e prazos de entrega, oferecendo serviço com qualidade e baixo custo. Por isso, a necessidade de se buscar uma maior eficiência nos sistemas de PCP.

De acordo com TUBINO (2000) um dos objetivos atribuídos ao PCP é "Coordenar e aplicar os recursos produtivos da melhor maneira possível para atender o plano estratégico, tático e operacional", ou seja, significa fazer algo da maneira correta e escolher a coisa certa a ser feita. Sendo eficiente e eficaz, com o

propósito de atuar nos meios de produção para conseguir eficiência de acordo com objetivos da organização aumentando a sua eficácia.

As funções de Planejamento e controle da produção aparecem nos três níveis hierárquicos do sistema de produção:

Nível estratégico: "...consiste em estabelecer um plano de produção para determinado período (longo prazo) segundo as estimativas de vendas e a disponibilidade de recursos financeiros e produtivos..."(TUBINO, 2000). O plano de produção gerado tem como finalidade possibilitar a adequação dos recursos produtivos à demanda esperada dos mesmos.

O planejamento estratégico está relacionado à tomada de decisão pela alta administração e à existência de riscos financeiros que podem afetar a empresa por um prazo relativamente longo (MOREIRA, 1996). As estratégias estão voltadas às mudanças estruturais na empresa para propiciar a competitividade nos próximos anos, determinando os objetivos da empresa a longo prazo, definindo as metas globais da empresa e as políticas adequadas para atingi-las. Como exemplo, instalação de fábricas e compra de equipamentos.

Os problemas estratégicos tratam de decisões mais estruturais da ferrovia, com impacto de longo prazo e efeito duradouro (MELO, 2008), como por exemplo, o projeto da malha viária e de sua expansão, construção, melhoria ou mesmo desativação de trechos; a aquisição de recursos tais como locomotivas e vagões e outros (HAMACHER, 2005).

Nível tático: "...consiste em estabelecer um plano mestre de produção de produtos finais, detalhando a médio prazo, período a período, a partir de um plano de produção, com base nas previsões de vendas de médio prazo ou nos pedidos em carteira já confirmados..." (TUBINO,2000).

O planejamento tático é responsável pela utilização eficiente dos recursos disponíveis a fim de cumprir os objetivos determinados no planejamento estratégico. Tem por objetivo a efetiva alocação de recursos para satisfazer a demanda, levando em conta os custos envolvidos.

Nesta etapa devem ser tomadas as decisões de médio prazo que afetam a área de produção, por exemplo, plano de produção ao longo de um horizonte de tempo e manutenção de máquinas. Normalmente, essas decisões definem estratégias a serem adotadas na ferrovia, modos de operação e planos válidos por um período razoável de tempo (por exemplo, um mês) (MELO, 2008).

Nível operacional: consiste em preparar a programação e o acompanhamento e controle da produção em curto prazo. Sendo que a função de programação é estabelecer a curto prazo quando e quanto comprar, fabricar ou montar de cada item necessário à composição dos produtos finais...” (TUBINO,2000).

Em função da disponibilidade dos recursos produtivos, a programação da produção encarrega-se de fazer o sequenciamento das ordens emitidas, de forma a otimizar a utilização dos recursos.

O planejamento operacional trata das decisões do dia-a-dia tendo como função executar os planos definidos anteriormente, ou seja, faz a programação detalhada da produção. As decisões operacionais na ferrovia podem afetar a execução e ajuste das programações de serviços, atividades de manutenção, roteamento e despacho de trens, e a alocação dinâmica de recursos escassos (HAMACHER, 2005).

2.2 SCHEDULING OU SEQUENCIAMENTO DA PRODUÇÃO

O *Scheduling* ou sequenciamento de produção é um arranjo de princípios, modelos, técnicas e conclusões lógicas que permitem a alocação dos recursos indispensáveis à realização de determinadas tarefas de acordo com seus tempos de execução (BAKER, 1974).

A função do *Scheduling* é apresentar as possíveis soluções de sequenciamento de forma a reduzir o tempo total de execução. A programação da produção tem como um de seus objetivos maximizar a taxa de produção e minimizar o tempo total do fluxo de operação.

As técnicas de *Scheduling* visam o crescimento da capacidade produtiva e redução de custos, reduzindo o tempo de ciclo e menor ociosidade dos equipamentos. Desta forma, uma troca na programação de operações pode resultar em economias na produção.

De um modo geral o problema de *Scheduling* pode ser definido como a alocação de recursos no tempo, de forma a executar um conjunto de tarefas (MACCARTHY e LIU, 1993). Ou seja, procura a melhor ordem numa seqüência de tarefas em máquinas para aumentar a eficiência de processos.

Recursos podem ser requeridos para a execução das tarefas, bem como prioridades na execução e disponibilidade das máquinas. De acordo com SLACK *et*

al. (2002) as prioridades dadas ao trabalho em uma operação são frequentemente estabelecidas por um conjunto predefinido de regras. Algumas dessas regras são relativamente complexas. Requerem vários tipos de informações, mas podem ser úteis quando sequenciando tarefas por meio de arranjos complexos nos centros de produção de trabalho. Outras são mais diretas. Tais como: Restrições físicas; Prioridade ao consumidor; Data prometida; LIFO (último a entrar, primeiro a sair); FIFO (primeiro a entrar, primeiro a sair).

A atividade de scheduling das operações é uma das mais complexas. O "*Scheduling* especifica o tempo em que cada trabalho começa e termina em cada máquina, bem como os recursos adicionais necessários" (SIPPER; BULFIN, 1997, p. 383). De acordo com SLACK *et al.* (2002) os programadores têm que lidar com diversos tipos de recursos simultaneamente, dessa forma, o número de alternativas possíveis cresce rapidamente à medida que o número de atividades e de processos aumenta.

Estas atividades apresentam relação direta com o sistema de produção (projeto, *Job Shop*, batelada, ou repetitivos), pois são desenvolvidas essencialmente no interior deles (WILD, 2003, p. 356).

2.3 PROGRAMAÇÃO LINEAR

Um problema qualquer de programação linear é um problema de otimização, ou seja, busca pela melhor dentre várias situações, utilizando um critério preestabelecido de otimalidade, com as seguintes características (BRONSON; NAADIMUTHU, 1997):

- Variáveis de decisão, ou seja, variáveis manipuláveis no procedimento de busca pelo ótimo;
- Função objetivo, uma função linear formada com as variáveis de decisão, que compõe o critério de otimização, devendo ser maximizada ou minimizada;
- Restrições do modelo, relações entre interdependência entre as variáveis de decisão que se expressa por um conjunto de equações ou inequações lineares.
- As variáveis de decisão podem assumir valores pré-estabelecidos, valores positivos, negativos ou ambos.

Em síntese, a programação linear são problemas de utilização dos recursos disponíveis em que buscam utilização ótima dos mesmos, observando-se limitações impostas pelo processo produtivo ou pelo mercado. A programação linear é uma das muitas técnicas analíticas recentemente desenvolvidas que se têm mostrado úteis na resolução de certos tipos de problemas empresariais, tendo diversas aplicações no controle gerencial, como por exemplo, a administração de produção, análise de investimentos, logística empresarial, problemas de transportes.

