

MODELAGEM DE SISTEMAS DE TERRAPLENAGEM: UMA APLICAÇÃO DAS REDES DE PETRI

Bruno de Athayde Prata
Ernesto Ferreira Nobre Júnior
Giovanni Cordeiro Barroso

bruno@nupeltd.ufc

nobre@nupeltd.ufc.br

gcb@fisica.ufc.br

Center of Research in Logistics, Transport and Development - NUPETD, Federal University of Ceará, Ceará, Brazil.

Abstract. *The highways are constructions that demand vast resources for their execution. In the several costs that compose the total construction cost of a highway, earth moving costs are the most prominent portion. The transportation equipments fleets used in the earth moving works have high operation and conservation costs, therefore the planning and the control of use these machines is indispensable for the rationalization of constructive process. The design methods of earth moving equipments teams suggested by literature don't characterize and optimize the machines operation. However, this operation can be represented for discrete events systems, fact that propitiates qualitative and quantitative analysis. In this paper we present a model, using Petri Nets, which represent the operational dynamics of an earth moving work. The Petri Nets are a consolidated technique of modeling and analysis of dynamic systems. Through a bibliographical revision was possible idealize a graphic and analytic model that represent the above-mentioned activities. Data were collected concerning a real case, being accomplished several simulations soon after, aiming the economic appraisal of several operational scenarios. As conclusion of the study, it can be stood out that simulation models are important to provide inputs to help decision making when managing earth moving planning and execution.*

Keywords: *Simulation, Discrete events systems, Time Petri Nets, Earth moving.*

1. INTRODUÇÃO

A terraplenagem é o conjunto de operações destinadas ao corte, carregamento, transporte, descarregamento, acabamento de superfície, umedecimento e compactação de materiais em uma obra de construção civil, objetivando adequar o terreno natural às especificações de projeto.

De acordo com Lima e Nobre Júnior (2004), os serviços de terraplenagem e pavimentação, por lidarem com a movimentação de milhares de toneladas de material e um grande número de equipamentos pesados, requerem uma atenção especial por parte dos construtores e dos órgãos contratantes. Assim, é necessário que a movimentação dos materiais entre cortes, jazidas e aterros seja feita de forma racional para que se consiga redução no custo das obras.

Em uma obra de movimentação de terra, empreiteiros tendem a utilizar quaisquer equipamentos disponíveis em vez de alocar a quantidade ótima de máquinas. Nestas situações, dados os materiais a serem utilizados e suas características, informações de vias de

transporte, método de transporte, etc., um modelo de simulação pode determinar a produção e o tempo esperado para realização de uma determinada atividade por parte de um conjunto de equipamentos (Jayawardane e Price, 1994).

O objetivo do trabalho reportado neste artigo foi elaborar um modelo, baseado em Redes de Petri com restrições de tempo (Time Petri nets – TPNs), que propicie uma compreensão da dinâmica operacional de equipes de pá-carregadeira e caminhão basculante, empregadas em obras de terraplenagem, viabilizando posterior simulação de cenários operacionais para apoio à decisão na gestão da obra.

A estrutura do trabalho é composta de cinco seções, descritas a seguir. Na primeira seção será feita uma introdução sucinta ao tema abordado, enfatizando a necessidade da metodologia proposta. Na segunda seção, serão expostas definições básicas sobre terraplenagem, assim como considerações sobre o dimensionamento de equipes mecânicas e modelos matemáticos aplicados em terraplenagem. A terceira seção destina-se a apresentar as Redes de Petri e sua extensão com restrições de tempo. Na quarta seção, será descrito e aplicado o modelo proposto, bem como os resultados de sua análise. Por fim, na quinta seção, serão feitas as considerações finais acerca do tema abordado, sendo, em seguida, apresentadas as referências bibliográficas que deram suporte ao trabalho.

2. TERRAPLENAGEM: CONCEITOS BÁSICOS

2.1 Definição de um sistema de terraplenagem

Segundo Prata e Nobre Júnior (2005), uma obra de Engenharia Rodoviária é um sistema composto essencialmente pelos seguintes elementos: (i) Materiais a serem utilizados e removidos; (ii) Equipamentos utilizados; (iii) Equipe técnica responsável pela execução; e (iv) Vias destinadas aos deslocamentos de equipamentos e indivíduos.

Os materiais são vitais para a construção de uma rodovia. As características topográficas do terreno e hidrológicas da região, as peculiaridades geotécnicas dos materiais contidos em volumes de corte, aterro e jazidas de empréstimo, a qualidade dos materiais constituintes das vias onde se movimentam os equipamentos, bem como os materiais envolvidos na construção das camadas e do revestimento do pavimento, se este houver, são fatores que influenciam, tanto o tempo quanto os custos inerentes à realização de uma obra desta natureza.

Os equipamentos utilizados para execução do projeto, dentre os quais podemos citar os caminhões, as carregadeiras e os *scrapers*, são elementos bastante relevantes nos custos unitários de quilômetro construídos de rodovia, assim como no tempo de execução de uma obra dessa magnitude.

Os indivíduos que participam da execução da obra, tais como engenheiros, técnicos, topógrafos e operadores de máquinas, são elos vitais para o desenvolvimento das atividades produtivas no canteiro de obra. É interessante ressaltar que erros em ensaios geotécnicos ou uma operação inadequada de um equipamento por parte de um operário podem acarretar em custos imprevistos pela equipe técnica.

