

DIMENSIONAMENTO DE EQUIPES MECÂNICAS EM OBRAS DE TERRAPLENAGEM USANDO REDES DE PETRI COLORIDAS

Bruno de Athayde Prata

Universidade Federal do Ceará – Mestrado em Logística e Pesquisa Operacional.
Campus do Pici - Bloco 703 - Altos - CEP 60455-760. Fortaleza – CE – Brasil
e-mail: bprata@det.ufc.br

Ernesto Ferreira Nobre Júnior

Universidade Federal do Ceará – Mestrado em Logística e Pesquisa Operacional.
Campus do Pici - Bloco 703 - Altos - CEP 60455-760. Fortaleza – CE – Brasil
e-mail: nobre@ufc.br

Giovanni Cordeiro Barroso

Universidade Federal do Ceará – Mestrado em Logística e Pesquisa Operacional.
Campus do Pici - Bloco 703 - Altos - CEP 60455-760. Fortaleza – CE – Brasil
e-mail: gcb@fisica.ufc.br

RESUMO

As operações de equipamentos em obras de terraplenagem podem ser representadas pela teoria dos sistemas a eventos discretos, fato que propicia uma modelagem matemática. Este trabalho tem o objetivo de idealizar um modelo, baseado em redes de Petri coloridas, que possa representar a dinâmica operacional de uma obra de terraplenagem. Foi idealizado um modelo que representa, analiticamente e graficamente, as atividades supracitadas. Foram coletados dados acerca de um caso real, onde diversas simulações foram realizadas, objetivando a avaliação econômica dos cenários idealizados. Como conclusão do estudo, pode-se ressaltar que modelos de simulação são de grande utilidade no auxílio ao planejamento de obras de terraplenagem.

PALAVRAS CHAVE. Terraplenagem, Simulação, Redes de Petri Coloridas. LGT.

ABSTRACT

The earth moving operations can be represented for discrete events systems, fact that propitiates qualitative and quantitative analysis. In this paper we present a model, using Coloured Petri Nets, which represent the operational dynamics of an earth moving work. A graphic and analytic model that represents the above-mentioned activities was idealized. 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. Earth moving, Simulation, Colored Petri Nets. LGT.

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 qualquer quantidade de equipamentos disponíveis em vez de alocar a quantidade ideal de máquinas. Nestas situações, dados os materiais a serem utilizados, suas características, informações das vias de transporte e modo de transporte, um modelo de simulação pode determinar a produção e o tempo esperado, para a realização de uma determinada atividade, por parte de uma equipe de máquinas (JAYAWARDANE e PRICE, 1994).

O objetivo do trabalho reportado neste artigo foi elaborar um modelo, baseado em redes de Petri coloridas, que propicie uma compreensão da dinâmica operacional de equipes de pá-carregadeira e caminhão basculante, empregadas em obras de terraplenagem, viabilizando a simulação de cenários operacionais auxiliares ao planejamento da obra.

A estrutura do trabalho é composta de cinco seções, descritas a seguir. Na primeira seção, introduz-se o tema abordado. Na segunda seção, expõem-se as definições básicas sobre terraplenagem, considerando-se o dimensionamento de equipes mecânicas e os modelos matemáticos aplicados. Na terceira seção, apresentam-se as redes de Petri coloridas. Na quarta seção, descreve-se e aplica-se o modelo proposto e apresentam-se os resultados. Por fim, na quinta seção, são realizadas as considerações finais acerca do tema abordado, sendo, em seguida, apresentadas as referências bibliográficas que deram suporte ao trabalho.

2. Terraplenagem

2.1 Equipamentos empregados na movimentação de terra

O cerne da discussão realizada neste texto é a alocação racional de equipamentos para as atividades de corte, carga, transporte e descarga. 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 o solo 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, seja executado por duas máquinas distintas.

O usual, para a realização de tais operações, que sejam empregadas as seguintes equipes: (i) escavadeira – caminhão basculante; (ii) *pusher – scraper*; 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 pequenas distâncias de transporte.

