

UMA PROPOSTA DE UM MODELO MATEMÁTICO PARA A PROGRAMAÇÃO DAS ATIVIDADES DE UM TERMINAL FERROVIÁRIO DE CARGA

Rodrigo de Alvarenga Rosa

Centro Federal de Educação Tecnológica – CEFETES
Coordenação de Ferrovias - Unidade de Cariacica

RESUMO

Este artigo apresenta um levantamento das características dos terminais ferroviários, dos recursos operacionais envolvidos na operação e dos procedimentos usualmente adotados. Com base nestes dados, é proposto um modelo matemático das variáveis levantadas e dos procedimentos empregados visando a programação diária de um terminal ferroviário. Este modelo tem por base teórica o problema de escalonamento dinâmico com restrição de recursos. Este modelo vem sendo empregado no Terminal Rodo-ferroviário de Cargas de Colatina, da empresa CentroNorte Logística, interligado a Estrada de Ferro Vitória a Minas em Colatina, Espírito Santo. O objetivo deste modelo é gerar a programação diária das operações dos terminais ferroviários considerando o fator dinâmico desta programação que pode necessitar de uma reprogramação em função de quebras de equipamentos, defeitos na via permanente entre outros.

ABSTRACT

This article presents a survey of the railroad terminal attributes, its operational resources and, also, its operational procedures. Based upon this data, it is proposed a mathematical model to make the daily activities scheduling of one railroad terminal. This model is based on the dynamic scheduling problem with resource constraints. The proposed model was applied on the Terminal Rodo-ferroviário de Cargas de Colatina, owned by CentroNorte Logística, and interconnected with Estrada de Ferro Vitória a Minas em Colatina, Espírito Santo. The main objective of this model is to build the daily activities scheduling of the terminal considering the dynamic factor of this scheduling caused by any equipment or installations crash.

1. INTRODUÇÃO

Os terminais ferroviários são elementos importantes dentro da ferrovia, pois caso eles não operem a contento, pode ser gerada uma retenção de vagões no terminal, ocasionando uma diminuição do fluxo de cargas em toda a ferrovia. Além disso, os terminais são elementos com custo muito alto dentro da ferrovia, e o seu uso sendo feito de maneira adequada, evita ou posterga novos investimentos em expansão.

Apesar da importância dos terminais ferroviários dentro do contexto do transporte ferroviário, poucos estudos têm sido feitos com foco na programação diária das atividades destes terminais. Em consequência disso, também, existem poucos modelos matemáticos propostos para apoiar o trabalho do coordenador do terminal no que diz respeito à programação das atividades diárias. Os controladores de pátios e terminais (CPT) realizam as atividades por intuição e experiência, sem um modelo específico.

O estudo que gerou este artigo tem como principal foco os terminais ferroviários que poderão advir da construção da variante Litorânea Sul, da Ferrovia Centro Atlântica, que serão geridos pelas empresas proprietárias dos terminais e não pela ferrovia. Sendo este modal de transporte uma estratégia de desenvolvimento para o país, deve-se começar desde já a construção de um saber mais apurado no intuito de suportar as empresas operadoras e, sobretudo, as empresas usuárias.

Artigos científicos específicos para a área ferroviária no contexto deste artigo são poucos. Sabino et. al. (2006) estuda o tráfego de manobras de locomotivas em terminais ferroviários. Parada (1986) propõe um modelo de simulação de um pátio ferroviário, no entanto, o estudo feito não contempla a programação de recursos necessários às atividades diárias dos terminais e sim a simulação da operação dos pátios em função de dados estatísticos. Gomes (1982) propõe um modelo para análise do desempenho operacional de pátios ferroviários. Petersen

(1977) faz um estudo sobre a área, mas não abordam programação e, sim, planejamento de longo prazo. Assad (1977) faz uma compilação de todos os trabalhos desenvolvidos na área ferroviária até o ano de publicação e serve como um excelente referencial de pesquisa. Randall e Kurz (2005) desenvolveram uma metodologia baseada em algoritmo genético para prever o tempo de operação de um pátio, no entanto, ele não prevê no trabalho a geração da programação diária dos recursos do pátio nem a sequência de atividades que deve ser realizada. Os trabalhos desenvolvidos por Shields (1966 a, b) e Shinohara (1963) são os que mais se aproximam do tema tratado neste artigo. O problema deste artigo pode ser classificado como o Problema de Escalonamento Dinâmico com Restrição de Recursos (BLAZEWICZ et. al., 2002) e foi estudado por Rosa (2006), Rosa e Schneebeli (2005) (2004) onde foi analisada e proposta uma metodologia para a programação das atividades de um terminal portuário de contêiner em função da chegada de navios e de um centro de distribuição rodoviário em função da chegada de caminhões.

2. PÁTIOS E TERMINAIS FERROVIÁRIOS

Define-se pátio ferroviário como sendo uma área de esplanada em que um conjunto de vias é preparado para formação de trens, manobra, estacionamento de carro e vagões, operações de carregamento e descarga de produtos e outras atividades. Os pátios possuem as seguintes funções (BRINA, 1983): 1) pátios de cruzamento; 2) pátios de triagem e 3) terminais ferroviários.