A formulação para um problema de Programação Linear:

MAXIMIZE (OU MINIMIZE)

$$z = \sum_{j \in N} c_j x_j, N = \{1,.....,n\} \quad (1)$$

SUJEITO A:

$$\sum_{j \in N} a_{ij} x_j (\leq, = ou \geq) b_i, i \in M = \{1,2,....,m\} \quad (2)$$

$$x_j \geq 0, j \in N \quad (3)$$

No qual c_j, a_{ij} e b_i são constantes conhecidas para todo i e j, e x_j são variáveis não negativas.

2.4 PROGRAMAÇÃO INTEIRA

A programação inteira é a denominação dada a problemas de programação linear em que as variáveis de decisão pertencem a um domínio discreto, isto é, só podem assumir valores inteiros. Esta possui formulação semelhante à Programação Linear, pois a função objetivo e as restrições devem ser lineares.

Os problemas de otimização podem ser de minimização ou de maximização. Em ambos os casos, temos uma função aplicada a um domínio finito, que em geral é enumerável. São problemas em que as variáveis de decisão devem ser necessariamente inteiras, não tendo sentido assumirem valores fracionários como, por exemplo, em uma montadora de veículos que se deseja determinar a quantidade ótima a ser produzida, designação de pessoas, ou até mesmo discretizar a variável tempo, para se trabalhar com dimensões tecnicamente mensuráveis (horas, dias, etc.).

Muitos modelos práticos de programação inteira restringem algumas das variáveis inteiras para valores “0” ou “1” e, neste caso, tem-se um problema de Programação Linear Inteira Binária. Estas variáveis são usadas para decisão, em que se deve escolher entre uma ou outra alternativa: sim (“1”) e não (“0”).

GAREY e JOHNSON (1979) observaram que uma modelagem que utiliza variáveis inteiras possui uma natureza combinatória de difícil resolução. A principal dificuldade na resolução destes problemas é que não são conhecidas condições de otimalidade para verificar se uma solução encontrada é o ponto ótimo ou não. Para garantir a otimalidade de uma solução é feita a comparação desta com soluções já encontradas. Desta forma, são enumeradas todas as alternativas possíveis, o que gera um custo computacional elevado para alguns problemas. Desta maneira, surge a necessidade de usar técnicas mais elaboradas para encontrar estas soluções de valor ótimo, tal como *Branch & Bound*.

2.5 BRANCH AND BOUND

Branch & Bound é um algoritmo que usa a estratégia de relaxação e separação para resolver um problema complexo. Neste método primeiro é alcançada uma solução ótima não inteira e em seguida efetuam-se partições no espaço das soluções e conclui-se a otimalidade da solução usando limites calculados ao longo da enumeração das soluções (ZIONTS, 1974).

Esse modelo utiliza uma estrutura de busca em árvore para a construção da solução, analisando, a cada ramificação, quais os nós que são qualificados, isto é, apresentam um limite inferior da solução (lower-bound ou LB), inferior ao limite superior (upper-bound ou UB).

O limite superior representa a solução inicial, ou a melhor solução completa já encontrada. Os nós que não atendem a esse requisito são descartados, eliminando-se todas as ramificações deles decorrentes. Os cálculos dos LB costumam ser simplificados. Os nós qualificados são desdobrados em novas ramificações, de modo a se buscar soluções completas melhores que o UB. Caso sejam encontradas, o valor UB é atualizado e a busca prossegue, verificando-se implicitamente todas as alternativas, até que nenhum nó possua valor LB inferior ao UB atual. (MORTON, 1993 apud OLIVEIRA, 2001).

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

3.1.1 DESCRIÇÃO DA UNIDADE DE ANÁLISE – MRS LOGÍSTICA

A MRS Logística é a concessionária que controla, opera e monitora a antiga Malha Sudeste da Rede Ferroviária Federal atuando desde o ano 1996. A malha ferroviária da MRS Logística é geograficamente privilegiada, abrange a região mais desenvolvida do país, com uma participação média aproximada de 65% do PIB brasileiro, interligando as cidades de Belo Horizonte, São Paulo e Rio de Janeiro e com acesso a importantes portos brasileiros.

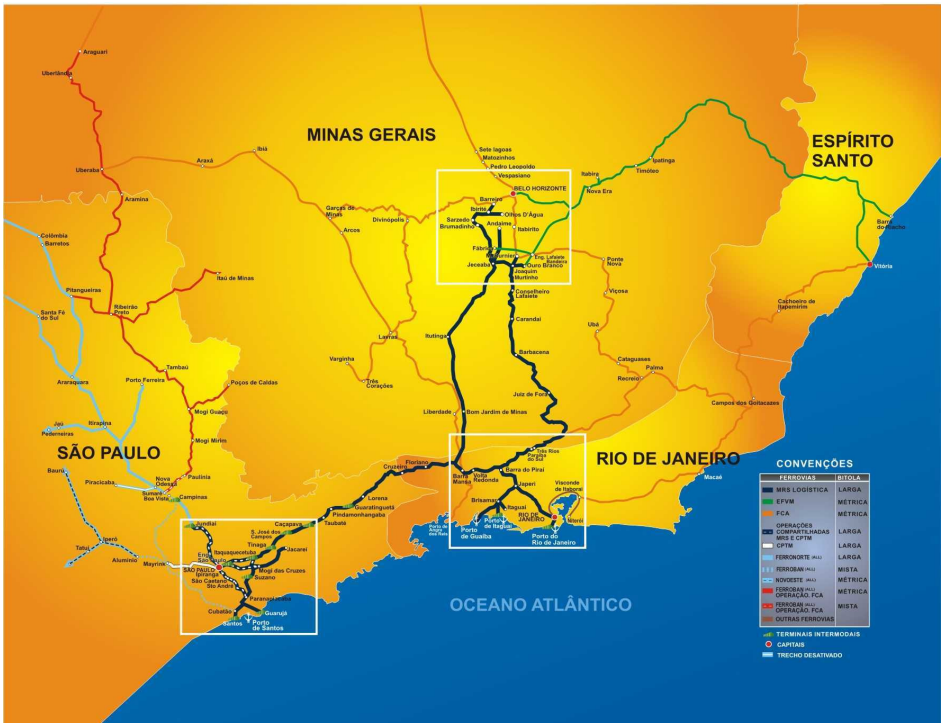

Ilustração 1 - Malha MRS Logítica
Fonte: www.mrs.com.br (2009)

Os produtos siderúrgicos transportados pela MRS destinam-se tanto ao abastecimento do mercado interno, principalmente o de São Paulo, quanto à exportação, realizada pelo Porto de Sepetiba (operado em conjunto pela CSN e pela CVRD) e pelo Porto do Rio de Janeiro.