Por fim, as vias por onde ocorrem os fluxos de transportes de insumos e expurgos resultantes da construção de estradas são elementos significativos na execução do projeto.

Obras dotadas de vias de acesso e de movimentação interna adequadas podem reduzir substancialmente o custo operacional dos equipamentos.

2.2 Equipamentos empregados na movimentação de terra

O cerne da discussão realizada neste texto é a alocação racional de equipamentos para as atividades de corte, carregamento, transporte e descarregamento. Conforme Ricardo e Catalani (1990), os equipamentos utilizados para este fim podem ser classificados em: (i) Unidades escavotransportadoras; (ii) Unidades escavocarregadoras; e (iii) Unidades de transporte.

As unidades escavotransportadoras são as que escavam, carregam e transportam materiais de consistência média a distâncias médias.

As unidades escavocarregadoras são as que escavam e carregam um outro equipamento, que é a unidade de transporte, de modo que o ciclo completo da terraplenagem, compreendendo as quatro operações básicas supracitadas, é executado por duas máquinas distintas.

O usual é que, para a realização de tais operações, sejam empregadas as seguintes equipes: (i) Escavadeira – caminhão basculante; (ii) *Pusher-scrapers*; e (iii) Pá-carregadeira – caminhão basculante.

As escavadeiras são equipamentos extremamente robustos, de alta produtividade e elevado custo operacional, destinados às operações de corte e carregamento. Seu emprego é justificável quando a quantidade de material a ser removida for considerável ou quando o tempo requerido para esta remoção for pequeno.

O *scraper* é um equipamento capaz de realizar quatro das operações básicas da terraplenagem: escavação, carga, transporte e descarga. Para vencer o atrito oriundo da operação de corte, os *scrapers* muitas vezes são auxiliados por tratores, denotados *pushers*. O trator do tipo *pusher* possui uma lâmina especial que o possibilita empurrar o *scraper*. Uma equipe *pusher-scraper* possui uma elevada produtividade, não sendo recomendada para elevadas ou diminutas distâncias de transporte.

Na construção de pequenas rodovias, bem como na movimentação de pequenos volumes de material, a equipe mais usual é a pá-carregadeira – caminhão basculante. As carregadeiras são equipamentos de pequena capacidade, baixo custo de operação e grande agilidade, utilizados no corte e carregamento de material. E, por fim, os caminhões basculantes são unidades de transporte destinadas ao transporte e à descarga de material, sendo imbatíveis para grandes distâncias de transporte.

2.3 Método de dimensionamento de equipes

O método tradicional de dimensionamento de equipes de pá-carregadeira e caminhão basculante, abordado por Ricardo e Catalani (1990), dispõe-se a determinar a quantidade de unidades de transporte a serem utilizadas em conjunto com uma carregadeira.

O rendimento ou produção de uma pá-carregadeira é calculado pela expressão (1).

$$Q = \frac{C \cdot \omega \cdot E \cdot k}{T} \quad (1)$$

em que:

- Q: produção da pá-carregadeira (m³/h);
- C: capacidade da pá-carregadeira (m³);
- ω: fator de empolamento do material escavado;
- E: Fator de eficiência da operação da máquina;
- k: Fator de eficiência da caçamba;
- T: tempo de ciclo pá-carregadeira (h).

Deve-se determinar o número de caçambadas ou viagens requeridas para o carregamento do caminhão por parte da pá-carregadeira.

$$n = \frac{q}{C \cdot k} \quad (2)$$

em que:

- n: número de caçambadas;
- q: capacidade do caminhão (m³);
- C: capacidade da pá-carregadeira (m³);
- k: Fator de eficiência da caçamba.

A seguir, determina-se o tempo necessário para a carregadeira completar a carga da unidade de transporte.

$$t_C = n \cdot T \quad (3)$$

em que:

- t_C: tempo para a carregadeira completar a carga do caminhão (h);
- n: número de caçambadas;
- T: tempo de ciclo pá-carregadeira (h).

O tempo de ciclo completo da unidade de transporte é calculado pela equação a seguir.

$$t_B = t_C + dm \left[\frac{1}{V_{IDA}} + \frac{1}{V_{VOLTA}} \right] t_D + t_M \quad (4)$$

em que:

- t_B: tempo de ciclo do caminhão (h);
- t_C: tempo para a carregadeira completar a carga do caminhão (h);
- dm: distância média de transporte (km);
- V_{IDA}: velocidade do veículo carregado (km/h);
- V_{VOLTA}: velocidade do veículo descarregado (km/h);
- t_D: tempo de descarga do caminhão (h);
- t_M: tempo de manobra do caminhão (h).

O número de caminhões a serem atendidos por uma carregadeira será:

$$N = \frac{t_B}{t_C} \quad (5)$$

em que:

N: número de caminhões a serem atendidos por uma carregadeira;

t_B : tempo de ciclo do caminhão (h);

t_C : tempo para a carregadeira completar a carga do caminhão (h).