Na construção de rodovias envolvendo a movimentação de pequenos volumes de material, a equipe mais usual é a pá-carregadeira – caminhão basculante. As carregadeiras são equipamentos de pequena capacidade de carga, baixo custo de operação e grande agilidade, utilizados em cortes, no carregamento de material. Os caminhões basculantes são destinados ao transporte e à descarga de material, sendo adequados para grandes distâncias de transporte.

2.2 Método de dimensionamento de equipes

O método tradicional de dimensionamento de equipes de pá-carregadeira e caminhão basculante, abordado por Ricardo e Catalani (1990), visa determinar a quantidade de unidades de transporte a ser utilizada 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 operações de carga 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 operações de carga;
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 operações de carga;
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 ser atendido por uma carregadeira será:

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

em que: N: número de caminhões a ser atendido por uma carregadeira;
 t_B : tempo de ciclo do caminhão (h);
 t_C : tempo para a carregadeira completar a carga do caminhão (h).

Na prática, têm-se observado que 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, 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 usual que a carregadeira governe a produção, pois tal hipótese propicia uma maior fluidez na dinâmica da obra.

O método corrente de dimensionamento de equipes de pá-carregadeira e caminhão basculante é ineficiente, apresentado as seguintes limitações: (i) permite a ociosidade na operação de equipamentos; (ii) não considera variações nos tempos de ciclo das operações das máquinas devido às incertezas, por ser um modelo determinístico; e (iii) não permite ao analista uma compreensão da dinâmica operacional da equipe dimensionada, dificultando o planejamento da obra.

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

2.3 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, propõem 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 e à ausência de interfaces computacionais com o usuário, dificulta sua aplicação prática.

Henderson *et al.* (2003) propõem um modelo, utilizando a meta-heurística *Simulated Annealing*, que otimiza a rota dos equipamentos em uma obra de terraplenagem, reduzindo a distância total percorrida pelos equipamentos. Este modelo implica numa redução dos custos operacionais no que diz respeito ao 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.

Alkass *et al.* (2003) apresentam um modelo de computador, denominado FLSELECTOR, destinado a seleção de frotas de equipamentos em operações de terraplenagem. Com base na Teoria das Filas, o modelo determina o número de caminhões e de escavadeiras a ser alocado em um dado contexto operacional, subsidiando o processo de tomada de decisão.

Bargstädt e Blickling (2005) propõem um sistema informatizado que realiza simulações de equipes de movimentação de terra, permitindo que o usuário estabeleça cenários em tempo real. O sistema possui uma interface gráfica que propicia a visualização dos cenários estabelecidos.

Prata *et al.* (2005) apresentam um modelo, baseado em redes de Petri ordinárias, que permite o dimensionamento de equipes pá-carregadeira e caminhão basculante através de simulação. No entanto, esse modelo não permite a distinção das máquinas empregadas, impossibilitando a avaliação da utilização ou da ociosidade destas em um dado cenário.

3. Redes de Petri Coloridas

Segundo Cardoso e Valette (1997), “sistemas a eventos discretos são sistemas modelados de tal sorte que as variáveis de estado variam bruscamente em instantes determinados e que os valores das variáveis nos estados seguintes podem ser calculados diretamente a partir dos valores precedentes sem ter que considerar o tempo entre estes dois instantes”. Neste caso, as equações diferenciais se mostram ineficientes para representar o comportamento do sistema, sendo requeridos outros métodos de análise.

As redes de Petri são um tipo de grafo bipartido, dirigido e ponderado, que consegue captar a dinâmica de Sistemas a Eventos Discretos (SED). Uma rede de Petri ordinária é uma quádrupla $RP = (P, T, Pre, post)$, formada por um conjunto finito P de lugares de dimensão n ; um conjunto finito T de transições de dimensão m ; uma aplicação de entrada $Pre: P \times T \rightarrow N$ e por uma aplicação de saída $Post: P \times T \rightarrow N$. A cada lugar é associado um número inteiro não-negativo denominado ficha.

Modelos com restrições de tempo podem ser desenvolvidos via redes de Petri, conforme pode se consultar em Berthomieu e Diaz (1991). Sistemas de manufatura, de transportes e de telecomunicações são alguns dos exemplos de aplicação da metodologia em questão.

