

Um Modelo para planejamento de curto prazo de paradas de manutenção

Sérgio Assunção Monteiro

Convergência Latina

sergio.monteiro@conv.com.br

Alexandre Donato

Convergência Latina

alexandre.donato@conv.com.br

Nelson Maculan

UFRJ/COPPE

maculan@cos.ufrj.br

Keywords: manutenção, programação mista e planejamento.

Resumo

Neste trabalho, é apresentado um modelo para apoiar o planejamento de curto prazo de paradas para manutenção. A escolha das atividades que devem ser aplicadas em cada parada é feita a partir da avaliação da disponibilidade de recursos e do benefício entre executá-las em um determinado período, pois, se houver uma relação de dependência, pode-se aumentar o custo futuro.

Abstract

In this work, it's presented a model to support the short-term planning of downtime. The choice of activities that should be applied at each stopped is done from the assessment of resource availability and the benefit of running them in a certain period, because if there is a relationship of dependency, can increase the future cost.

1 Introdução

O planejamento de paradas é um dos principais processos responsáveis para que sejam alcançadas as metas de qualidade da manutenção e da produção, pois é a partir do mesmo que são feitos os planejamentos de estoques, alocação de pessoas e de oficinas. Uma das técnicas utilizadas é adequar as paradas a um padrão recomendado pelo fabricante, que é conhecido por parada de manutenção para revisão, em que, após um período determinado de tempo, é feita a aplicação de um determinado conjunto de atividades padronizadas nos componentes dos equipamentos. No entanto existem outras atividades que podem ocorrer entre estas paradas, que são determinadas através de rotinas de inspeção ou por mau funcionamento de um componente de forma inesperada que podem afetar a disponibilidade do equipamento, o que pode causar diversos prejuízos.

Neste artigo, o modelo conduz a um planejamento com a priorização das atividades que devem ser executadas em determinados períodos delimitados que, neste trabalho, são

chamados de janelas de tempo, dado que existem relações de dependências entre as mesmas. Desta forma, o objetivo do modelo proposto é o de construir as diretrizes para um planejamento global que potencializará o alcance das metas estabelecidas de manutenção e de produção em um horizonte de curto prazo.

2 Revisão Bibliográfica

O planejamento tanto voltado para a produção, quanto para a manutenção é fundamental para a organização das atividades a serem executadas com o objetivo de se atender as metas pré-estabelecidas. Ambos os problemas têm recebido atenção da indústria e do meio acadêmico. Podemos encontrar alguns exemplos voltados para o problema de planejamento aplicado para a produção em Moraes et al (2006), Santos et al (2000), Nozick et al (1997), Vieira et al (2002), Costa et al (2004), Latre et al (2000) e Sims (1997).

O problema de seleção de intervalos ou periodicidade para manutenção preventiva foi analisado em Santos et al (2007), Almeida (2005), Júnior et al (2006), Cavalcante e Almeida (2005), Sanchezb et al (2009) e Bartholomew-Biggs et al (2009). Em Nakagawaa e Mizutanib (2009), são abordados alguns modelos de manutenção para um intervalo de tempo finito. Em Nicolai e Dekker (2006), é feita uma revisão na literatura de diversos modelos para a manutenção de sistemas multi-componentes com dependência econômica, estocástica e estrutural. Em Dekker (1996), é feita uma revisão na literatura de diversas aplicações de modelos de manutenção. Em Scarf (2007), são apresentadas um conjunto de técnicas que auxiliam na priorização de atividades voltadas para a manutenção.

O presente trabalho contribui no sentido de alinhar o planejamento da execução das atividades de manutenção com as prioridades pré-estabelecidas da produção refletidas através dos custos associados à parada dos equipamentos em cada janela de tempo.

3 Conceitos Básicos

Para facilitar a compreensão deste trabalho, nesta seção, são apresentadas algumas definições.

Definição 3.1 *Manutenção é a combinação de ações técnicas, administrativas e de supervisão, com o objetivo de manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida, ou seja, fazer o que for preciso para assegurar que um equipamento ou máquina opere dentro de condições mínimas de requerimentos e especificações, ver ABNT (2004).*

Algumas atividades de manutenção só podem ser realizadas em sequência devido a dependência dos itens que compõem os sistemas. A seguir, é apresentado o conceito de família de atividades desenvolvido neste trabalho.