A produção da MRS consiste de vários produtos com destaque para o transporte de minério e carga geral. O foco de suas atividades está no transporte ferroviário de cargas atendendo a indústria siderúrgica, cimenteira e da construção civil, mineração, agrícola, transporte de contêineres, carvão, coque, granéis minerais, extração vegetal e celulose, entre outras mercadorias. As atividades focam na logística integrada, envolvendo planejamento, multimodalidade e transit time definido, implicando em uma operação de logística completa.

Desde que assumiu a malha da região sudeste a MRS Logística tem aumentado constantemente sua capacidade de transporte.

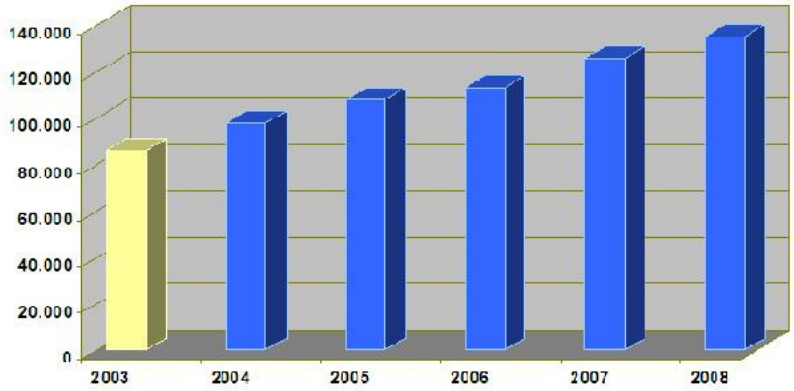

Ilustração 2 - Produção Anual em Milhares Toneladas (2003/2008)
Fonte: www.mrs.com.br (2009)

Aproximadamente 70% da totalidade das mercadorias transportadas pela MRS correspondem a minério de ferro. Esse é transportado de Belo Horizonte às plantas industriais do Rio de Janeiro e de São Paulo e aos portos de Guaíba e de Sepetiba.

O transporte de cargas na MRS se divide em dois tipos de operação: *Heavy Haul* e Carga Geral.

O transporte do tipo *Heavy Haul* apresenta características como grandes volumes e grande dependência do modal ferroviário. Consiste em cargas de maior volume como produtos de minério de ferro, bauxita e carvão e coque para siderurgia.

O transporte do tipo Carga Geral tem características diferenciadas como menores volumes e produtos distintos. Envolve diversos produtos e clientes, o que implica em pontos de carga e descarga ao longo de todo o trecho de circulação. Estes trens precisam de horários fixos para partida e chegada e para paradas

intermediárias, exigindo a elaboração de uma grade de horários e locais para as paradas desdobradas de acordo com a demanda (RODRIGUES, 2007).

No total, são 1.643 km de via, distribuídas em quatro linhas principais:

A Linha do Centro liga Belo Horizonte ao Rio de Janeiro passando por Juiz de Fora, no Estado de Minas Gerais (566 km).

A Ferrovia do Aço liga o principal ponto de carregamento de minério da empresa, denominado “Andaime”, município de Itabirito, em Minas Gerais, para a localidade de Saudade, município de Barra Mansa, no Estado do Rio de Janeiro (370 km).

A Linha de São Paulo está situada entre Barra do Piraí, no Estado do Rio de Janeiro, e a cidade de São Paulo (400 km). Nesta linha está incluído o trecho entre Saudade e Barra do Piraí (45 km), que faz conexão com a Ferrovia do Aço e a Linha do Centro e termina por ser um dos trechos mais movimentados da Malha Sudeste.

A Linha Santos-Jundiaí passa pelo Estado de São Paulo, de Jundiaí, até o porto de Santos.

Suas linhas permitem o acesso das minas de minério de ferro às principais siderúrgicas (CSN, Cosipa, Açominas e Usiminas) e ao acesso direto aos portos de Sepetiba (RJ), Santos (SP), Rio de Janeiro e Guaíba (RJ), fator que acentua sua competitividade nos segmentos destinados à exportação e importação.

Além disso, a malha ferroviária da MRS Logística possibilita alternativas de transporte para outras regiões através da interligação com as ferrovias: Ferrovia Centro-Atlântica (FCA), Estrada de Ferro Vitória-Minas (EFVM) e América Latina Logística (ALL).

A figura 03 mostra o mapa esquemático da malha da MRS Logística.

Ilustração 3 – Mapa Esquemático da malha da MRS Logística
Fonte: Rodrigues (2007)

3.1.2 O TRANSPORTE FERROVIÁRIO DE MINÉRIO

O transporte ferroviário do tipo *Heavy Haul* é realizado por meio dos chamados “trens unitários”. Estes trens são formados apenas por vagões de um único cliente, transportando apenas um tipo de produto. Existem quatro fases nesse transporte: carga, circulação do trem carregado, descarga e circulação do trem vazio. Sendo assim, estes trens não possuem horários fixos, partindo após a carga ou descarga.

O transporte é feito em um único sentido, como um “carrossel”, circulando sempre carregado para os terminais de descarga e retornando vazios para os terminais de carga.

As possíveis rotas dos trens de minério estão esquematicamente representadas na Figura:

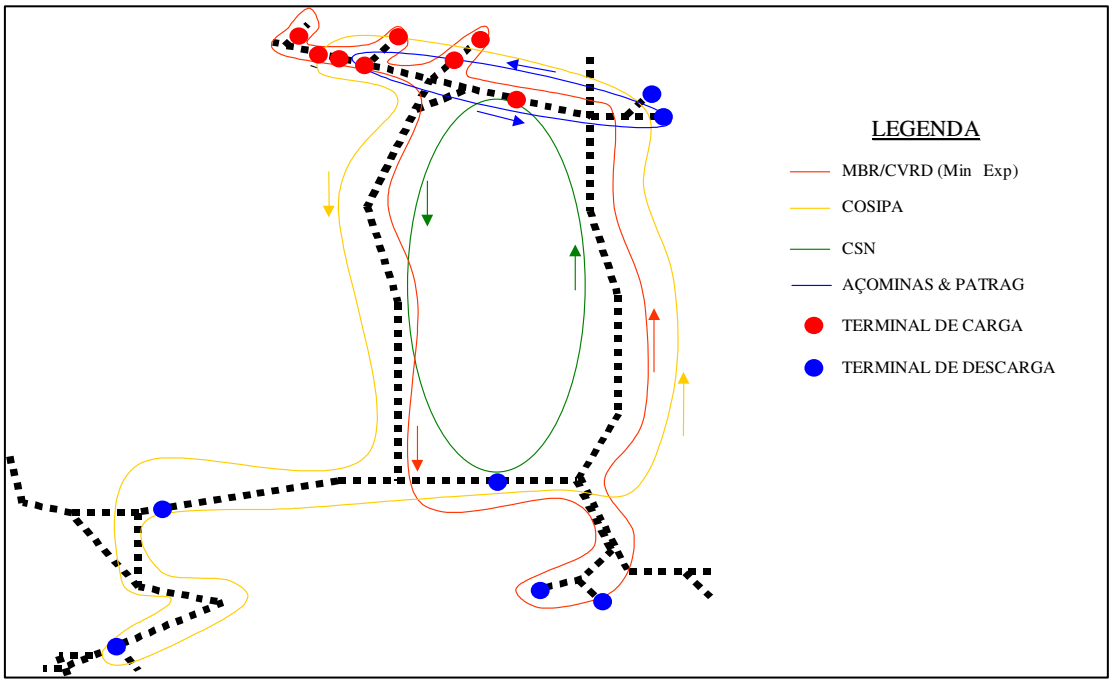

Ilustração 4 - Malha MRS Logística e os trens de minério
Fonte: Nogueira (2006)

O minério transportado pela MRS é carregado em oito terminais localizados na região do quadrilátero ferrífero em Minas Gerais, sendo os terminais de Andaime e Pires localizados na Frente Norte da Ferrovia do Aço, os terminais de Olhos D'Água, Sarzedo, Sarzedo Novo, Souza Noschese, Córrego do Feijão e Alberto Flores no ramal do Paraopeba e o terminal de Casa de Pedra na Linha do Centro.