Uma grande limitação das redes de Petri ordinárias, também denominadas redes lugar-transição, é o fato de que elas demandam uma grande quantidade de lugares e de transições para representar sistemas complexos (como os *sistemas reais*). Na medida em que a rede se expande, a visão geral do sistema modelado, por parte do analista, começa a ser comprometida, e a análise do sistema modelado, por parte do computador, começa a ser dificultada.

Os sistemas reais, muitas vezes, apresentam processos semelhantes que ocorrem paralelamente ou concorrentemente, diferindo entre si apenas pelos seus insumos e produtos. Nas redes de Petri coloridas, a quantidade de lugares, de transições e de arcos é, geralmente, sensivelmente reduzida pela adição de conjuntos de dados à estrutura da rede.

De acordo com Jensen (1992), uma representação mais compacta de uma rede de Petri é obtida através da associação de um conjunto de dados (denominados *cores* da ficha) a cada ficha. O conceito de *cor* é análogo ao conceito de *tipo*, comum nas linguagens de programação.

As Tabelas 1 e 2 apresentam, respectivamente, as legendas dos lugares e das transições do modelo proposto. A cada lugar é associada uma cor X , que abrange as variáveis pc , s e ca . Essas variáveis representam, respectivamente, as pás-carregadeiras, o número de viagens necessárias para movimentar um determinado volume de solo e os caminhões basculantes.

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 o método apresentado em Ricardo e Catalani (1990), sendo que estes tempos são admitidos como fixos. No que tange aos tempos de disparo das transições T₇ e T₁₁, estes variam conforme cada caso, pois o tempo de viagem de um caminhão basculante, tanto na ida quanto na volta, depende da distância média de transporte. Na seção seguinte, serão definidos, para o caso estudado, os tempos de disparo das transições T₇ e T₁₁.

4.2 Aplicação do modelo

Para aplicar o modelo proposto, foram coletados dados acerca do projeto do Entroncamento CE-187/311 (Viçosa do Ceará), Divisa Ceará/Piauí (Padre Vieira), localizado na região noroeste do Estado. A Figura 2 ilustra o Diagrama de Brückner obtido através da planilha de volumes acumulados oriunda do projeto geométrico da rodovia.

Analisando o gráfico apresentado na Figura 2, perceber-se que o trecho em questão é predominantemente de aterro. Para efeito de aplicação do modelo proposto, será admitido que o

material a ser movimentado seja oriundo de uma jazida de empréstimo com uma distância média de transporte de 500 metros. Admitindo que um caminhão trafegue carregado com a velocidade média de 30 km/h e descarregado com a velocidade média de 50 km/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, $10m^3$ e $2m^3$. Com o objetivo de realizar uma análise de sensibilidade do modelo, serão realizadas simulações para dimensionar a equipe de máquinas requerida para efetuar a terraplenagem do trecho compreendido entre as estacas 40 e 45, sendo o volume de aterro deste trecho correspondente a $8963,79m^3$. Admitindo-se como 1,4 a razão entre o peso específico do material no aterro e no corte, requer-se um volume de corte correspondente a $12549,30m^3$, e, por conseguinte, 6275 operações de carga da pá-carregadeira deverão ser realizadas.

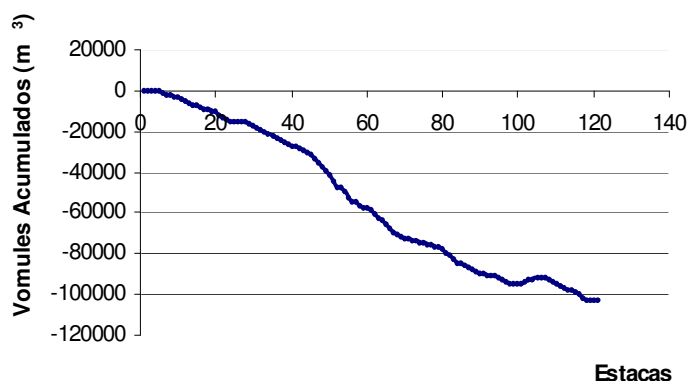


Figura 2: Diagrama de Brückner do trecho analisado.