Definição 3.2 *Família de atividades é um conjunto de atividades que se relacionam entre si, sob os aspectos físicos ou lógicos, para serem executadas. Isto significa que para atividades que pertençam à mesma família, as mesmas só podem ocorrer em série, enquanto que, para as demais, a execução pode ocorrer em paralelo.*

4 O modelo de Planejamento de Paradas

Nesta seção, é apresentado o modelo de otimização de planejamento de paradas proposto neste trabalho.

4.1 Conjuntos

O modelo proposto considera os seguintes conjuntos:

- E representa o conjunto de equipamentos;
- M representa o conjunto de famílias de equipamentos;
- W representa o conjunto de janelas de tempo;
- T representa o conjunto de tipos de manutenção;
- S representa o conjunto de atividades;
- Q_s representa o conjunto formado por subconjuntos de janelas de tempo em que a atividade s deve ser executada;
- P_s representa o conjunto formado por subconjuntos de janelas de tempo em que a atividade s não pode ser executada;
- C_e representa o conjunto de famílias de atividades relacionadas ao equipamento e ;
- $\Gamma^-(s)$ representa o conjunto das atividades que, se não forem executadas, podem dar origem a atividade s ;
- $I_{s,w}$ representa o conjunto de indivíduos disponíveis na janela de tempo w que possuem habilidade para executar a atividade s .

4.2 Constantes

O modelo proposto considera as seguintes constantes:

- JT_w é o comprimento da janela de tempo w ;
- $HIJT_w$ é a quantidade de horas de mão-de-obra de cada indivíduo para cada janela de tempo w ;
- NHO_w representa a quantidade de horas de oficinas disponíveis na janela de tempo w ;
- NP_s é a quantidade de pessoas que devem trabalhar na atividade s ;
- $NPMax_{s,w}$ é a quantidade máxima de pessoas que podem trabalhar na atividade s na janela de tempo w ;

- $NHMP_s$ é a quantidade de horas de manutenção em que o equipamento fica parado para executar a atividade s ;
- HD é a quantidade de horas disponíveis para a manutenção no período limitado por $|W|$;
- $NHMan_s$ é a quantidade de horas de manutenção. Ela é dada por:

$$NHMan_s = NP_s NHMP_s.$$

4.3 Variáveis de decisão

O modelo proposto considera as seguintes variáveis de decisão:

- $h_{e,w} \in \mathbb{R}^+$ é a variável de decisão que informa a quantidade de horas paradas do equipamento e na janela de tempo w ;
- $\delta_{s,w} \in \{0, 1\}$ é a variável de decisão indicadora que, quando for igual a 1, significa que a atividade s foi executada na janela de tempo w ;

4.4 Função Objetivo

A cada atividade $s \in S$ está associado um custo intrínseco à mesma dado por $c_{s,w}$. Algumas atividades, no entanto, possuem uma relação de dependência. Em outras palavras, o custo da sua execução depende da execução ou não de sua atividade relacionada precedente. As atividades que possuem dependência de outras são caracterizadas no modelo pelo índice s_c . Outro ponto importante do modelo é a função que retorna a janela de tempo em que a atividade s_c pode ocorrer desde que a atividade s não ocorra na janela de tempo w . Esta função é definida por $g : S \times S \times W \rightarrow W$ e, para os testes que foram realizados, é dada por:

$$g(s_c, s, w) := w + 1.$$

O custo associado à dependência entre as atividades é dado por $c_{s_c, s, g(s_c, s, w)}$. Portanto, o objetivo deste modelo é alocar as atividades nas janelas de tempo que reduzam seu custo intrínseco e o de dependência. Portanto a função objetivo é dada por:

$$\min \sum_{\substack{\forall s \in S, \\ \forall w \in W}} c_{s,w} \delta_{s,w} + \sum_{\substack{\forall w \in W - |W|, \\ \forall s_c \in S | \Gamma^-(s_c) > 0, \\ \forall s \in \Gamma^-(s_c)}} c_{s_c, s, g(s_c, s, w)} \delta_{s_c, g(s_c, s, w+1)} (1 - \delta_{s,w}). \quad (1)$$

Na primeira parcela de (1), são contemplados os custos intrínsecos de cada atividade. Na segunda parcela, são tratados os custos de dependência.