Os principais destinos de minério de ferro são CSN (Volta Redonda), COSIPA (Piaçaguera ou São Bento), Porto de Sepetiba, Porto da Ilha de Guaíba e outros como Açominas e Patrag.

A figura abaixo mostra a localização dos pontos de carga e descarga da MRS:

Ilustração 5 - Pontos de carga e descarga de minério
Fonte: Landa (2007)

O destino de carregamento de cada trem é decidido quando o mesmo passa pelo pátio FPK, localizado na cidade de Conselheiro Lafaiete, ou por Murtinho (pátio FDM), para os trens da Açominas e Patrag.

O ciclo de produção na MRS Logística é definido como o processo que tem início em uma etapa anterior ao carregamento dos vagões, o ponto de origem (FPK ou FDM), e término quando estes vagões, após serem descarregados, atingem novamente este ponto inicial.

Os impactos proporcionados à melhoria da eficiência do ciclo de trens de minério, uma vez que estes representam cerca de 70% do transporte da empresa, tem relação direta com o aumento da produção, pela eficiência da utilização de seus recursos, e consequentemente aumento do retorno financeiro.

O objetivo é minimizar o ciclo de trens a fim de ter um maior número de vagões carregados, o que aumenta o faturamento da empresa.

3.2 MODELO DE OTIMIZAÇÃO

A programação dos trens de minério consiste em determinar as rotas de cada trem de minério que circula diariamente na malha ferroviária, visando o atendimento pleno do volume de transporte demandando por cada cliente em cada terminal ferroviário.

O ciclo de trens de minério é definido como a soma dos tempos do vagão parado na origem (FPK ou FDM) para manutenção, do percurso com o trem vazio para o ponto de carga, do vagão parado no ponto de carregamento, do percurso com o trem carregado, do vagão parado no ponto de descarga e do tempo de percurso do trem vazio do ponto de descarga a novamente ao ponto de origem. O critério para a programação de trens de minério considera este ciclo de produção.

O objetivo da programação de trens ao longo da malha é o aumento do faturamento diário do serviço, para isto deve-se minimizar o ciclo e reduzir a formação de filas de trens.

Segundo NOGUEIRA *et. al.* (2006) os fatores que influenciam o problema de programação de trens de minério são:

- Objetivos da Programação: atender os cenários existentes; respeitar a política de programação; diminuir tempos de ciclos de trens; minimizar filas; disponibilizar maior número de trens para a programação; aumentar a produtividade;
- Políticas da Empresa: inexistência de grades de horários; regras de direcionamento; manutenção dos trens; os trens operam 24hs por dia; prioridades diárias a serem atendidas;
- Parâmetros: tempo de terminais; capacidade dos terminais; oferta e demanda de terminais; manutenção de terminais;
- Variável Crítica: fluxos;
- Indicadores Operacionais: tempo total esperado na fila na carga; tempo total esperado na fila na descarga; probabilidades de haver fila para cada programação; disponibilidade de trens; tempos de ciclos; produção diária.

O trabalho em questão se propõe a apresentar uma solução para o problema de *Scheduling* de trens de minério. A função do *Scheduling* é apresentar as possíveis soluções de sequenciamento de trens de forma a reduzir o tempo total de percurso (ciclo), conforme as informações referentes à sequência das operações, à

relação entre as tarefas a serem realizadas e às restrições às quais elas devem obedecer.

A solução ótima encontrada é a solução que o ciclo de trens seja o menor possível, ou seja, os trens nos terminais estão menos expostos a filas.

Os dados considerados para este problema foram:

- O pátio de origem;
- O horário da tabela no ponto de origem;
- A demanda de cada tipo de trem com o respectivo destino carga-descarga;
- Os tempos de viagem entre as estações;
- O tempo de carregamento e descarga.

A modelagem do problema, que se apresenta como de Programação Linear Inteira, é estabelecida da seguinte forma:

- Função Objetivo: minimizar o tempo total de duração do ciclo de trens;
- Restrições de Tempo Iniciais: que garantam tempos maiores que zero;
- Restrições que garantam que o tempo total de cada trem (*Transit Time*) seja maior que seu tempo inicial mais a duração de suas atividades;
- Restrição de demanda: o número de fluxo (trem-carga-descarga) deve ser igual à demanda;
- Restrição de designação: cada trem deve ser designado para apenas um fluxo;
- Restrições de fila: força o trem a ficar na fila se o terminal estiver ocupado.

A seguir o quadro 01 mostra a modelagem matemática do problema e o quadro 02 expondo suas respectivas variáveis:

$$\text{Min} \quad Z = \sum_{i=1}^{NT} \sum_{j=1}^{NO} C_{ij} \tag{4}$$

Sujeito a:

Tempo na Origem

$$TOC_{ijk} - O_{ij} + K(1 - Y_{mikl}) \geq M_{jm} \tag{5}$$

Transit Time Origem_Carga

$$S_{ik} - TOC_{ijk} + K(1 - Y_{mikl}) \geq OC_{jk} \tag{6}$$

Tempo de Carga

$$TCD_{ikl} - S_{ik} + K(1 - Y_{mikl}) \geq TC_{km} \tag{7}$$

Transit Time Carga_Descarga

$$U_{il} - TCD_{ikl} + K(1 - Y_{mikl}) \geq CD_{kl} \quad (8)$$

Tempo de Descarga

$$TDO_{ijl} - U_{il} + K(1 - Y_{mikl}) \geq TD_{lm} \quad (9)$$

Transit Time Ciclo

$$C_{ij} - TDO_{ijl} + K(1 - Y_{mikl}) \geq DO_{jl} \quad (10)$$

Restrição de Demanda

$$\sum_{m=1}^{NM}\sum_{i=1}^{NT}\sum_{k=1}^{NC}\sum_{l=1}^{ND} Y_{mikl} = D_{mkl} \quad (11)$$

Restrição de Designação

$$\sum_{m=1}^{NM}\sum_{i=1}^{NT}\sum_{k=1}^{NC}\sum_{l=1}^{ND} Y_{mikl} = 1 \quad (12)$$