Tendo em vista o elevado número de variáveis envolvidas no cálculo do tempo de ciclo dos equipamentos em questão, é pouco provável que t_B e t_C sejam múltiplos e, conseqüentemente, que N seja um número inteiro. Como o número de equipamentos a ser alocado para a movimentação de terra em um trecho de via necessariamente deve corresponder a um valor discreto, sendo assim, opta-se pelo uso do número inteiro imediatamente inferior ou superior, conforme o ilustrado nas equações (6) e (7).

$$N > \frac{t_B}{t_C} \quad (6)$$

$$N < \frac{t_B}{t_C} \quad (7)$$

No caso de se adotar o número inteiro imediatamente inferior, haverá ociosidade por parte da pá-carregadeira e os caminhões basculantes irão governar a produção. Caso contrário, haverá ociosidade dos caminhões basculantes e a carregadeira irá governar a produção. Na prática é preferível que as carregadeiras governem a produção, pois tal hipótese propicia uma maior fluidez na dinâmica da obra.

O método usual de dimensionamento de equipes de pá-carregadeira e caminhão basculante é ineficiente por que: (i) permite a ociosidade na operação de equipamentos; (ii) não considera variações nos tempos de ciclo das operações das máquinas devidas às incertezas, ou seja, trata-se de um modelo determinístico; e (iii) não permite ao analista uma compreensão da dinâmica operacional da equipe dimensionada e, por conseguinte, dificulta o planejamento da obra.

Deste modo, justifica-se a busca de novos métodos que supram as carências da metodologia corrente.

2.4 Modelagem matemática aplicada em problemas de terraplenagem

As abordagens de simulação permitem uma maior compreensão do sistema modelado, porém não propiciam necessariamente soluções ótimas. As abordagens de otimização apontam para a melhor configuração do sistema modelado, contudo, são essencialmente normativas, não permitindo uma maior compreensão do sistema modelado. A seguir, é relatada a análise de algumas proposições de modelagem de sistemas de terraplenagem, evidenciando os benefícios e desvantagens de cada uma delas.

Jayawardane e Price (1994), num modelo bastante extenso, apresentam uma nova abordagem para a otimização de operações de terraplenagem. Neste trabalho propõe-se a utilização de programação linear e inteira, em conjunto com simulação computacional, de modo a minimizar o custo total da obra. A possibilidade de levar em conta no modelo as

operações dos equipamentos e a duração da obra foi inovadora. Tal metodologia, entretanto, devido à sua alta complexidade, dificulta sua aplicação prática.

Henderson *et al.* (2003) apresentam um modelo, baseado na metodologia *simulated annealing*, que otimiza a rota dos equipamentos em uma obra de terraplenagem. Reduzindo a distância total percorrida pelos equipamentos de terraplenagem, ter-se-á uma redução dos custos de operação em termos do consumo de combustível, tempo de operação e manutenção do equipamento. Uma crítica a esta abordagem é que, apesar de propiciar resultados satisfatórios, ela não permite uma compreensão do sistema modelado e tampouco propicia a idealização de cenários. O modelo em questão é basicamente normativo.

Yang *et al.* (2003) apresentam um modelo, baseado em lógica fuzzy, destinado a simular o tempo de ciclo de uma unidade escavadora. Esta abordagem propiciou uma solução adequada ao problema do prognóstico preciso do tempo de ciclo, contudo, do ponto de vista da aplicação prática do modelo, os mecanismos da teoria fuzzy, por consistirem em uma teoria matemática complexa, dificultam sua aplicabilidade no meio técnico da construção civil.

Lima (2003) propõe um modelo matemático que relaciona dados geométricos e geotécnicos de uma obra rodoviária com a distribuição dos materiais visando um custo mínimo de execução. A abordagem em questão, que busca otimizar não somente a terraplenagem como também os serviços de pavimentação, considera a utilização de misturas e a alocação de usinas, condição não considerada em nenhum dos modelos analisados. Contudo, o trabalho em questão não contempla a operação dos equipamentos de terraplenagem e de pavimentação.

Pode-se perceber a potencialidade dos modelos propostos, no que tange à redução de custos em obras de terraplenagem. Dentre as suas principais limitações, podem-se destacar: (i) complexidade como fator de impedância de sua aplicação prática; e (ii) são pobres no que diz respeito à compreensão, por parte do analista, do sistema modelado.

3. REDES DE PETRI

A teoria das redes de Petri nasceu da tese defendida por Carl Adam Petri na Faculdade de Matemática e Física da *Technical University of Darmstadt* (Alemanha), em 1962, intitulada “Comunicação com autômatos”. No final da década de sessenta e início da década de setenta, pesquisadores do renomado *Massachusetts Institute of Technology – MIT* (EUA) idealizaram as bases do conceito das Redes de Petri como a conhecemos hoje.

Segundo Palomino (1995), as redes de Petri (RdP) são um modelo do tipo estado-evento, onde cada evento possui pré-condições que vão permitir sua ocorrência e pós-condições, as quais são por sua vez pré-condições de outros eventos posteriores. A técnica em questão pode ser vista como uma evolução do conceito da Teoria dos Grafos, pois nas RdP existem dois tipos de nós (*P* e *T*) e dois tipos de arcos (*Pre* e *Post*). Formalmente uma rede de Petri é uma quádrupla (Cardoso e Valette, 1997).

$$R = \langle P, T, Pre, Post \rangle \quad (8)$$

em que:

- P é um conjunto finito de lugares de dimensão n ;
- T é um conjunto finito de transições de dimensão m ;
- $Pre: P \times T \rightarrow N$ é a aplicação de entrada (lugares precedentes ou incidência anterior), com N sendo o conjunto dos números naturais;
- $Post: P \times T \rightarrow N$ é a aplicação de saída (lugares seguintes ou incidência posterior).