O modelo foi implementado e simulado utilizando-se o *software CPNTools*, programa de domínio público desenvolvido pela Universidade de Aarhus, destinado à modelagem e à análise de redes de Petri coloridas. O *software* possui uma interface que possibilita o fácil manuseio por parte do usuário, facilitando a obtenção de cenários. A seguir, na Tabela 3, são apresentados os resultados obtidos nas simulações.

Tabela 3: Resumo dos cenários de movimentação de terra.

Cenário	Número de carregadeiras	Número de caminhões	Custo unitário (R\$/h)	Tempo de ciclo (h)	Custo do cenário (R\$)
1	1	1	205,3237	94,50	19403,09
2	1	2	269,9918	47,29	12767,91
3	1	3	334,6599	33,21	11114,06
4	1	4	399,3280	33,21	13261,68
5	2	1	345,9793	81,24	28107,36
6	2	2	410,6474	40,66	16696,92
7	2	3	475,3155	27,13	12895,31
8	2	4	539,9836	20,36	10994,07
9	2	5	604,6517	16,63	10055,36
10	3	1	486,6349	74,61	36307,83
11	3	2	551,303	37,34	20585,65
12	3	3	615,9711	24,91	15343,84
13	3	4	680,6392	18,69	12721,15
14	4	1	627,2905	74,61	46802,14
15	4	2	691,9586	37,34	25837,73
16	4	3	756,6267	24,91	18847,57
17	4	4	821,2948	18,68	15341,79

As colunas 2 e 3 indicam a quantidade de equipamentos empregados em cada cenário e, 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 horas, calculados pelo *CPNTools* em cada cenário e, por fim, a sétima coluna contempla o custo de operação de cada cenário, valores obtidos pelo produto entre a quarta e a quinta colunas.

4.3 Apresentação dos resultados

No que diz respeito aos tempos de ciclo, o cenário 9 se mostrou o mais adequado, apresentando menor tempo de operação. Um resumo do comportamento da variável tempo de ciclo, ao longo dos cenários simulados, é ilustrado na Figura 3.

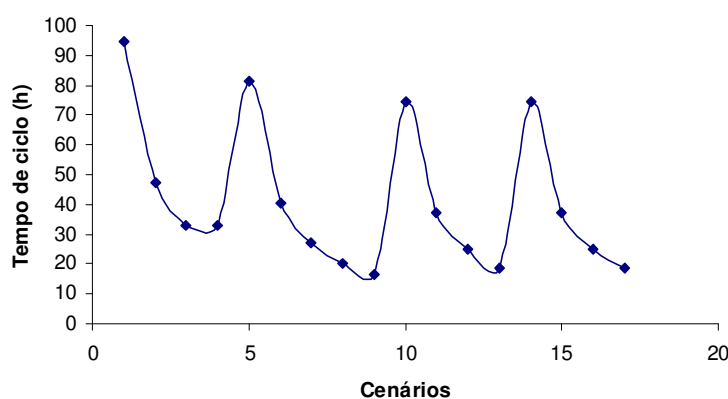


Figura 3: Comportamento do tempo de ciclo ao longo dos cenários simulados.

No que se refere aos custos de operação do sistema, o cenário 9 é o ótimo, no que tange à redução de custos, pois tem o menor custo operacional dentre os cenários analisados. Um resumo do comportamento da variável custo operacional ao longo dos cenários simulados é ilustrado na Figura 4.

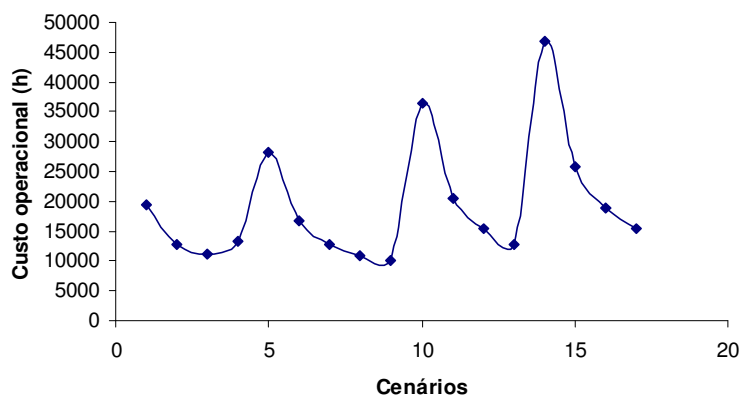


Figura 4: Comportamento do custo operacional ao longo dos cenários simulados.