Restrição de Fila na Carga

$$S_{pk} - S_{ik} + K(1 - Y_{mikl}) \geq TC_{km}; p > i \quad (13)$$

Restrição de Fila na Descarga

$$U_{pl} - U_{il} + K(1 - Y_{mikl}) \geq TD_{lm}; p > i \quad (14)$$

Restrições de Tempo Iniciais

Todas as variáveis maiores ou iguais a zero

Quadro 1 – Modelo matemático utilizado
Fonte: Autora (2010)

Onde:

i, p, são trens;

j, origem;

k, pátio da carga;

l, pátio da descarga;

m, tipo de vagões;

NT, quantidade de trens;

NO, quantidade de origens;

NM, quantidade de tipos de trens;

NC, quantidade de pátios de carga;

ND, quantidade de pátios de descarga;

C_{ij}, tempo total de duração do ciclo do trem i saindo da origem j;

O_{ij}, tempo em que o trem i está na origem j;

M_{jm}, tempo de manutenção do trem do tipo m na origem j;

TC_{km}, tempo em que o trem do tipo m demora para carregar no pátio k;
TD_{lm}, tempo em que o trem do tipo m demora para descarregar no pátio l;
OC_{jk}, transit time da origem j para o pátio de carga k;
CD_{kl}, transit time do pátio de carga k para o pátio de descarga l;
DO_{lj}, transit time do pátio de descarga l para a origem j;
TOC_{ijk}, tempo em que o trem i sai da origem j para o pátio de carga k, depois da manutenção;
S_{ik}, tempo em que o trem i chega no pátio de carga k;
TCD_{ikl}, tempo em que o trem i sai do pátio de carga k para o pátio de descarga l;
U_{il}, tempo em que o trem i chega ao pátio de descarga l;
TDO_{ilj}, tempo em que o trem i sai do pátio de descarga l para a origem j;
Y_{mikl}, variável binária que indica o fluxo do trem i, tipo m, do pátio de carga k para o pátio de descarga l;
D_{mkl}, demanda a ser atendida do trem tipo m, do pátio de carga k para o pátio de descarga l;
K, um número grande que garante as restrições de Transit Time e Fila;

Quadro 2 – Descrição das variáveis do modelo matemático.
Fonte: Autora (2010)

Para a elaboração do modelo de otimização, em um primeiro momento, foi feito um modelo matemático baseado em uma demanda específica, conforme a tabela 01. Um problema encontrado para este tipo de programação foi que os fluxos de demandas mudam diariamente, e com isto mudaria todo o modelo, tendo que escrever uma nova programação para se adequar a esta demanda, o que inviabilizaria tal programação. Para solucionar tal problema foi desenvolvido o programa na linguagem Lingo.

No anexo 1 segue a sintaxe do programa na linguagem Lingo. Para uma melhor visualização dos dados, e para não ter que modificar na sintaxe do programa toda vez que modificar a demanda, preferiu exportar os dados para um documento de texto (Bloco de notas). Um exemplo de dados, para a demanda da tabela 1, encontram-se no anexo 2.

4 RESULTADOS

A tabela 01 abaixo mostra um exemplo de uma demanda:

Demanda 1

ORIGEM/TIPO (FPK)	
00:00	Min Exp
00:00	Min Exp
01:00	Min Exp
01:00	AÇO
03:00	Min Exp
04:00	Min Exp
05:00	Min Exp
09:00	Min Exp
10:00	Min Exp
11:00	Min Exp
12:00	Min Exp
12:00	PAT
13:00	Min Exp
14:00	Min Exp
15:00	Min Exp
16:00	Min Exp

PROGRAMAÇÃO

FLUXOS

8 MinExp / FOO - FGI
3 MinExp / FLH - FGI
3 MinExp / FAF - FXS
1 PAT / FAF - PAT
1 ACO / FOO - ACO

Tabela 1 – Demanda
Fonte: Autora (2010)

Onde a tabela ORIGEM/TIPO mostra os horários e o tipo que cada trem estará disponível na origem e a tabela FLUXO exibe a demanda existente para um determinado dia, especificando o tipo de trem, o pátio de carga e o pátio de descarga.

O número de permutações pode ser definido como $P_n^{(a,b,c,...)} = \frac{n!}{a!b!c!...}$, onde n é o número total de trens, a, b, c,..., os fluxos. Para esta demanda específica, $P_{16}^{(8,3,3,1,1)} = \frac{16!}{8!3!3!1!1!} = 14.414.400$.

Para uma análise mais detalhada criou-se várias demandas, conforme a tabela 2. Os cenários criados foram todos com quinze trens.

Demanda 2		Demanda 3		Demanda 4		Demanda 5		Demanda 6		Demanda 7	
ORIGEM/TIPO (FPK)		ORIGEM/TIPO (FPK)		ORIGEM/TIPO (FPK)		ORIGEM/TIPO (FPK)		ORIGEM/TIPO (FPK)		ORIGEM/TIPO (FPK)	
00:00	Min Exp	00:00	Min Exp	00:00	Min Exp	00:00	Min Exp	00:00	Min Exp	00:00	Min Exp
00:00	Min Exp	00:00	Min Exp	00:00	Min Exp	00:00	Min Exp	00:00	Min Exp	00:00	Min Exp
01:00	Min Exp	01:00	Min Exp	01:00	Min Exp	01:00	Min Exp	01:00	Min Exp	01:00	Min Exp
01:00	AÇO	01:00	AÇO	01:00	AÇO	01:00	AÇO	01:00	AÇO	01:00	Min Exp
03:00	Min Exp	03:00	Min Exp	03:00	Min Exp	03:00	Min Exp	03:00	Min Exp	03:00	Min Exp
04:00	Min Exp	04:00	Min Exp	04:00	Min Exp	04:00	Min Exp	04:00	AÇO	04:00	AÇO
05:00	PAT	05:00	PAT	05:00	PAT	05:00	PAT	05:00	PAT	05:00	Min Exp
09:00	Min Exp	09:00	Min Exp	09:00	Min Exp	09:00	Min Exp	09:00	Min Exp	09:00	Min Exp
10:00	Min Exp	10:00	Min Exp	10:00	Min Exp	10:00	Min Exp	10:00	PAT	10:00	PAT
11:00	Min Exp	11:00	Min Exp	11:00	Min Exp	11:00	Min Exp	11:00	Min Exp	11:00	Min Exp
12:00	Min Exp	12:00	Min Exp	12:00	Min Exp	12:00	Min Exp	12:00	PAT	12:00	Min Exp
12:00	PAT	12:00	PAT	12:00	Min Exp	12:00	Min Exp	12:00	Min Exp	12:00	Min Exp
13:00	Min Exp	13:00	Min Exp	13:00	Min Exp	13:00	Min Exp	13:00	Min Exp	13:00	Min Exp
14:00	Min Exp	14:00	PAT	14:00	AÇO	14:00	PAT	14:00	PAT	14:00	PAT
15:00	Min Exp	15:00	Min Exp	15:00	Min Exp	15:00	Min Exp	15:00	Min Exp	15:00	Min Exp
FLUXOS		FLUXOS		FLUXOS		FLUXOS		FLUXOS		FLUXOS	
8MinExp/FOO-FGI		7MinExp/FOO-FGI		7MinExp/FOO-FGI		6MinExp/FOO-FGI		5MinExp/FOO-FGI		4MinExp/FOO-FGI	
3MinExp/FLH-FGI		3MinExp/FLH-FGI		2MinExp/FLH-FGI		3MinExp/FLH-FGI		1MinExp/FLH-FGI		4MinExp/FLH-FGI	
1MinExp/FAF-FXS		1MinExp/FAF-FXS		3MinExp/FAF-FXS		3MinExp/FAF-FXS		3MinExp/FAF-FXS		4MinExp/FAF-FXS	
2PAT/FAF-PAT		3PAT/FAF-PAT		1PAT/FAF-PAT		2PAT/FAF-PAT		4PAT/FAF-PAT		2PAT/FAF-PAT	
1ACO/FOO-ACO		1ACO/FOO-ACO		2ACO/FOO-ACO		1ACO/FOO-ACO		2ACO/FOO-ACO		1ACO/FOO-ACO	