Os pátios de cruzamento são destinados ao ordenamento da circulação ferroviária em linhas singelas. Como a linha é única, pode haver a situação de dois trens se encontrarem em sentidos opostos em uma mesma linha, neste caso, um dos trens é desviado para o pátio de cruzamento e aguarda a passagem do outro trem e depois da passagem deste, ele sai do pátio de cruzamento e prossegue viagem. Nas linhas em que exista tráfego mais intenso, o pátio poderá ter dois ou mais desvios, sendo que cada desvio deverá ter sua extensão com comprimento de no mínimo o comprimento do maior trem que circula na linha.

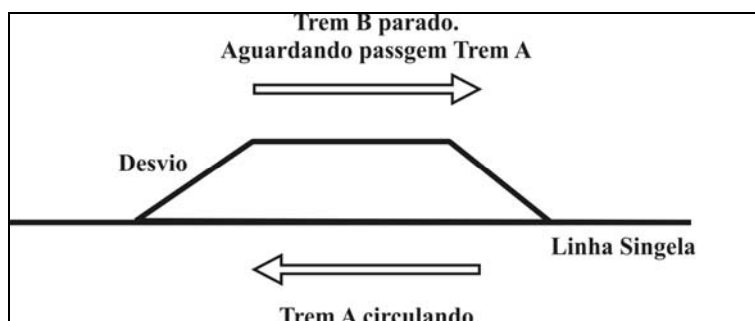


Figura 1 - Pátio de cruzamento

Fonte: ROSA, 2004

Os pátios de triagem são pátios destinados a formação e separação de trens em virtude da mudança de perfil da linha ou, também, em função do pátio ser o ponto de entrocamento entre duas ferrovias.

Os terminais ferroviários são pátios específicos para realizar as operações de carregamento e descarga de produtos. Em um terminal ferroviário é possível o acoplamento de diversos pátios ferroviários com outras funções além da operação de carregamento e descarga de produtos.

Os pátios de triagem e os terminais ferroviários são subdivididos em quatro áreas: 1) recepção; 2) triagem; 3) classificação e 4) partida. Em função do número de vagões atendidos,

nem todos os pátios de triagem e terminais ferroviários possuem todas estas subdivisões, ver Figura 2.

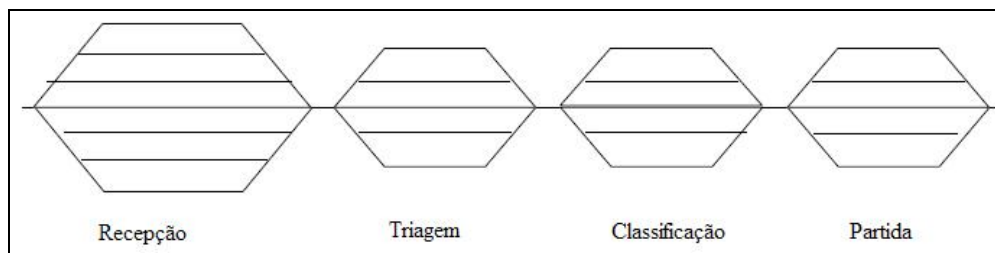


Figura 2 - Subdivisões de um pátio de triagem ou de um terminal ferroviário

Fonte: BRINA, 1983

Na subdivisão recepção o trem é recebido, a locomotiva é cortada do trem, os vagões são estacionados e ficam aguardando vaga para ir para triagem. Na triagem os vagões são separados por destino, cliente e produto. No caso de um terminal ferroviário os vagões são direcionados para a área de carregamento ou descarga para o cliente/produto que está transportando ou irá transportar não sendo tão relevante a questão de destino em função das ordens de carregamento e descarga. Se for um pátio de triagem, os vagões são puxados para a subdivisão classificação onde os vagões são reagrupados em função do destino, cliente e produto que eles transportam e seguem para a subdivisão de partida, onde uma locomotiva será engatada para formar um novo trem e prosseguir viagem (BRINA, 1983).

No caso de um terminal ferroviário, os vagões serão puxados para a subdivisão de partida somente após seu completo carregamento ou descarga. Após os carregamentos terem sido realizados, os vagões são agrupados por destino, cliente e produto, inclusive os vazios, para, então, serem deslocados para a subdivisão de partida, onde uma locomotiva será engatada para formar um novo trem e prosseguir viagem (BRINA, 1983).

Este artigo dará maior ênfase nos terminais ferroviários e, assim, inicia-se neste ponto uma descrição mais detalhada dos mesmos. Ele é composto de linhas ferroviárias, sua sinalização e suas chaves de manobra, material rodante usado nas manobras de pátio, áreas de carregamento e descarga de produtos, equipamentos de carregamento e descarga, equipamento utilizado na pesagem dos vagões, pessoal treinado em conduzir as manobras e as operações de carga e descarga.

As linhas ferroviárias são delimitadas na largura pelos trilhos, que definem a bitola da via e no comprimento pela extensão disponível de linha até o pára-choque de final de linha. Para as operações de carregamento e descarga, os vagões são deslocados para desvios ferroviários onde as operações ocorrem (ROSA, 2004). O desvio é chamado vivo quando dá saída para os dois lados e morto quando só tem saída para um lado, ficando uma das pontas com um pára-choque de final de linha, ver Figura 3. Os desvios, ver Figura 3, possuem um comprimento útil que é a extensão na qual os vagões podem ficar estacionados. O comprimento é delimitado pelo marco de via e pelo pára-choque de final de linha. O comprimento, muitas das vezes, não é expresso em metros e, sim, em números de vagões de certo tipo que o desvio comporta.