5. Conclusões

Este trabalho apresentou a modelagem da operação de equipamentos em uma obra de terraplenagem vista como um sistema a eventos discretos. Sendo assim, foram utilizadas as redes de Petri coloridas 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 coloridas em sistemas de terraplenagem mostrou-se, além de inovadora, de grande utilidade para a idealização de cenários operacionais em obras de movimentação de terra.

Como vantagens do modelo proposto, podem-se destacar: (i) propiciar uma maior compreensão da dinâmica operacional do sistema modelado, se comparado com outros modelos de simulação; (ii) permitir a diferenciação dos equipamentos, e, por conseguinte, uma análise da taxa de utilização de cada máquina; (iii) possibilitar a idealização de diversos cenários de operação, subsidiando a tomada de decisão na gestão da obra; e (iv) ser de fácil aplicação prática.

No que diz respeito à aplicabilidade do modelo proposto, podem ser feitos os seguintes comentários. Apesar da teoria das redes de Petri estar calcada em um arcabouço matemático complexo, utilizar um modelo já estabelecido não se caracteriza como uma atividade difícil. A existência de *softwares*, como por exemplo, o *CPNTools*, 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 ser ressaltadas: (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, recomendam-se: (i) utilização de redes de Petri estocásticas generalizadas (RPEG) a fim de considerar a aleatoriedade do sistema; (ii) a utilização conjunta do modelo proposto com algoritmos de otimização de modo a minimizar o custo total da obra de terraplenagem; (iii) consideração de equipamentos com produtividades diferentes; e (iv) extensão da modelagem a outras atividades básicas da terraplenagem e às atividades de pavimentação.

Agradecimentos

O primeiro autor agradece a CAPES, pelo apoio fundamental para o desenvolvimento deste projeto de pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alkass, S.; El-Moslimani, K.; AlHussein, M.** (2003), *A Computer Model for Selecting Equipment for Earthmoving Operations Using Queuing Theory*. CIB REPORT, vol. 284, pp. 1-7.
- Bargstädt, H. J.; Blickling, A.** (2005), *Implementation of Logic for Earthmoving Processes with a Game Development Engine*. 22th. International Conference on Information Technology in Construction. Dresden, Germany.
- Berthomieu, B. e Diaz, M.** (1991), *Modeling and Verification of Time Dependent Systems Using Time Petri Nets*. IEEE Transactions on Software Engineering, Vol. 17, No. 3.
- Cardoso, J. e Valette, R.** *Redes de Petri*. Editora UFSC. Florianópolis, 1997.
- Desrochers, A.A. e Al-Jaar, R.Y.** (1995), *Applications of Petri nets in manufacturing systems*. IEEE Press. United States of America.
- Henderson D., Vaughan E. D. Jacobson S. H., Wakefield R. R., e 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., e Price, A. D. F.** (1994), *A New Approach for Optimizing Earth Moving Operations*, Parts I and II, Proc. Instn. Civ. Engrs Transp., 105, pp. 195-207.
- Jensen, K.** *Coloured Petri nets: basic concepts, analysis methods and practical use – Volume 1: basic concepts*. Springer-Verlag, Denmark, 1992.
- 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. e Nobre Junior, E.F.** (2004), *Logística Aplicada à Construção Rodoviária*. V Rencontre Internationale de Recherche em Logistique - RIRL 2004, Fortaleza, Ceará.
- Prata, B.A., Nobre Júnior, E.F. e Barroso, G.C.** (2005) Modelagem de sistemas de terraplenagem: uma aplicação das redes de petri. *CILAMCE 2005, Guarapari, Espírito Santo, Brasil*.
- Ricardo, H.S. e Catalani, G.** *Manual Prático de Escavação – Terraplanagem e Escavação de Rocha*, Editora Pini, São Paulo, 1990.
- Yang, J., Edwardsa, D. J., e Loveb, P. E.D.** (2003), *A computational intelligent fuzzy model approach for excavator cycle time simulation*. Automation in construction, vol. 12, pp. 725-735.