Tabela 2 – Demandas variadas para 15 trens
Fonte: Autora (2010)

A tabela 03 mostra os resultados do número de permutações P, do número de iterações necessárias e do tempo de duração do solver para cada demanda, em um processador com clock de 1Ghz.

	Demanda 1	Demanda 2	Demanda 3	Demanda 4	Demanda 5	Demanda 6	Demanda 7
P	14.414.400	2.705.700	7.207.200	10.810.800	25.225.200	37.837.800	47.297.250
Iterações	14.786.057	610.008	491.277	2.731.304	5.653.342	211.329	7.010.766
Tempo	1h9min29s	2min16s	1min46s	9min7s	22min20s	45s	31min18s

Tabela 3 – Resultados alcançados das demandas das tabelas 1 e 2.
Fonte: Autora (2010)

Observa-se pelos dados que à medida que os fluxos de demanda são menos concentrados em apenas um fluxo a complexidade da programação aumenta, o que pode ser comprovado pelo valor de P. Ressalta-se ainda a Demanda 6, que apesar de ter um valor de P elevado, o tempo de duração do solver é o menor entre as sete demandas. Isto é devido à maior quantidade trens de um determinado tipo, não terem alternativas de outro fluxo, diminuindo assim as iterações.

A variável de interesse é o fluxo de cada trem, pois esta exibe que o trem i, tipo j, irá carregar no pátio k e descarregar no pátio l, mostrando a rota em que cada

trem deve seguir. A tabela 04 abaixo expõe a solução ótima, da função objetivo e da variável fluxo para a demanda 1, tabela 1. O ciclo total dos trens (tempo total de circulação dos trens), a função objetivo, é igual a 981 horas (este número é o menor possível dado as restrições inseridas no programa).

```
Global optimal solution found at iteration:      14786057
Objective value:                                 981.0000

Model Title: : PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO DE TRENS

              Variable                   Value            Reduced Cost
     FLUXO( EXP, T1,  FOO, FGI)        1.000000            27000.00
     FLUXO( EXP, T2,  FOO, FGI)        1.000000            32000.00
     FLUXO( EXP, T3,  FLH, FGI)        1.000000            10000.00
     FLUXO( EXP, T5,  FAF, FXS)        1.000000            6000.000
     FLUXO( EXP, T6,  FOO, FGI)        1.000000            9000.000
     FLUXO( EXP, T7,  FLH, FGI)        1.000000            8000.000
     FLUXO( EXP, T8,  FAF, FXS)        1.000000            12000.00
     FLUXO( EXP, T9,  FLH, FGI)        1.000000            7000.000
     FLUXO( EXP, T10, FOO, FGI)        1.000000            6000.000
     FLUXO( EXP, T11, FOO, FGI)        1.000000            5000.000
     FLUXO( EXP, T13, FOO, FGI)        1.000000            4000.000
     FLUXO( EXP, T14, FAF, FXS)        1.000000            4000.000
     FLUXO( EXP, T15, FOO, FGI)        1.000000            3000.000
     FLUXO( EXP, T16, FOO, FGI)        1.000000            2000.000
     FLUXO( PAT, T12, FAF, PAT)        1.000000            5000.000
     FLUXO( ACO, T4,  FOO, ACO)        1.000000            4000.000
```

Tabela 4 – Solução ótima: Variável Fluxo
Fonte: Autora (2010)

5 CONCLUSÕES

A metodologia proposta atendeu o objetivo estabelecido, apresentando uma modelagem de programação matemática capaz de resolver problemas de programação diária de trens.

A modelagem sugerida considerou algumas questões operacionais como: diminuir tempos de ciclos de trens; minimizar filas; disponibilizar maior número de trens para a programação e aumentar a produtividade.

Os resultados obtidos através do modelo proposto proporcionam a solução ótima, apresentando o menor valor possível da soma do tempo total de circulação de todos os trens, minimizando as filas, respeitando as restrições inseridas no programa.

É de conhecimento que o modelo desenvolvido apresenta limitações. Para demanda de quinze trens, o tempo de processamento do *solver* foi razoável, de alguns minutos, o que é de interesse para este tipo de programação que necessita de respostas rápidas. No entanto, à medida que aumenta o número de trens e/ou o número de fluxos (carga-descarga), aumenta a complexidade do modelo, elevando o tempo de processamento do *solver*. Isto pode ser confirmado na primeira demanda proposta neste trabalho, de dezesseis trens, que foi necessário aproximadamente 1 hora para o processamento do *solver*. Este é um problema a ser considerado, pois a programação de trens carece de demandas maiores, com respostas rápidas.

Para o desenvolvimento de trabalhos futuros recomenda-se o uso de alguma heurística que forneça a solução parcial para o problema a priori. Em situações reais, em geral, é possível o usuário do sistema determinar facilmente uma solução parcial para o problema através do seu conhecimento, experiência e vivência diária. Dessa forma, a heurística deve ser tal que forneça uma solução parcial semelhante àquela obtida pelo usuário.

Conclui-se, com este trabalho, que o desenvolvimento de modelagens matemáticas proporciona ganhos operacionais às ferrovias, promovendo a melhoria da eficiência e do desempenho através da melhor utilização dos recursos disponíveis e confiabilidade na solução obtida.

REFERÊNCIAS

BAKER, K. R. *Introduction to Sequencing and Scheduling*. Johm Wileys & Sons, Inc., New York, 1974.

BONNEY, M. *Reflections on production planning and control*. Gestão & Produção. São Carlos: DEP-UFSCar, v. 7, n. 3, p. 181-207, dezembro de 2000.

BRINA, H. L. *Estradas de ferro*. Livros técnicos e científicos editora. Rio de Janeiro. Brasil, 1982.

BRONSON, R. & NAADIMUTHU, G., *Operations Research*, 2nd Ed. New York: McGraw-Hill, 1997.

CORREA, H. L.; GIANESE, I. G. N.; CAON, M. *Planejamento, programação e controle da produção*. 4. ed. São Paulo, SP, Brasil: Editora Atlas, 2001.