4.5 Restrições do Modelo de Otimização de Paradas

As restrições do modelo são referentes à limitação de recursos de mão-de-obra disponíveis, imposição de períodos em que a parada para manutenção é ou não obrigatória, tempo disponível para equipamento fora de operação e lógica de dependência entre as atividades. A seguir, de (2) a (10) são apresentadas as famílias de restrições do modelo proposto.

$$\sum_{\forall w \in W} \delta_{s,w} \leq 1, \forall s \in S, \quad (2)$$

$$\sum_{\forall w \in Q} \delta_{s,w} = 1, \forall s \in S, \forall Q \in Q_s, \quad (3)$$

$$\sum_{\forall w \in P} \delta_{s,w} = 0, \forall s \in S, \forall P \in P_s, \quad (4)$$

$$\text{NHMan}_{s_1} \delta_{s_1,w} + \text{NHMan}_{s_2} \delta_{s_2,w} \leq |I_{s_1,w} \cup I_{s_2,w}| \text{HIJT}_w, \\ \forall s_1, s_2 \in S, s_1 \neq s_2, \forall w \in W, \quad (5)$$

$$\sum_{\forall s \in S} \text{NHMan}_s \delta_{s,w} \leq \text{NHO}_w, \forall w \in W, \quad (6)$$

$$\sum_{\substack{\forall w \in W - |W|, \\ \forall s \in \Gamma^-(s_c)}} \delta_{s_c, g(s_c, s, w)} (1 - \delta_{s,w}) \geq 1, \forall s_c \in S, \text{ tal que } |\Gamma^-(s_c)| > 0, \quad (7)$$

$$h_{e,w} \geq \sum_{\forall s \in C_e} \text{NHMP}_s \delta_{s,w}, \forall e \in E, \forall w \in W, \quad (8)$$

$$\sum_{\substack{\forall e \in E_m, \\ \forall w \in W}} h_{e,w} \leq \text{HD}_m, \forall m \in M, \quad (9)$$

$$h_{e,w} \leq \text{JT}_w, \forall m \in M, \forall e \in E_m, \forall w \in W, \quad (10)$$

$$h_{e,w} \geq 0, \delta_{s,w} \in \{0, 1\}, \forall e \in E, \forall w \in W, \forall s \in S. \quad (11)$$

A família de restrições (2) garante que se a atividade s for executada no período de avaliação, ela ocorrerá apenas uma vez. A família de restrições (3) indica que a atividade s é obrigada a ser executada em determinadas janelas de tempo definidas por Q_s . A família de restrições (4) indica que a atividade s não pode ser executada em determinadas janelas de tempo definidas por P_s . A família de restrições (5) considera a mão-de-obra compartilhada como um limitante de recursos para execução das atividades. A família de restrições (6) indica que o número de horas de trabalho de mão-de-obra alocado é limitado pelo número de horas de oficina disponível na janela w . A família de restrições (7) indica que algumas atividades só podem ocorrer depois que as suas atividades originais ocorram. A família de restrições (8) obtém o maior tempo de equipamento parado a partir da consideração de que as atividades da mesma família de componentes só podem ser executadas em série e as demais podem ser executadas em paralelo. A família de restrições (9) limita a quantidade de horas de equipamentos parados para manutenção segmentada por suas respectivas famílias à quantidade de horas de disponibilidade para manutenção que lhe foi pré-estabelecida. A família de restrições (10) limita a quantidade de horas de equipamentos parados para manutenção na janela de tempo w pelo comprimento de horas da mesma.