Uma Rede de Petri marcada é uma dupla

$$N = \langle R, M \rangle \tag{9}$$

em que:

- R é uma rede de Petri;
- M é uma marcação dada pela aplicação $M : P \rightarrow N$.

A marcação é um número inteiro não-negativo associado a cada lugar, sendo representada por um vetor n -dimensional

$$M = (m_1, m_2, \dots, m_j)^T \tag{10}$$

em que:

m_j é o número de fichas do lugar p_j .

A rigor, a marcação é um vetor coluna, sendo o vetor transposto ao vetor linha apresentado na equação (10). Na prática, é usual ser omitida a denotação de vetor transposto.

A marcação num determinado instante representa o estado da Rede de Petri ou, mais precisamente, o estado do sistema descrito pela RdP; assim, a evolução do estado do sistema corresponde a uma evolução da marcação, a qual é causada pelo disparo de transições como veremos posteriormente. Um exemplo de representação gráfica de uma rede de Petri é apresentado na Figura 1.

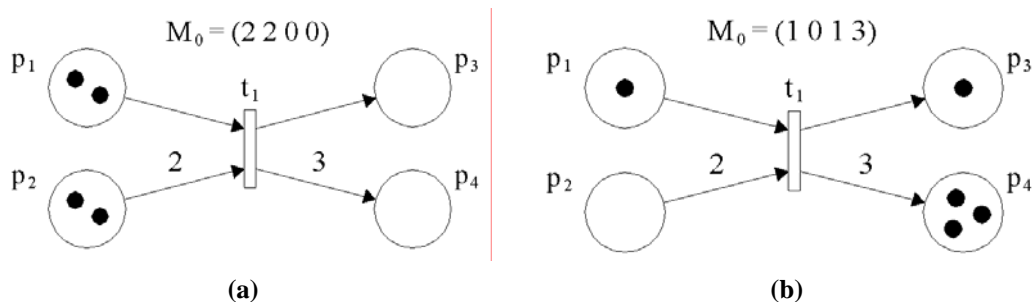


Figura 1- Exemplo do disparo de uma transição

Fonte - Yamada *et al*, 2001.

Os círculos representam os lugares, o retângulo representa a transição, as setas que saem dos lugares e chegam na transição representam *Pre*, as setas que saem da transição e chegam nos lugares representam *Post* e os discos negros representam as marcações. A estas marcações damos o nome de *fichas*.

Yamada *et al* (2001) afirmam que um lugar pode ser utilizado como indicação de um *estado* do sistema (conjunto dos valores atuais dos parâmetros que definem um dado sistema, num dado instante). Um lugar possui os seguintes atributos: identificação e marcação. A identificação diferencia um lugar dos demais e a marcação equivale ao número de fichas

contidas em um lugar. As fichas simplesmente indicam que as condições associadas aos lugares são verdadeiras.

As transições podem representar operações ou ações realizadas pelo sistema, possuindo os seguintes atributos: identificação e, para as Redes de Petri temporais, o tempo, que indica quanto tempo é gasto no seu disparo. Um arco que sai de um lugar que chega a uma ou mais transições indica, juntamente com as fichas, as condições para que uma ação seja realizada.

Um arco originado em uma transição que se destina a um ou mais lugares representa as funções que geram os estados após a execução da ação. Um arco com peso k , em que k é um número inteiro positivo, pode ser interpretado como um conjunto k de arcos paralelos. Os arcos com peso um usualmente têm seu peso omitido na representação gráfica.

Uma transição é considerada apta a disparar quando o número de fichas contidas em um lugar é maior ou igual ao peso dos arcos de precedência. Quando isto ocorre, a transição t_i é dita *habilitada*, estando pronta para o disparo. Como podemos verificar pela RDP apresentada na Figura 1, ao disparar t_1 , uma ficha é retirada do lugar p_1 , duas fichas são retiradas do lugar p_2 , uma ficha é adicionada ao lugar p_3 e três fichas são adicionadas ao lugar p_4 .

Conforme Berthomieu e Diaz (1991), existem sistemas que possuem seu comportamento baseado em parâmetros temporais explícitos. Utilizar e ampliar o conceito das redes de Petri clássicas, ou seja, adicionar características de tempo às transições, possibilita a aplicação desta técnica na modelagem de sistemas inerentes a diversos campos de conhecimento.

Segundo Cardoso e Valette (1997), uma rede de Petri temporal (RPT) é obtida associando-se a cada transição um intervalo $(\theta_{\min}, \theta_{\max})$, ou seja, a duração de sensibilização da transição deve ser maior do que θ_{\min} e menor do que θ_{\max} . Desta forma, pode-se associar um intervalo $[a, a]$ a uma transição para representar uma duração a . Se a transição estiver sensibilizada no tempo τ , ela irá disparar no tempo $\tau + a$, caso continue, nesta data, sensibilizada pela marcação.