GAREY, M., GRAHAM, R., and JOHNSON, D.S. *Some NP-complete geometric problems*. Proceedings of the 8'th Annual ACM Symposium on Theory of Computing, 1976.

HAMACHER,Fernanda Correia, *Logística Ferroviária: Resolução do Problema de Alocação Ótima de Vagões e Locomotivas no Curto Prazo*, Dissertação, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2005.

LANDA, Fabiane Texeira, *Utilização de Simulação de Eventos Discretos para análise da operação de locomotivas de auxílio no trens de carga: Caso MRS*, Monografia, Universidade Federal de Juiz de Fora, 2007.

LEUNG, J. Y.T. *Handbook of Scheduling. Algorithms, Models, and Perfomance Analysis* Chapman & Hall/CRC Press. New York, NY, USA, 2000.

MACCARTHY, B. L. e LIU, J. *Addressing the gap in scheduling research: a review of optimization and heuristic methods in production scheduling.* International Journal of Production Research, v. 31, n. 1, p. 59-79, 1993.

MARÓTI, G. *Operations Research Models for Railway Rolling Stock Planning*. Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, 2006.

MELO, Marcelo Calado Vieira de, *Programação linear inteira aplicada no planejamento da alocação de vagões de carga,* Dissertação, Universidade Federal do Ceará, 2008.

MOREIRA, D. A. *Administração da Produção e Operações*. Ed. Pioneira. São Paulo,1996.

MRS Logística, http://www.mrs.com.br/ (consulta em: agosto/2009).

NOGUEIRA, F. M. A., FILHO, R. S. S., BARBOSA, C. S., MACHADO, M. N., FERREIRA, J. G., *"Análise da dinâmica do transporte ferroviário de minério visando a eficiência da programação de trens: o caso da MRS Logística S. A."* In: XXVI ENEGEP - Fortaleza, CE, Brasil, 9 a 11 de Outubro de 2006.

OLIVEIRA, Ronald Lopes de, *Escalonamento de um Job Shop: Análise de um Algoritmo com Regras Heurísticas*, Dissertação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.

PINEDO, M. *Scheduling. Theory, Algorithms, and Systems* (second edition). Prentice Hall. New Jersey, NJ, USA, 2002.

RODRIGUES, Diogo Antonio, *Otimização do seqüenciamento de produção em uma ferrovia através de técnicas de scheduling,* Monografia, Universidade Federal de Juiz de Fora, 2007.

RUSSOMANO, V.H. *Planejamento e Acompanhamento da Produção*. 3ª ed. ver. São Paulo: Pioneira, 1986.

SIPPER, D. e BULFIN, R. *Production: planning, control, and integration*. New York: McGraw-Hill, 1997.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. *Administração da produção*. 2ª ed. São Paulo: Editora Atlas, 2002.

TUBINO, Dalvio Ferrari*. Manual de Planejamento e controle da produção*. 2ª ed. São Paulo: Atlas, 2000.

WILD, R. *Operations Management*. 6th edition, Thomson Learning, London. 870 p., 2003. York: John Wiley & Sons, 1993.

ZIONTS, S*. Linear and Integer Programming*. Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, New Jersey, United States of America, 1974.