O marco de via representa a posição onde, caso ocorra a circulação de um vagão pela linha que interliga com a que tem um vagão parado, não haverá colisão entre ambos. Ele é representado em campo por um trilho pintado e cravado no chão ou algo similar. O pára-

choque de final de linha pode ser um trilho cravado no solo que evite que o trem sai da linha em uma manobra ou equipamentos mais sofisticados com molas e borrachas ou até mesmo blocos de concreto.

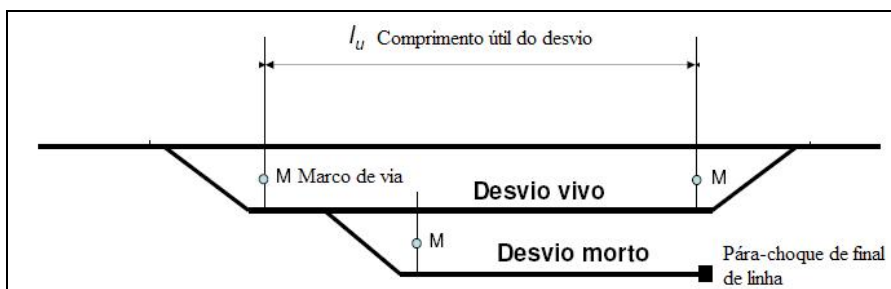


Figura 3 - Desvios e seus componentes principais
Fonte: BRINA, 1983

A sinalização ferroviária é dividida em ótica e acústica. A sinalização ótica é composta por placas, bandeiras, e sinais luminosos. As placas são importantes, pois elas têm a função de ordenar o tráfego dentro dos pátios não sinalizados, que são a maioria dos pátios no Brasil. As bandeiras são usadas principalmente nos AMVs. Os sinais luminosos podem ser anões e sinais altos e possuem sempre a cor vermelha e verde, vermelha indica parada imediata e verde dá permissão para prosseguir na linha (ROSA, 2004).

Deve existir numa malha ferroviária a possibilidade de desviar os trens de uma linha para outra linha da malha. Este aspecto é ainda mais relevante nos pátios onde as manobras são constantes e faz-se necessária a troca de linhas pelos trens que estão sendo manobrados. Para que estas trocas possam ocorrer, existem aparelhos de mudança de via (AMV) (ROSA, 2004). Na Figura 4, pode-se ver as partes componentes de um AMV: 1) jacaré, 2) contra-trilhos; 3) trilhos de ligação e 4) agulhas. De maneira sintética, o AMV funciona pelo deslocamento das agulhas, que na posição apresentada na Figura 4 encaminha o trem para a linha A e caso as agulhas fossem deslocadas para cima da figura, o AMV encaminha a composição para a linha B. Uma parte importante do AMV é a máquina de chave que tem por função a mudança da posição da agulha, sendo que esta pode ter seu acionamento dos seguintes tipos: 1) manual; 2) elétrico e 3) mola. Na maioria dos pátios é usada a chave manual, sendo que a chave com acionamento elétrico é utilizada nos pátios mais modernos e automatizada. Chaves de mola não são usuais em pátios.

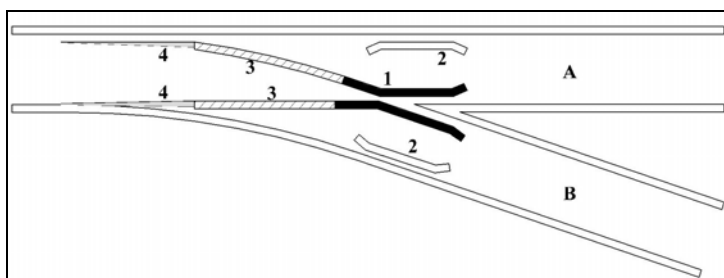


Figura 4 – Desenho Esquemático de um Aparelho de Mudança de Via (AMV)
Fonte: ROSA, 2004

O material rodante, no caso de operação de terminais, é composto por locomotivas de manobra, que são máquinas próprias para este fim ou locomotivas antigas que por não serem economicamente viáveis para serem utilizadas em viagens, ficam atendendo as manobras de terminal. Não se consideram os vagões como materiais rodante do pátio, tendo em vista que

eles só ficam nos terminais de passagem para as operações que estão sendo realizadas.

Nos terminais ferroviários existem áreas projetadas para o carregamento e descarga de produtos compostas por instalações próprias para cada tipo de produto. Dentre as instalações para carregamento de vagões (CVRD, 2001), citam-se: 1) muros de carregamento; 2) silos de carregamento; 3) área aberta para carregamento; 4) armazém para carregamento ferroviário; 5) outros.

Os muros de carregamento são construções que servem para suportar um aterro mais alto que a linha férrea e que fica na altura aproximada da borda dos vagões. Por cima deste aterro circulam as pás mecânicas que trazem das pilhas, que ficam próximas ao muro, a carga e as depositam dentro dos vagões. Eles são usados para minério de ferro, carvão, calcário entre outros. Os silos de carregamento fazem o mesmo papel dos muros de carregamento, no entanto, eles são automatizados, carregando o vagão, sempre com peso padrão e com melhor arrumação da carga. Os silos são, em sua grande maioria, automatizados. Além das cargas citadas para o muro de carregamento, destaca-se o carregamento de graneis agrícolas pelos silos de carregamento (CVRD, 2001).