5 Linearização do Modelo

O modelo é não-linear devido o termo $\delta_{s_c, g(s_c, s, w)} \delta_{s, w}$. Aplicamos, agora, o processo de linearização proposto em Fortet (1960):

$$y_{s_c, g(s_c, s, w), s, w} = \delta_{s_c, g(s_c, s, w)} \delta_{s, w} \quad (12)$$

Como $\delta_{s_c, g(s_c, s, w)} \in \{0, 1\}$ e $\delta_{s, w} \in \{0, 1\}$, então temos que:

$$y_{s_c, g(s_c, s, w), s, w} \geq \delta_{s_c, g(s_c, s, w)} + \delta_{s, w} - 1, \forall w \in W - |W|, \forall s_c \in S, |\Gamma^-(s_c)| > 0, \quad (13)$$

$$y_{s_c, g(s_c, s, w), s, w} \leq \delta_{s_c, g(s_c, s, w)}, \forall w \in W - |W|, \forall s_c \in S, |\Gamma^-(s_c)| > 0, \quad (14)$$

$$y_{s_c, g(s_c, s, w), s, w} \leq \delta_{s, w}, \forall w \in W - |W|, \forall s_c \in S, |\Gamma^-(s_c)| > 0, \quad (15)$$

$$y_{s_c, g(s_c, s, w), s, w} \geq 0, \forall w \in W - |W|, \forall s_c \in S, |\Gamma^-(s_c)| > 0. \quad (16)$$

Estas restrições são adicionadas no modelo de planejamento de paradas para manutenção. Agora, aplica-se (12) em (1) e (7). Portanto são obtidos, respectivamente:

$$\sum_{\substack{\forall s \in S, \\ \forall w \in W}} c_{s, w} \delta_{s, w} + \sum_{\substack{\forall w \in W - |W|, \\ \forall s_c \in S | \Gamma^-(s_c) > 0, \\ \forall s \in \Gamma^-(s_c)}} c_{s_c, s, g(s_c, s, w)} (\delta_{s_c, g(s_c, s, w+1)} - y_{s_c, g(s_c, s, w), s, w}). \quad (17)$$

$$\sum_{\substack{\forall w \in W - |W|, \\ \forall s \in \Gamma^-(s_c)}} (\delta_{s_c, g(s_c, s, w)} - y_{s_c, g(s_c, s, w), s, w}) \geq 1, \forall s_c \in S, \text{ tal que } |\Gamma^-(s_c)| > 0. \quad (18)$$

É feita a substituição, no modelo de planejamento de paradas, de (1) por (17) e de (7) por (18). Além disso, é acrescentada a variável $y_{s_c, g(s_c, s, w), s, w}$ e as famílias de restrições (13), (14), (15) e (18), completando, assim a linearização do modelo.

6 Aspectos Computacionais

Nesta seção, são apresentados os resultados computacionais alcançados. Foi utilizado o Xpress-Mosel 3.0.3 e um computador com a configuração Intel(R)Core TM 2 CPU 6400@2.13GHz, 2GiB. Os resultados podem ser vistos na tabela 1, onde:

- prob é o nome do problema;
- # os é o número de atividades;
- # eqtos é a quantidade de equipamentos;
- # var é a quantidade total de variáveis;
- # bin é a quantidade apenas das variáveis binárias;
- # restr é a quantidade de restrições do problema;

prob	# os	# eqtos	# var	# bin	# restr	# tempo
p1	747	23	3188	2241	841792	9
p2	959	23	3042	2877	1382194	5
p3	1164	23	3745	3492	2035654	7
p4	720	23	2405	2160	779916	8
p5	1103	23	3494	3309	1827679	10
p6	1027	23	3310	3081	1584895	10
p7	992	23	3181	2976	1478691	10
p8	867	23	2834	2601	1129855	8
p9	787	23	2516	2361	931049	7
p10	1025	24	3369	3075	1578872	9

Tabela 1: Resultados computacionais

- # tempo é o tempo, medido em segundos, para obter a solução ótima do problema;

Os problemas testes são adaptações de aplicações reais na indústria. Cada janela de tempo tem o comprimento de uma semana e o período de avaliação foi de três semanas. Em algumas situações, uma mesma atividade poderia dar origem a várias outras, desde que não fosse executada em determinada janela de tempo. Em outras situações, uma atividade destino poderia ter várias possíveis atividades como origem.