ANEXO 1 – MODELAGEM DO PROBLEMA NO SOFTWARE LINGO

```
MODEL:

TITLE: PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO DE TRENS;

SETS:

TREM /@FILE('Dados.ldt')/:TRAIN;
TIPO /@FILE('Dados.ldt')/:;
ORIGEM /@FILE('Dados.ldt')/:TORIGEM;
CARGA /@FILE('Dados.ldt')/: TCARGA;
DESCARGA /@FILE('Dados.ldt')/: TDESCARGA;
ARCO1(CARGA,DESCARGA):TRANSIT_CARGA_DESCARGA;
ARCO2(TREM,CARGA,DESCARGA):TIME_CARGA_DESCARGA;
ARCO3(TIPO,TREM,CARGA,DESCARGA):FLUXO;
ARCO4(TREM,TIPO):TREM_TIPO;
ARCO5(ORIGEM,TIPO):TIME_TERMINAL_ORIGEM;
ARCO6(CARGA,TIPO):TIME_TERMINAL_CARGA;
ARCO7(DESCARGA,TIPO):TIME_TERMINAL_DESCARGA;
ARCO8(TREM,ORIGEM):TREM_ORIGEM,TIME_ORIGEM,TIME_ORIGEMc,
MANUTENCAO;
ARCO9(TREM,ORIGEM,CARGA):TIME_ORIGEM_CARGA;
ARCO10(TREM,CARGA):TIME_CARGA;
ARCO11(TREM,DESCARGA):TIME_DESCARGA;
ARCO12(TREM,DESCARGA,ORIGEM):TIME_DESCARGA_ORIGEM;
ARCO13(ORIGEM,CARGA): TRANSIT_ORIGEM_CARGA;
ARCO14(ORIGEM,DESCARGA): TRANSIT_DESCARGA_ORIGEM;
ARCO15(TIPO,CARGA,DESCARGA):DATA_DEMANDA;

ENDSETS


DATA:

 TRANSIT_ORIGEM_CARGA = @FILE('Dados.ldt');

 TRANSIT_CARGA_DESCARGA = @FILE('Dados.ldt');

 TRANSIT_DESCARGA_ORIGEM = @FILE('Dados.ldt');

 TIME_TERMINAL_ORIGEM= @FILE('Dados.ldt');

 TIME_TERMINAL_CARGA = @FILE('Dados.ldt');

 TIME_TERMINAL_DESCARGA = @FILE('Dados.ldt');

 TIME_ORIGEM = @FILE('Dados.ldt');

 TREM_ORIGEM = @FILE('Dados.ldt');
```

```
 MANUTENCAO = @FILE('Dados.ldt');

 TREM_TIPO = @FILE('Dados.ldt');

 DATA_DEMANDA = @FILE('Dados.ldt');

 BIG=1000;

ENDDATA

MIN  = @SUM(ARCO8(I,J):TIME_ORIGEMc(I,J));

!RESTRIÇÕES;

@FOR(ARCO3(M,I,K,L):@BIN(FLUXO(M,I,K,L)));

!TEMPO EM ORIGEM;

@FOR(TREM(I):
 @FOR(ORIGEM(J)|TREM_ORIGEM(I,J) #EQ# 1:
   @FOR(CARGA(K):
     @FOR(DESCARGA(L):
       @FOR(TIPO(M)|TREM_TIPO(I,M) #EQ# 1:
          TIME_ORIGEM_CARGA(I,J,K)-TIME_ORIGEM(I,J)+BIG*(1-
FLUXO(M,I,K,L))>=TIME_TERMINAL_ORIGEM(J,M)*@SUM(ORIGEM(J):MANU
TENCAO(I,J)))))));

!TRANSIT TIME ORIGEM_CARGA;

@FOR(TREM(I):
 @FOR(ORIGEM(J)|TREM_ORIGEM(I,J) #EQ# 1:
   @FOR(CARGA(K):
     @FOR(DESCARGA(L):
       @FOR(TIPO(M)|TREM_TIPO(I,M) #EQ# 1:
          TIME_CARGA(I,K)-TIME_ORIGEM_CARGA(I,J,K)+BIG*(1-
FLUXO(M,I,K,L))>=TRANSIT_ORIGEM_CARGA(J,K))))));

!TEMPO DE CARGA;

@FOR(TREM(I):
 @FOR(ORIGEM(J)|TREM_ORIGEM(I,J) #EQ# 1:
   @FOR(CARGA(K):
     @FOR(DESCARGA(L):
       @FOR(TIPO(M)|TREM_TIPO(I,M) #EQ# 1:
          TIME_CARGA_DESCARGA(I,K,L)-TIME_CARGA(I,K)+BIG*(1-
FLUXO(M,I,K,L))>=TIME_TERMINAL_CARGA(K,M))))));
```

```
!TRANSIT TIME CARGA_DESCARGA;

@FOR(TREM(I):
 @FOR(ORIGEM(J)|TREM_ORIGEM(I,J) #EQ# 1:
   @FOR(CARGA(K):
     @FOR(DESCARGA(L):
       @FOR(TIPO(M)|TREM_TIPO(I,M) #EQ# 1:
          TIME_DESCARGA(I,L)-TIME_CARGA_DESCARGA(I,K,L)+BIG*(1-
FLUXO(M,I,K,L))>=TRANSIT_CARGA_DESCARGA(K,L))))));

!TEMPO DE DESCARGA;

@FOR(TREM(I):
 @FOR(ORIGEM(J)|TREM_ORIGEM(I,J) #EQ# 1:
   @FOR(CARGA(K):
     @FOR(DESCARGA(L):
       @FOR(TIPO(M)|TREM_TIPO(I,M) #EQ# 1:
          TIME_DESCARGA_ORIGEM(I,L,J)-
TIME_DESCARGA(I,L)+BIG*(1-
FLUXO(M,I,K,L))>=TIME_TERMINAL_DESCARGA(L,M))))));

!TRANSIT TIME CICLO;

@FOR(TREM(I):
 @FOR(ORIGEM(J)|TREM_ORIGEM(I,J) #EQ# 1:
   @FOR(CARGA(K):
     @FOR(DESCARGA(L):
       @FOR(TIPO(M)|TREM_TIPO(I,M) #EQ# 1:
          TIME_ORIGEMc(I,J)-TIME_DESCARGA_ORIGEM(I,L,J)+BIG*(1-
FLUXO(M,I,K,L))>=TRANSIT_DESCARGA_ORIGEM(J,L))))));


!FORÇA EXISTIR NUMERO DE FLUXO;

@FOR(TIPO(M):
  @FOR(CARGA(K):
    @FOR(DESCARGA(L):
      @SUM(TREM(I):FLUXO(M,I,K,L))=DATA_DEMANDA(M,K,L))));


!FORÇA 1 TREM SER DESIGNADO PARA APENAS 1 FLUXO;

@FOR(TREM(I):
     @FOR(TIPO(M)|TREM_TIPO(I,M) #EQ# 1:
          @SUM(ARCO1(K,L):FLUXO(M,I,K,L))=1));
```

```
!FORÇA TREM FICAR NA FILA SE TERMINAL ESTIVER OCUPADO;
!FILA NA CARGA;

@FOR(CARGA(K):
  @FOR(DESCARGA(L):
    @FOR(TREM(I):
      @FOR(TREM(J)|I#LT#J:
        @FOR(TIPO(M)|TREM_TIPO(I,M) #EQ# 1 :
          @FOR(TIPO(N)|TREM_TIPO(J,N) #EQ# 1:
             TIME_CARGA(J,K)-TIME_CARGA(I,K)+BIG*(1-
FLUXO(M,I,K,L))>=TIME_TERMINAL_CARGA(K,M)))))));

!FILA NA DESCARGA;

@FOR(DESCARGA(L):
  @FOR(CARGA(K):
    @FOR(TREM(I):
      @FOR(TREM(J)|I#LT#J:
        @FOR(TIPO(M)|TREM_TIPO(I,M) #EQ# 1 :
          @FOR(TIPO(N)|TREM_TIPO(J,N) #EQ# 1:
             TIME_DESCARGA(J,L)-TIME_DESCARGA(I,L)+BIG*(1-
FLUXO(M,I,K,L))>=TIME_TERMINAL_DESCARGA(L,M)))))));
```

ANEXO 2 – EXEMPLO DO ARQUIVO “DADOS.LDT” (DEMANDA – TABELA 1)

```
!LISTA DOS TRENS;
T1..T16 ~

!LISTA TIPO DE TRENS;
EXP CSN COS PAT USI ACO ~

!ORIGEM;
FPK FDM ~

!CARGA;
FOO FLH FAF  ~

!DESCARGA;
FGI FXS PAT ACO ~

!TRANSIT_ORIGEM_CARGA;
3 5 4
0 0 0  ~

!TRANSIT_CARGA_DESCARGA;
24 0 0 7
28 0 0 0
0 25 7 0 ~

!TRANSIT_DESCARGA_ORIGEM;
17 15 1 1
0  0  0 0 ~

!TIME_TERMINAL_ORIGEM;
0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 ~

!TIME_TERMINAL_CARGA;
4 4 4 4 4 2
4 4 4 4 4 4
5 5 5 5 5 5 ~

!TIME_TERMINAL_DESCARGA;
3 3 3 3 3 3
3 3 3 3 3 3
3 3 3 3 3 3
3 3 3 3 3 3 ~
```

```
!TIME_ORIGEM;
0 0
0 0
1 0
1 0
3 0
4 0
5 0
9 0
10 0
11 0
12 0
12 0
13 0
14 0
15 0
16 0 ~

!TREM_ORIGEM;
1 0
1 0
1 0
1 0
1 0
1 0
1 0
1 0
1 0
1 0
1 0
1 0
1 0
1 0
1 0
1 0 ~

!MANUTENCAO;
0 0
0 0
0 0
0 0
0 0
0 0
0 0
0 0
0 0
0 0
0 0
0 0
0 0
0 0
```

```
0 0
0 0
0 0 ~

!TREM_TIPO;
1 0 0 0 0 0
1 0 0 0 0 0
1 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 1
1 0 0 0 0 0
1 0 0 0 0 0
1 0 0 0 0 0
1 0 0 0 0 0
1 0 0 0 0 0
1 0 0 0 0 0
1 0 0 0 0 0
0 0 0 1 0 0
1 0 0 0 0 0
1 0 0 0 0 0
1 0 0 0 0 0
1 0 0 0 0 0 ~

!DATA_DEMANDA;
8 0 0 0
3 0 0 0
0 3 0 0,
0 0 0 0
0 0 0 0
0 0 0 0,
0 0 0 0
0 0 0 0
0 0 0 0,
0 0 0 0
0 0 0 0
0 0 1 0,
0 0 0 0
0 0 0 0
0 0 0 0,
0 0 0 1
0 0 0 0
0 0 0 0
```