As áreas abertas para carregamento são posicionadas ao longo de um trecho da linha férrea, onde empilhadeiras de garfo, empilhadeiras especializadas em contêiner e pontes rolantes movem a carga das áreas de armazenamento ou retiram a carga de um caminhão e as depositam sobre o vagão. Nas áreas abertas para carregamento, destaca-se o carregamento da carga geral e o uso de vagões plataformas utilizados para carregamento de siderúrgicos, blocos de granito, toretes de madeira, contêiner entre outras. Os armazéns para carregamento ferroviário são áreas que operam similarmente às áreas abertas. No entanto, são voltados para cargas mais sensíveis ao meio ambiente. São utilizados nestas operações, preferencialmente, vagões fechados, do tipo F (FHD, FLB, FQD, entre outros). Estes armazéns possuem docas de carregamento que ficam paralelas às linhas férreas e as empilhadeiras, mais usualmente empilhadeiras de garfo ou *clamp*, retiram a carga de dentro do armazém e carregam os vagões. Em alguns destes armazéns, a linha férrea passa por dentro do próprio armazém.

Dentre as instalações para descarga de vagões (CVRD, 2001), citam-se: 1) Viradores de vagões; 2) Moegas ferroviárias; 3) Área aberta para carregamento; 4) Armazém para carregamento ferroviário; e 5) Outros.

Os viradores de vagões são usados para descarga de produtos a granel carregado em vagões gôndolas do tipo GD. Nestes viradores, literalmente os vagões são girados completamente e carga cai por gravidade em transportadores de esteira e são conduzidos até as áreas de estocagem.

As moegas ferroviárias podem variar sua forma em função da carga a ser descarregada. As duas formas mais usuais são: 1) Ponte para descarga e 2) Moegas com esteira. No caso da ponte, o vagão é parado em cima da ponte e as comportas laterais são abertas e carga cai na parte de baixo da ponte e posteriormente a descarga de todos os vagões, pás mecânicas recolhem o produto e colocam em caminhões que os levam para as áreas de estocagem. Dentre os principais produtos descarregados por este meio, citam-se: calcário, gusa, clínquer, escória, areia, minérios (manganês, cromo, etc.), coque, pelotas, etc. Os vagões mais empregados nesta operação são os de modelo GF que são abertos e têm comportas laterais.

Nas moegas com esteira, tem-se a descarga dos vagões por gravidade, no entanto a carga cai sobre transportadores de correia que levam a carga até armazéns ou silos. Neste processo, destacam-se os seguintes produtos descarregados: grãos em geral, farelo, fertilizantes, cal, magnesita, fosfato, enxofre, açúcar, etc. Os vagões mais empregados são os do tipo *Hopper*, HF, com abertura na parte de baixo denominada tremonhas (CVRD, 2001).

Para se dimensionar de modo correto um terminal ferroviário é fundamental o conhecimento da programação de viagens na malha ferroviária que se destinam ao terminal, contendo os seguintes dados: 1) número de trens que chegam por dia; 2) número e tipo de vagões por trem; 3) cargas transportadas; 4) clientes; 5) o tempo estimado de carregamento e descarga; 6) restrições de tempo máximo de permanência dos vagões no terminal, estadia de vagões. Uma vez construído o terminal, faz-se diariamente a elaboração da programação das atividades do terminal e cabe ao CPT programar todas as atividades do terminal ferroviário. Esta programação deve ser feita de tal forma que se utilizem da melhor forma possível os recursos que o terminal possui em função da oferta de vagões que está programada para o terminal, isto é, a quantidade de vagões carregados e suas cargas e clientes e a quantidade de vagões vazios. Uma das métricas mais usadas para avaliar a programação elaborada é o tempo de permanência dos vagões dentro do terminal, estadia. Um importante fator que torna o problema mais difícil é que ele é dinâmico, pois situações podem ocorrer ao longo do dia que demandem alterações da programação inicialmente feita. Dentre estas situações, citam-se: quebra de locomotivas; defeitos em chaves de AMV, quebra de equipamentos de manuseio de carga entre outros.

3. PROBLEMA DE ESCALONAMENTO DINÂMICO COM RESTRIÇÃO DE RECURSOS

O escalonamento é um processo de otimização no qual máquinas e recursos limitados são designados ao longo do tempo para atender diversas solicitações que são compostas de diversas atividades, denominadas tarefas. Normalmente, problemas de escalonamento quando tratados na prática, são problemas dinâmicos, pois sempre ocorrem imprevistos que obrigam a realização de novos planejamentos das atividades sempre que houver uma alteração no ambiente (BLAZEWICZ et. al., 2002). O problema de escalonamento pode ser caracterizado como um problema no qual são feitas solicitações, *jobs*, que possuem diversas tarefas, *tasks*, que para serem realizadas devem fazer uso de uma ou mais máquinas ou processadores, *processors*, e que necessitam ou não de recursos, *resources* (BLAZEWICZ et. al., 2002). Assim sendo, o problema de escalonamento pode ser definido matematicamente a partir de quatro conjuntos:

1. um conjunto $J = \{ j_1, j_2, \dots, j_q \}$ de q solicitações. Cada solicitação j_i possui x_i tarefas de T sendo que $(\sum_{i=1}^q x_i) \leq n$ tarefas.
2. um conjunto $T = \{ t_1, t_2, \dots, t_n \}$ de n tarefas;
3. um conjunto $P = \{ p_1, p_2, \dots, p_m \}$ de m máquinas;
4. um conjunto $R = \{ r_1, r_2, \dots, r_s \}$ de s recursos.