Formalmente, uma rede de Petri temporal é um par:

$$Ntl = \langle N, I \rangle \quad (11)$$

em que:

- N é uma rede Petri $\langle P, T, Pre, Post \rangle$ com uma marcação inicial M_0 ;
- $I = \theta(t) = [\theta_{\min}(t), \theta_{\max}(t)]$ é uma função que, a cada transição t , associa um intervalo racional que descreve uma duração de sensibilização.

4. CONCEPÇÃO E APLICAÇÃO DO MODELO

4.1 Concepção do modelo

Com base na fundamentação teórica das redes de Petri temporais descritas no item 3, buscou-se representar os estados mais significativos da operação de uma equipe pá-carregadeira – caminhão basculante por lugares e os eventos que propiciam a mudanças destes estados por transições. Na Figura 2 é ilustrada a RPT que modela o sistema supramencionado. Os tempos associados às transições são apresentados na Tabela 2.

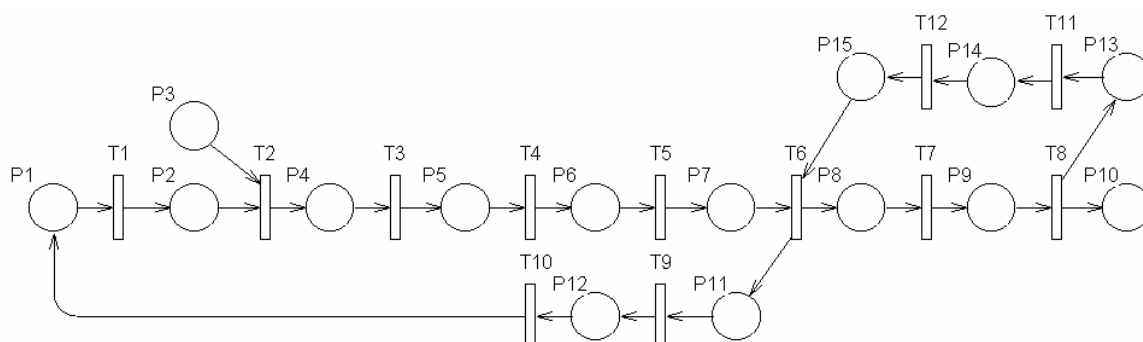


Figura 2- Rede Petri temporal que modela a operação de uma equipe pá-carregadeira e caminhão basculante em uma obra de terraplenagem.

O peso dos arcos de precedência dos lugares P₁₀ e P₁₅ e da transição T₇ deve ser igual à razão entre as capacidades do caminhão e da pá-carregadeira, arredondada, se necessário, para o número inteiro imediatamente superior. Tal condição garante que um caminhão só iniciará uma viagem quando estiver completamente carregado e só terminará uma viagem quando estiver completamente descarregado. As Tabelas 1 e 2 apresentam, respectivamente, as legendas dos lugares e das transições do modelo proposto.

Tabela 1. Legenda dos lugares da rede apresentada na Figura 2.

Lugares
P ₁ : pá-carregadeira próxima ao corte
P ₂ : pá-carregadeira pronta para a carga
P ₃ : quantidade de cortes a serem realizados
P ₄ : pá-carregadeira carregada
P ₅ : pá-carregadeira pronta para manobra
P ₆ : pá-carregadeira pronta para avançar
P ₇ : pá-carregadeira pronta para descarga
P ₈ : quantidade de cortes descarregados no caminhão
P ₉ : caminhão transportando solo
P ₁₀ : quantidade de cortes descarregados
P ₁₁ : pá-carregadeira vazia
P ₁₂ : pá-carregadeira pronta para nova manobra
P ₁₃ : caminhão vazio
P ₁₄ : caminhão retornando
P ₁₅ : relação capacidade caminhão/pá-carregadeira

Tabela 2. Legenda das transições da rede apresentada na Figura 2.

Transição	Tempo de disparo (s)
T ₁ : avanço da pá-carregadeira até o corte	2,16
T ₂ : carregamento da pá-carregadeira	3,00
T ₃ : retorno da pá-carregadeira	1,35
T ₄ : manobra da pá-carregadeira	3,00
T ₅ : avanço da pá-carregadeira até o caminhão	2,16
T ₆ : descarregamento da pá-carregadeira	3,00
T ₇ : transporte de material pelo caminhão	-
T ₈ : manobra e descarga do caminhão	78,00
T ₉ : retorno da pá-carregadeira para o corte	1,35
T ₁₀ : manobra da pá-carregadeira para efetuar o corte	3,00
T ₁₁ : retorno do caminhão	-
T ₁₂ : posicionamento do caminhão	18,00

Os tempos de disparo das transições foram calculados de acordo com a metodologia apresentada em Ricardo e Catalani (1990), sendo que estes tempos são admitidos pela literatura como fixos. No que tange aos tempos de disparo das transições T_7 e T_{11} , estes irão variar conforme cada caso, pois o tempo de trânsito de um caminhão basculante, tanto na ida quanto na volta, depende da distância média de transporte.

4.2 Aplicação do modelo

Para aplicar o modelo idealizado, foram coletados dados acerca de um projeto real de uma rodovia. O trecho Entroncamento CE-187/311 (Viçosa do Ceará) – Divisa Ceará/Piauí (Padre Vieira), está localizado na região noroeste do Estado e integra o Programa Rodoviário do Estado do Ceará. Na Figura 3 é ilustrado o Diagrama de Brückner obtido através da planilha de volumes acumulados oriunda do projeto geométrico da rodovia.