7 Conclusão e Trabalhos Futuros

Neste artigo, foi apresentado um modelo de otimização de programação não-linear inteiro-misto desenvolvido para o planejamento de paradas de manutenção de curto prazo. O problema de planejamento de paradas é estratégico para a cadeia produtiva, pois uma parada não-planejada pode gerar diversos transtornos. Dado que o ambiente de trabalho para o qual o modelo foi desenvolvido é muito dinâmico, foi utilizado de um período de planejamento de três semanas para avaliar o impacto da distribuição das decisões para o futuro, mas apenas o resultado das duas primeiras semanas são utilizados. Um ponto importante destacado neste trabalho foi o uso do mapa de dependência de atividades dentro de determinado período. No futuro, serão adicionados a este trabalho informações relacionadas a fatores externos que podem causar impacto na decisão do melhor momento de parar um equipamento para manutenção. Outro ponto importante é adicionar variáveis que apresentem para o planejador a carência de recursos dele, para que este possa realizar um planejamento mais adequado.

Referências

ABNT. Associação brasileira de normas técnicas. NBR 5462: Confiabilidade e Manutenabilidade, 2004.

- A. Almeida. Modelagem multicritério para seleção de intervalos de manutenção preventiva baseada na teoria da utilidade multiatributo. *Pesquisa Operacional*, 25(1):69–81, Janeiro 2005.
- M. Bartholomew-Biggs, M. Zuo, and X. Li. Modelling and optimizing sequential imperfect preventive maintenance. *Reliability Engineering and System Safety*, (94):53–62, 2009.
- C. Cavalcante and A. Almeida. Modelo multicritério de apoio a decisão para o planejamento de manutenção preventiva utilizando promethee ii em situações de incerteza. *Pesquisa Operacional*, 25(2):279–296, Maio a Agosto 2005.
- F. Costa, M. Souza, and L. Pinto. Um modelo de alocação dinâmica de caminhões visando ao atendimento de metas de produção e qualidade. *Anais do III Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto e III Congresso Brasileiro de Mina Subterrânea*, CD-ROM:8, 2004.
- R. Dekker. Applications of maintenance optimization models: a review and analysis. *Reliability Engineering and System Safety*, (51):229–240, 1996.
- R. Fortet. Application de l'agèbre de Boole en recherche opérationnelle. *Revue Française de Recherche Opérationnelle*, 4:17–25, 1960.
- O. Júnior, P. Júnior, and H. Garcia. Otimização da frequência na manutenção preventiva. *XXVI ENEGEP*, Outubro 2006.
- L. Latre, L. Rodrigues, and M. Rodrigues. Planejamento e programação da produção em plantas multipropósito operando em batelada na indústria química. *Gestão & produção*, 7(3):283–304, Dezembro 2000.
- E. Moraes, J. Alves, M. Souza, I. Cabral, and A. Martins. Um modelo de programação matemática para otimizar a composição de lotes de minério de ferro da mina Cauê da CVRD. *Revista da Escola de Minas*, 59:299–306, 2006.
- T. Nakagawaa and S. Mizutanib. A summary of maintenance policies for a finite interval. *Reliability Engineering and System Safety*, (94):89–96, 2009.
- R. P. Nicolai and R. Dekker. Modelling and optimizing sequential imperfect preventive maintenance. *Optimal Maintenance of multi-component Systems: a Review*, (29), August 2006.
- L. Nozick and E. Morlok. A model for medium-term operations planning in an intermodal rail-truck service, Transportation Research Part A: Policy and Practice. *Gest. Prod.*, 31 (2):91–107, March 1997.
- A. Sanchezb, S. Carlosa, S. Martorella, and J. F. Villanuevaa. Addressing imperfect maintenance modelling uncertainty in unavailability and cost based optimization. *Reliability Engineering and System Safety*, (94):22–32, 2009.
- E. Santos, M. Rodrigues, and L. Latre. Aplicação de interferência lógica em problemas de programação de produção. *Gest. Prod.*, 7(7), Agosto 2000.

- W. Santos, E. Colosimo, and S. Motta. Tempo ótimo entre manutenções preventivas para sistemas sujeitos a mais de um tipo de evento aleatório. *Gest. Prod.*, 14(1):193–202, Janeiro 2007.
- P. Scarf. A framework for condition monitoring and condition based maintenance. *Quality Technology & Quantitative Management*, 4(2):301–312, 2007.
- M. Sims. An Introduction To Planning And Scheduling With Simulation. *Revista da Escola de Minas*, pages 67–69, 1997.
- G. Vieira, M. Soares, and O. Junior. Otimização do planejamento mestre da produção através de algoritmos genéticos. *XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, Outubro 2002.