Criar o escalonamento significa alocar máquinas do conjunto P e recursos do conjunto R às tarefas do conjunto T a fim de completar as solicitações do conjunto J com todas as suas tarefas do conjunto T e suas respectivas restrições. No entanto, como está sendo tratado o problema com restrição de recursos, faz-se a seguinte consideração: Existem s recursos

r_1, r_2, \dots, r_s que estão disponíveis em quantidades m_1, m_2, \dots, m_s unidades respectivamente. Cada tarefa t_j necessita para seu processamento certa quantidade fixa de recursos que é registrada no vetor de recursos requeridos $R(t_j) = [r_1(t_j), r_2(t_j), \dots, r_s(t_j)]$, onde $r_l(t_j)$ determina o número de unidades de recursos r_l que é necessário para executar a tarefa t_j e $r_l(t_j)$ deve obedecer a seguinte restrição: $0 \leq r_l(t_j) \leq m_l$.

Com base na formulação anterior, podem ocorrer dois tipos de restrições referentes aos recursos no problema de escalonamento: 1) inexistência do tipo de recurso necessário e 2) quantidade insuficiente de recursos de um tipo específico pelo tempo de execução da tarefa. Para completar a definição do problema dinâmico tratado deve-se considerar que o conjunto T é dependente do tempo, $T(t)$.

Os processadores, para o problema estudado são classificados como *Paralelo*, pois executam sempre as mesmas funções, independentemente das tarefas.

Os recursos são classificados como *renovável*, porque ocorre a situação na qual uma tarefa usa um recurso e ao liberá-lo, ele contém a mesma quantidade que tinha quando a tarefa iniciou o seu uso. Como exemplos, têm-se: um guindaste, um desvio, etc. Uma segunda classificação dos recursos pode ser feita com base na divisibilidade dos recursos. Por esta classificação o recurso é considerado *discreto*, ou seja, é aquele recurso que só pode ser alocado de maneira discreta, não pode ser alocado parcialmente. Como exemplos, têm-se: um guindaste; um desvio, etc., pois não se pode alocar meio guindaste ou meio desvio.

No problema tratado, cada tarefa t_i de T é caracterizada pelas seguintes informações:

1. tempo de processamento. É o tempo p_{ij} que o processador p_i leva para processar a tarefa t_j ;
2. tempo de chegada, a_j . Representa o tempo (t) no qual a tarefa t_j está pronta para iniciar o processamento;
3. tempo limite de término, d_j . É o tempo limite no qual cada tarefa t_j deve terminar seu processamento. Caso ele não seja cumprido, podem-se atribuir penalidades em função do atraso do término;
4. prioridade, w_j . Expressa a prioridade de cada tarefa t_j tem em relação às outras tarefas;
5. lista de recursos necessários.

As tarefas podem esperar entre o seu término em um processador e o seu início em outro processador, pois existe um *buffer* entre eles. As tarefas podem ser, também, classificadas quanto à possibilidade de execução simultânea dela com outras tarefas e, assim têm-se as tarefas para o problema como sendo *seqüenciais*, ou seja, as atividades só iniciam a execução quando a anterior libera o processador.

No problema tratado existe a remota possibilidade das tarefas perderem o direito de processamento (i.e. possam ser interrompidas) para que outra tarefa possa ser executada e, neste caso, o problema de escalonamento é classificado como *preemptivo*. No entanto, para efeito deste artigo, o problema é classificado como *não preemptivo*, ou seja, uma vez que se inicie o carregamento ou a descarga de um lote de vagões, esta operação só será encerrada

após todo o carregamento ou toda a descarga forem concluídas.

No que diz respeito à sequência da execução das tarefas, elas são denominadas de dependente. Isto porque no conjunto T ocorre a situação na qual t_j deve iniciar somente após t_i terminar. Esta situação é chamada de restrição de precedência. A tarefa também pode ser classificada em relação a sua *disponibilidade*. Uma tarefa t_j é dita disponível se num tempo (t) têm-se $a_j \leq (t)$ e todas suas antecessoras tenham terminado de executar até o tempo (t) .

As tarefas do conjunto T num determinado tempo (t) devem respeitar as condições a seguir:

1. a cada instante, cada processador é designado para no máximo uma única tarefa e cada tarefa é processada por no máximo um processador. Esta restrição pode ser relaxada;
2. a tarefa t_{ij} é processada numa janela de tempo $[a_j, \infty)$;
3. todas as tarefas devem ser executadas;
4. se ocorre restrição de precedência entre as tarefas t_i e t_j , o processamento de t_j não pode começar antes de t_i estar concluída;
5. caso ocorra alguma restrição de recurso, elas devem ser satisfeitas.