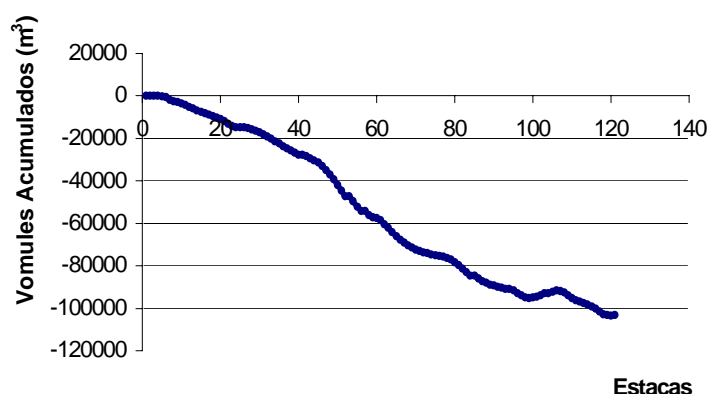


Figura 3 – Diagrama de Brückner do trecho analisado.

Analisando o gráfico apresentado na Figura 3, pode-se perceber que o trecho em questão é predominantemente de aterro,. Para efeito de aplicação do modelo proposto, será admitido que o material a ser movimentado é oriundo de uma jazida de empréstimo com uma distância média de transporte de 500 metros. Admitindo que um caminhão trafega carregado com a velocidade média de 30km/h, e que trafega descarregado com a velocidade média de 50km/h, os tempos de disparo das transições T_7 e T_{11} serão de 60 segundos e 36 segundos, respectivamente.

As capacidades do caminhão basculante e da pá-carregadeira serão consideradas, respectivamente, $12m^3$ e $2m^3$. Com o objetivo de realizar uma análise de sensibilidade do modelo em questão, serão realizadas simulações para dimensionar a equipe de máquinas requerida para efetuar a terraplenagem do trecho compreendido entre as estacas 40 e 45, sendo que o volume de aterro deste trecho corresponde a $8963,79m^3$. Admitindo como 1,4 a razão entre o peso específico do material no aterro e no corte, será requerido um volume de corte correspondente a $12549,30m^3$, e, por conseguinte, 6275 viagens de carregadeira serão realizadas.

As simulações foram realizadas com o auxílio do software STPNPlay, programa de domínio público destinado à modelagem e análise de redes de Petri estocásticas e temporais. O software em questão possui uma interface que possibilita o fácil manuseio por parte do usuário, propiciando bastante agilidade na idealização de cenários. Para simulação destes, altera-se a marcação da rede, roda-se o modelo e salva-se um arquivo com todos os disparos de transições e o tempo acumulado de operação do sistema.

Na Tabela 3 são apresentados os resultados obtidos nas simulações. As colunas 2 e 3 da tabela indicam os equipamentos empregados em cada cenário, sendo indicado, na coluna 4, o custo de operação horário das máquinas alocadas. Os dados inerentes a custos foram obtidos junto à Secretaria de Infra-Estrutura do Estado do Ceará – SEINFRA e correspondem às composições unificadas de custo desta instituição referentes ao mês de julho de 2005. A quinta coluna corresponde aos tempos de ciclo, em segundos, calculados pelo STPNPlay em cada cenário, a sexta coluna corresponde aos tempos de ciclo em horas e, por fim, a sétima coluna diz respeito ao custo de operação de cada cenário, valor obtido pelo produto entre a quarta e a sexta colunas.

Tabela 3. Resumo dos cenários de movimentação de terra.

Cenário	Número de carregadeiras	Número de caminhões	Custo unitário (R\$/h)	Tempo de ciclo (s)	Tempo de ciclo (h)	Custo do cenário (R\$)
1	1	1	205,3237	557874	154,96	31816,96
2	1	2	269,9918	151734	42,15	11380,15
3	1	3	334,6599	119443	33,18	11104,02
4	1	4	399,328	119443	33,18	13249,70
5	2	1	345,9793	246721	68,53	23709,96
6	2	2	410,6474	123461	34,29	14081,10
7	2	3	475,3155	82390	22,89	10879,97
8	2	4	539,9836	81680	22,69	12252,23
9	2	5	604,6517	81680	22,69	13719,55
10	3	1	486,6349	229964	63,88	31086,24
11	3	2	551,303	115082	31,97	17625,16
12	3	3	615,9711	81664	22,68	13970,22
13	3	4	680,6392	81664	22,68	15436,90
14	4	1	627,2905	226826	63,01	39525,57
15	4	2	691,9586	113513	31,53	21817,45
16	4	3	756,6267	81661	22,68	17160,29
17	4	4	821,2948	81661	22,68	18626,97

4.3 Discussão dos resultados

No que diz respeito aos tempos de ciclo, os cenários 16 e 17 se mostraram os mais adequados, apresentando menores tempos de operação. O cenário 16 foi o mais eficiente, pois apresentou um menor tempo de ciclo, com uma menor quantidade de caminhões, se comparado ao cenário 17. Um resumo do comportamento da variável tempo de ciclo ao longo dos cenários simulados é ilustrado na Figura 4.