A seguir, são apresentados os parâmetros de controle de qualidade do escalonamento referentes à tarefa t_j :

1. tempo de término, C_j , representa o instante que a tarefa terminou;
2. tempo de processamento, $F_j = C_j - a_j$, é o resultado da subtração do tempo de término menos o tempo de chegada. Este tempo representa o tempo total que a tarefa gastou para processar;
3. tempo de atraso, $L_j = C_j - d_j$, é a subtração do tempo de término menos o tempo limite de término. Se L_j for negativo, ocorreu um processamento “bom”, pois ele terminou antes do limite. Se L_j for positivo, ocorreu um processamento “ruim”, pois ele ultrapassou o limite estabelecido.

A qualidade dos escalonamentos pode ser avaliada por diversas métricas, como exemplos, têm-se: 1) tempo total de operação; 2) número de tarefas realizadas e 3) total de tempo de atraso, etc. Um escalonamento que tiver sua medida de performance no seu mínimo pode ser dito que é um escalonamento ótimo. Na próxima seção são apresentados os critérios para o modelo proposto.

4. MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO PARA A PROGRAMAÇÃO DAS ATIVIDADES DE UM TERMINAL FERROVIÁRIO DE CARGA

Com base nos levantamentos dos itens componentes de um terminal ferroviário, descritos na seção 2, e com base no problema de escalonamento dinâmico com restrição de recursos, descrito na seção 3, é proposto, nesta seção, o modelo matemático para representar o terminal ferroviário e permitir sua programação diária. Assim sendo, o modelo matemático é definido por:

1. um conjunto de programação de trens para o terminal $Ptt = \{ tr_1, tr_2, \dots, tr_{nt} \}$ de nt trens que chegam para o terminal. Cada trem tr_i pode possuir vários lotes de vagões, sendo o lote definido por cliente e carga;

2. um conjunto dos lotes de cada trem tr_i do conjunto Ptt , $Trem = \{ lt_1, lt_2, \dots, lt_{nl} \}$ de nl lotes. Cada lote deve conter a informação da carga a ser operada no terminal, os tipos de vagões e o cliente;
3. um conjunto de instalações para o carregamento e a descarga de vagões $Ins = \{ ins_1, ins_2, \dots, ins_{ni} \}$ de ni instalações;
4. um conjunto de equipamentos utilizados no carregamento e na descarga dos vagões $Eq = \{ e_1, e_2, \dots, e_{ne} \}$ de ne equipamentos;
5. um conjunto de produtos que o terminal pode carregar e descarregar em função de suas instalações e equipamentos $Prod = \{ p_1, p_2, \dots, p_{np} \}$ de np equipamentos;
6. um conjunto de atividades para o carregamento e a descarga de cada lote, $Ativ = \{ at_1, at_2, \dots, at_{na} \}$ de na atividades.

Criar a programação diária do terminal significa alocar instalações do conjunto Ins e equipamentos do conjunto Eq às atividades do conjunto $Ativ$ a fim de carregar e descarregar os produtos dos lotes do conjunto $Trem$ referentes aos trens que estão para chegar ao terminal, representados no conjunto Ptt . É necessário, ainda, os seguintes conjuntos para se fazer a ligação entre os diversos conjuntos apresentados:

1. um conjunto de relação entre o produto a ser carregado ou descarregado e as atividades necessárias para que seja realizado o carregamento e a descarga $ProdAtv = \{ pa_{(p_1 at_1)}, pa_{(p_1 at_2)}, pa_{(p_2 at_5)}, \dots, pa_{(p_{np} at_{na})} \}$. Este conjunto representa que para certo produto, pelo menos uma atividade ou várias atividades devem ser realizadas para que o produto seja carregado ou descarregado no terminal;
2. um conjunto de relação entre cada atividade e quais as instalações que podem executá-la $AtvIns = \{ ain_{(at_1 ins_1)}, ain_{(at_1 ins_2)}, ain_{(at_2 ins_5)}, \dots, ain_{(at_{na} ins_{ni})} \}$. Este conjunto representa quais instalações devem ser usadas quando se deseja realizar uma atividade específica;
3. um conjunto de relação entre as instalações e os equipamentos que podem operar nela $InsEq = \{ ir_{(ins_1 e_1)}, ir_{(ins_1 e_2)}, ir_{(ins_2 e_5)}, \dots, ir_{(ins_{ni} e_{ne})} \}$. Este conjunto representa que um ou mais equipamentos podem ser usados numa instalação específica e, pode-se ter um equipamento que seja usado por mais de uma instalação, como exemplo citam-se as locomotivas de manobra.

Uma atividade do conjunto $ProdAtv$ deve iniciar somente após a imediatamente anterior a ela terminar, portanto o modelo tem restrição de precedência. Para cada atividade do conjunto $ProdAtv$, num determinado tempo (t), as seguintes condições devem ser respeitadas:

1. a cada instante, cada instalação do conjunto Ins é designada para no máximo um único lote e cada atividade do conjunto $ProdAtv$ é processada por no máximo uma instalação;
2. a atividade do conjunto $ProdAtv$ é processada numa janela de tempo $[c_i, \infty)$;
3. todas as atividades devem ser executadas para poder liberar o lote para sair do terminal;
4. caso ocorra alguma restrição de instalação ou equipamento, elas devem ser satisfeitas para a atividade ser realizada.