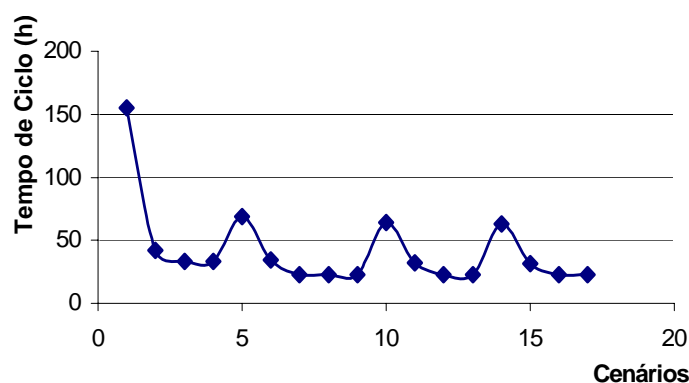


Figura 4 – Comportamento do tempo de ciclo ao longo dos cenários simulados.

No que diz respeito aos custos de operação do sistema, os cenários 16 e 17 não foram os mais eficientes, apesar de apresentarem menores tempos de ciclo. Estes cenários apresentam maior rapidez na execução da terraplenagem por empregarem uma quantidade maior de equipamentos, propiciando pequenos ganhos em termos de tempo para um elevado custo operacional. O cenário 7 é o cenário ótimo no que tange à redução de custos, pois minimiza o custo operacional. Um resumo do comportamento da variável custo operacional ao longo dos cenários simulados é ilustrado na Figura 5.

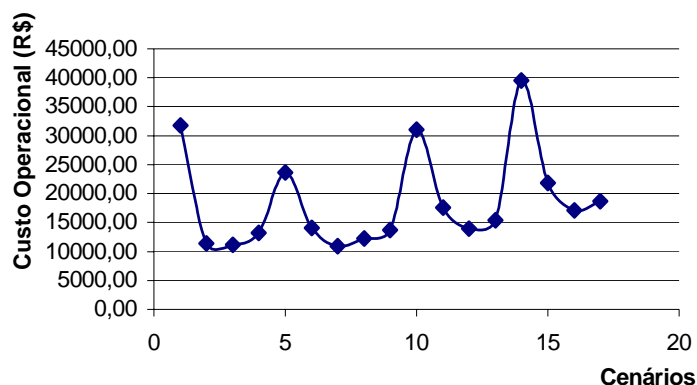


Figura 5 – Comportamento do custo operacional ao longo dos cenários simulados.

4.4 Propriedades estruturais e comportamentais

O conhecimento das propriedades estruturais e comportamentais de uma rede Petri propicia uma maior compreensão das características do sistema modelado. Para efeito de determinação das propriedades estruturais e comportamentais, a rede constante na Figura 2 foi editada no software INA, programa de domínio público, com interface MS-DOS, destinado à modelagem e análise de redes de Petri. Na Tabela 6, é apresentado um resumo das propriedades estruturais e comportamentais da rede modelada.

Tabela 6. Resumo das principais propriedades estruturais e comportamentais da rede modelada.

Propriedade	Descrição
1	A rede é estaticamente livre de conflitos
2	A rede é dinamicamente livre de conflitos
3	A rede é pura
4	A rede não é ordinária
5	A rede não é conservativa
6	A rede não é subconservativa
7	A rede não é uma máquina de estados
8	A rede é de escolha livre
9	A rede é de escolha livre estendida
10	A rede é estendida simples
11	A rede não é binária
12	A rede não é viva e binária
13	A rede possui lugares sem transição de precedência
14	A rede não é uma máquina de estados de possível decomposição
15	A rede não é fortemente conectada
16	A rede não é viva
17	A rede possui lugares sem transições <i>post</i>
18	A rede é marcada

Tabela 6. Resumo das principais propriedades estruturais e comportamentais da rede modelada.

Propriedade	Descrição
19	A rede não é marcada com exatamente uma ficha
20	A rede não é um grafo marcado
21	A rede é homogênea
22	A rede é estruturalmente limitada
23	A rede é limitada

Devido a restrições limitações, este trabalho não se aprofundará na discussão das propriedades expostas na Tabela 6. Com o intuito de apontar para a relevância e potencialidade da análise de tais propriedades, para a compreensão e validação do modelo em questão, serão feitos alguns comentários.

O fato de a rede ser estaticamente e dinamicamente livre de conflitos significa que o sistema não possui eventos que, em um dado instante, necessitem de um recurso comum para mudar de estado. O fato de a rede não ser viva significa que, em algum momento da operação do sistema, haverá um bloqueio devido à indisponibilidade de recursos ou a inexistência de novas atividades a serem realizadas. O fato de a rede ser limitada significa que o modelo é válido, no sentido que não existe uma incoerência na modelagem que propicie o aumento deliberado do número de fichas em um determinado lugar. Deste modo, evidencia-se a relevância das propriedades das redes de Petri para uma maior compreensão do sistema modelado.

É imprescindível comentar a importância do grafo de alcançabilidade de estados para a análise de uma rede, pois, através deste grafo, pode-se conhecer todos os estados do sistema modelado. Tal informação é extremamente valiosa e caracteriza-se como uma vantagem das redes de Petri sobre outras técnicas de simulação de sistemas a eventos discretos. Para sistemas complexos, entretanto, o número de estados pode explodir, dificultando a análise do grafo de alcançabilidade. O grafo de alcançabilidade de estados é um dado de saída usual dos editores de rede Petri correntes como, por exemplo, o INA e o TINA.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a modelagem da operação de equipamentos em uma obra de terraplenagem visto como um sistema a eventos discretos. Sendo assim, foram utilizadas as redes de Petri temporais para a modelagem e análise do sistema supracitado.