No problema tratado, cada lote que chega ao terminal, lt_i de $Trem$, é caracterizado pelas seguintes informações:

1. hora disponível para início, hd_i . Representa o tempo (t) no qual lote lt_i de $Trem$ está pronto para iniciar o carregamento ou descarga;
2. hora de início de operação, hi_i , representa o instante que o lote iniciou o carregamento ou a descarga;
3. hora de término, ht_i , representa o instante que o lote concluiu o carregamento ou a descarga;
4. tempo de operação, To_i . É o tempo de carregamento ou de descarga do lote lt_i usando as instalações do conjunto Ins e os equipamentos do conjunto Eq designados para a operação pelo conjunto $InsEq$. É o resultado da subtração do tempo de término menos a hora de início da operação e calculado pela fórmula $To_i = ht_i - hi_i$;
5. tempo de espera, Te_i , representa o tempo que o lote ficou aguardando da sua chegada até o início de operação, $Te_i = hi_i - hd_i$.
6. tempo de operação total, $Tt_i = ht_i - hd_i$, é o resultado da subtração do tempo de término menos hora disponível para início. Pode ser calculado, também, como $Tt_i = Te_i + To_i$. Este tempo representa o tempo total que o lote levou para ser carregado ou descarregado no terminal;

É previsto no modelo a possibilidade de certo lote lt_i concluir uma atividade e ficar aguardando para realizar a próxima atividade da seqüência. Para tanto, ele deve ficar parado nas linhas de estacionamento. Não pode haver dois lotes operando na mesma instalação simultaneamente.

A qualidade das programações elaboradas pelo modelo proposto para o terminal será avaliada por três métricas medidas num período de um dia, programação diária: 1) Número de lotes atendidos, representa quantos lotes foi possível atender em um dia; 2) Tempo total de operação dos lotes, representa o tempo total gasto para atender aos lotes que chegaram ao terminal e 3) Tempo total de espera para operar, representa o tempo que o lote ficou disponível para carregar, mas por falta de instalações ou recursos, o lote ficou aguardando para iniciar. O número de lotes atendidos é calculado pela fórmula

$Numlotes = \sum_{i=1}^n LotesConcluídos$, o tempo total de operação é calculado pela fórmula

$TotalOper = \sum_{i=1}^n Tt_i$ e o tempo total de espera para operar é calculado pela fórmula

$TotalEspera = \sum_{i=1}^n Te_i$.

5. APLICAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO PARA A PROGRAMAÇÃO DE ATIVIDADES EM UM TERMINAL FERROVIÁRIO

O modelo proposto está sendo aplicado no Terminal Rodo-ferroviário de Cargas de Colatina, da empresa Centronorte Logística, especializado em carregamentos de blocos de granito, mas, também operando outros produtos. O terminal é interligado à Estrada de Ferro Vitória a Minas e tem capacidade de movimentação de dois milhões de toneladas/ano. Com base no modelo apresentado na seção 4 deste artigo, foram carregados todos os conjuntos propostos.

Para exemplificar os dados contidos nos conjuntos propostos, são apresentados de forma reduzida seus conteúdos:

1. programação de trens para o terminal $Ptt = \{(C16, 12:20), (C18, 14:40), \dots, (C19, 17:00)\}$;
2. lotes de cada trem a ser recebido no terminal
 $Trem = \{(C16, (L1, Granito, 10PME, Granasa), (L2, Torete, 15PEE, Aracruz)), (L3, Granito, 10PME, Marbrasa)\}$;
3. instalações para o carregamento e a descarga de vagões $Ins = \{(D01, Desvio01), (D02, Desvio02), (D03, Desvio03), \dots\}$;
4. equipamentos utilizados no carregamento e na descarga dos vagões
 $Eq = \{(PR01, PonteRolante01); (PR02, PonteRolante02); (GT01, Guindaste para torete01), (LO01, LocoManobra01), (LO02, LocoManobra02) \dots\}$;
5. produtos que o terminal pode carregar e descarregar $Prod = \{(G, Granito), (T, Torete), (B, Bobinas)\}$;
6. atividades para o carregamento e a descarga de cada lote $Ativ = \{(P01, Posicionar vagões no Desvio01), (P02, Posicionar vagões no Desvio02), (P03, Posicionar vagões no Desvio03), (CG01, Carregar granito Desvio 01), (DG01, Descarregar granito Desvio 01), (CT03, Carregar toretes Desvio 03) \dots\}$;

Também, foram inseridos dados nos seguintes conjuntos visando fazer a ligação entre os diversos conjuntos anteriormente apresentados:

1. relação entre o produto a ser operado e as atividades necessárias para que seja realizado o carregamento (C) e a descarga (D) $ProdAtv = \{(G, C, (P01, CG01)), (G, D, (P01, CG01)), (T, C, (P03, CG03)), (T, D, (P03, CG03)) \dots\}$.
2. relação entre cada atividade e quais as instalações que podem executá-la $AtvIns = \{(P01, D01), (P02, D02), (CT03, D03), \dots\}$;
3. relação entre as instalações e os recursos que podem operar nela $InsEq = \{(D01, (L01, L02, PR01)), (D02, (L01, L02, PR02)), (D03, (L01, L02, GT02)), \dots\}$.

Com base nos conjuntos acima, foram acompanhadas as atividades de programação diária do terminal Centronorte nos meses de março e de abril de 2007. Foram, então, comparados os valores das três métricas propostas obtidas usando o modelo matemático proposto e as obtidas pelo processo manual do CPT. Os resultados foram promissores, pois na maioria das vezes, 97%, a programação realizada através do modelo matemático conseguiu obter valores para as três métricas iguais aos alcançados pelo CPT, em 2% dos casos as métricas da programação realizada pelo CPT obtiveram valores melhores do que o modelo matemático proposto e em 1% dos casos o modelo matemático obteve melhores resultados.

6. CONCLUSÕES

O modelo matemático para a programação de atividades de um terminal ferroviário foi proposto e está proporcionando um padrão operacional para que o CPT possa fazer a programação das atividades do terminal de forma sistêmica e padronizada. Ele pode, ainda, proporcionar uma melhor utilização dos recursos do terminal ferroviário, bem como, na medida do possível, reduzir o tempo de estadia dos lotes de vagões no terminal.

Os testes apresentaram resultados de forma consistente com o que é alcançado atualmente e, em poucas situações, alcançou resultados inferiores, pois o modelo não contempla a experiência do CPT para situações específicas. Nos casos em que o modelo obteve uma programação melhor do que a elaborada pelo CPT, foi devido a ele não ter procedimentos específicos e, então, ele não considera certos fatores por um descuido nas informações. No

entanto, acredita-se que à medida que o modelo matemático venha a ser implantado de forma automatizada através de um sistema computacional, ele obterá muitos ganhos em agilidade na elaboração da agenda, na padronização das atividades e na rapidez para atender a dinamicidade do problema. Serão ganhos tão grandes que superam estes poucos casos que o modelo não atendeu tão bem quanto ao processo manual, além do que, pode-se analisar as situações ocorridas e incluí-las no modelo.

Como trabalhos futuros têm-se duas vertentes: 1) a expansão dos testes para outros terminais de maior porte e com maior variedade de produtos movimentados para poder validar o modelo e 2) Implementar em ferramenta computacional o modelo proposto, atualmente estão em estudo as ferramentas Arena e Preactor, sendo que esta última é a que vem apresentando melhor aderência ao modelo matemático proposto.

Agradecimentos

Agradecimento a CVRD-Estrada de Ferro Vitória a Minas e a CentroNorte Logística por terem permitido o acesso às informações operacionais e ao terminal visando a elaboração mais realista e prática desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSAD, Arjang. Analytical Models in Rail Transportation: An Annotated Bibliography. Boston: Working Paper, Massachussetts Institute of technology, 1977.
- BLAZEWICZ, Jacek, ECKER, Klaus, PESCH, Erwin, SCHMIDT, Guenter, WEGLARZ, Jan. Scheduling Computer and Manufactu-ring Process. Heidelberg :Springer Verlag, 2002.
- BRINA, Helvécio. Lapertosa. Estradas de Ferro. v. 1. Rio de Janeiro: LTC Livros Técnicos e Científicos S.A., 1983.
- CVRD, GAPEG. Procedimentos de Carregamento de Vagões. Ed. CVRD, Vitória: 2001.
- GOMES, Claudia Maria Nunes. Análise do Desempenho Operacional de Pátios Ferroviários. Dissertação(Mestrado). Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 1982.
- PARRADA, Victor Manuel. Um Modelo de Simulação de um Pátio Ferroviário. Dissertação (Mestrado), Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 1986.
- PETERSEN, ER.. Railyard modeling: Part II. The effect of yard facilities on congestion. Transportation Science;11:50-9, 1977.
- RANDALL, Rob. KURZ. Mary Beth. Genetic Algorithm to Minimize Earliness and Tardiness of Outbound Trains in a Rail Yard. San Francisco: In: INFORMS Annual Conference, 2005.
- ROSA, Rodrigo de Alvarenga. Ferrovias: Conceitos Essenciais. Vitória: Instituto Histórico e Geográfico do Espírito Santo, 2004.
- _____. Uma Abordagem Baseada em Negociação de Agentes para a Resolução do Problema de Alocação Dinâmica de Navio em Berços de Terminais Portuários. Tese (Doutorado), Vitória: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, 2006.
- ROSA, Rodrigo de Alvarenga, SCHNEEBELI, Hans Jorg Andreas, Uma Abordagem Humana Para Solução do Problema de Escalonamento Dinâmico Com Restrição de Recursos. Estudo de Caso: Terminal Portuário de Contêiner, In: XXXVII SBPO - Congresso da Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional, 2005.
- _____. Escalonamento da Descarga e Embarque de Caminhões em um Centro de Distribuição Usando Tecnologia de Agentes. In: XXXVI SBPO - Congresso da Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional, 2004.
- SABINO, Jodelson, STÜTZLE, Thomas, BIRATTARI, Mauro, LEAL, José Eugênio. ACO Applied to Switch Engine Scheduling in a Railroad Yard. ANTS Workshop, 2006.
- SHIELDS, C.B. Models for Railroad Terminals. IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics, SSC-2, 2, 123-127, Dec., 1966.
- _____. Models for Computer Scheduling of Railroad Terminals. IEEE International Convention Record, 14, part 6, 66-72, 1966.
- SHINOHARA, T. Theory of Freight Yard Planning. Bulletin of the International Railway Congress Association, 40, 3, 161-172, March, 1963.