É imprescindível ressaltar a relevância e a originalidade do modelo aqui proposto. A aplicação das redes de Petri em sistemas de terraplenagem mostrou-se, além de inovadora, de grande valia para a idealização de cenários operacionais em obras de movimentação de terra.

Como vantagens do modelo proposto, pode-se destacar: (i) permitir uma maior compreensão da dinâmica operacional do sistema modelado, se comparado com outros modelos de simulação; (ii) permitir o acompanhamento da operação do sistema, a cada instante, por intermédio do grafo de alcançabilidade de estados; (iii) permitir a idealização de diversos cenários de operação, subsidiando a tomada de decisão na gestão da obra; (iv) permitir a identificação de gargalos e de propriedades intrínsecas ao sistema por intermédio de propriedades estruturais e comportamentais das redes de Petri; e (v) possuir fácil aplicação prática.

No que diz respeito a aplicabilidade do modelo proposto, podem ser feitos os seguintes comentários. Apesar da teoria das redes de Petri estar calcada em um arcabouço matemático complexo, manusear um modelo já estabelecido não se caracteriza como uma atividade difícil. A existência de softwares com interface orientada a objetos, como, por exemplo, o TINA e o STPNPlay, torna plenamente plausível o emprego do modelo proposto em obras de movimentação de terra. Basta a realização de treinamento do corpo técnico da obra para que este possa realizar, com autonomia, simulações que subsidiem a tomada de decisão.

O modelo em questão apresenta uma série de limitações e simplificações, dentre as quais podem-se ressaltar: (i) o modelo é determinístico; (ii) as simulações não apontam, necessariamente, para a operação ótima do sistema; e (iii) o modelo considera que os equipamentos possuem a mesma capacidade e produtividade.

Como sugestões para o aprofundamento do tema pesquisado e aperfeiçoamento do modelo proposto, recomenda-se: (i) utilização de redes de Petri estocásticas generalizadas (RPEG) a fim de considerar a aleatoriedade do sistema; (ii) utilização das redes de Petri coloridas (RPC), obtendo uma modelagem mais compacta e facilitando a consideração de equipamentos com capacidades e produtividades diferentes; (iii) a utilização conjunta do modelo proposto com algoritmos de otimização de modo a minimizar o custo total da obra de terraplenagem; e (iv) estender a modelagem a outras atividades básicas da terraplenagem e às atividades de pavimentação.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Professor José Renato de Brito Sousa pelo apoio inestimável na concepção do modelo proposto.

REFERÊNCIAS

Berthomieu, B., & Diaz, M. (1991), *Modeling and Verification of Time Dependent Systems Using Time Petri Nets*. In *IEEE Transactions on Software Engineering*, Vol. 17, n. 3, pp. 259-273.

Cardoso, J., & Valette, R. (1997), *Redes de Petri*. Ed. UFSC. Florianópolis.

Henderson D., Vaughan E. D. Jacobson S. H., Wakefield R. R., & Sewell E.C. (2003) *Solving the shortest route cut and fill problem using simulated annealing*. *European Journal of Operational Research*, vol. 145, , pp. 72-84.

Jayawardane, A. K. W., & Price, A. D. F. (1994), *A New Approach for Optimizing Earth Moving Operations*, Parts I and II, In: Proc. Instn. Civ. Engrs Transp., 105, pp. 195-207.

Lima, R. X. (2003) *Logística da Distribuição de Materiais em Pavimentação Rodoviária: uma Modelagem em Programação Matemática*. Fortaleza. Dissertação (Mestrado) Programa de Engenharia de Transportes - PETRAN, Universidade Federal do Ceará.

Lima, R.X., & Nobre Junior, E.F. (2004) *Logística Aplicada à Construção Rodoviária*. In: V Recontre Internationale de Recherche em Logistique - RIRL 2004, Fortaleza, Ceará.

Palomino, R.C. (1995), *Uma Abordagem para a Modelagem, Análise e Controle de Sistemas de Produção Utilizando Redes de Petri*. Florianópolis.

Prata, B.A., & Nobre Junior, E.F. (2005) *O uso de tecnologias de informação nas empresas de construção rodoviária: uma abordagem crítica e propositiva*. In: II Seminário Internacional de Gestão Tecnológica no Nordeste - INOVA 2005, Fortaleza, Ceará.

Ricardo, H.S., & Catalani, G. (1990), *Manual Prático de Escavação – Terraplangem e Escavação de Rocha*, Editora Pini, São Paulo, SP.

Yamada, C.M., Porto, A.J.V., & Inamasu, R.Y. (2001), *Aplicação dos conceitos de modelagem e de redes de Petri na análise do processo produtivo da indústria sucroalcooleira*. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 37, n. 6, pp. 809-820.

Yang, J., Edwards, D. J., & Love, P. E.D. (2003) *A computational intelligent fuzzy model approach for excavator cycle time simulation*. Automation in construction, vol. 12, , pp. 725-735.