

Análise da influência da condição de fim de vida no balanceamento da linha de desmontagem usando gráfico de precedência conjunta

Eduardo Barreto¹, Rodrigo Scarpel¹

¹Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos/SP – Brasil

Resumo – A preocupação com o descarte apropriado de produtos vem crescendo continuamente nos últimos anos. Vários países já estabeleceram políticas de coleta e reutilização de determinadas linhas de produtos. Nesse contexto, uma parte crucial desse processo é a desmontagem de produtos para isolar partes e componentes para serem reciclados e reaproveitados. Na desmontagem, o estado de fim de vida é um aspecto importante para o balanceamento da linha. Ele pode alterar as tarefas necessárias para a desmontagem assim como o tempo de execução das tarefas. Este artigo aplica o gráfico de precedência conjunta para estudar a influência dos estados de fim de vida no balanceamento da linha de desmontagem. Para isso, foi utilizado um exemplo de um telefone celular já conhecido da literatura e estimado diferentes condições de fim de vida para alguns componentes.

Palavras-Chave – Gráfico de precedência conjunta, balanceamento de linha, linha de desmontagem.

I. INTRODUÇÃO

O balanceamento de linha é uma ferramenta de ajuda à tomada de decisão. O objetivo deste balanceamento é minimizar o tempo ocioso durante um processo em linha. O balanceamento de linhas de montagem é um tema abordado há muitos anos, pois a eficiência desse tipo de linha é de grande interesse do setor privado. Por outro lado, as linhas de desmontagem ganharam visibilidade recentemente, com a crescente preocupação com o meio ambiente e a pós-venda do produto.

A tecnologia tem avançado cada vez mais rápido no que se trata de equipamentos eletrônicos. A cada ano que passa, diversos modelos novos são lançados com novas funcionalidades, desenho mais moderno e novos materiais. Muitas vezes os consumidores descartam aparelhos que funcionam perfeitamente para adquirir um novo, simplesmente para ter o modelo mais recente.

Nos últimos anos a preocupação com o destino de lixo eletrônico vem crescendo mundialmente. Tanto o setor privado quanto o público estão implementando políticas de reciclagem e reaproveitamento de equipamentos obsoletos. Empresas como a Samsung e a Apple oferecem descontos em aparelhos novos em troca de aparelhos usados de forma a incentivar os clientes a retornarem os produtos obsoletos ao sistema produtivo e evitar que eles sejam descartados de forma inadequada.

Ao realizar a coleta de equipamentos descartados, os fabricantes economizam dinheiro ao reciclar e reaproveitar partes ao invés de adquirir nova matéria prima e fabricar novas peças. A etapa mais trabalhosa e mais demorada desse processo de reciclagem e reaproveitamento é a desmontagem dos produtos, logo o maior interesse está em otimizar a etapa de desmontagem.

O processo de desmontagem pode ser feito em diferentes arranjos, como células ou linha. Apesar de um arranjo celular ser mais flexível, o arranjo em linha é mais rápido e como a flexibilidade não é o fator mais importante nesse contexto, é mais interessante usar um arranjo de linha de desmontagem.

Um sistema de desmontagem ainda apresenta várias restrições como ordem de desmontagem, preocupação com elementos perigosos e um elevado nível de incerteza no estado em que o produto chega à linha de desmontagem. Considera-se que sempre há produtos para desmontar, logo a demanda não é tão importante quanto a condição de fim de vida em que o produto chega para ser desmontado.

Em [1], Gupta et al. Tratam da desmontagem de um modelo específico de telefone celular, desenvolvendo um programa em MATLAB para sequenciamento de tarefas em diferentes estações de trabalho.

Kalayci et al. [2] estudaram o mesmo caso que Gupta et al. [1] e também outro envolvendo a desmontagem de um laptop. O objetivo nesse caso foi analisar diferentes versões do algoritmo de colônia de abelha artificial, introduzindo tempo difuso de realização de tarefas. O tempo difuso é incorporado ao modelo para acrescentar-lhe realismo, uma vez que a incerteza no tempo de realização de tarefas de desmontagem é algo inerente ao processo.

Uma das relações mais relevantes mencionadas na literatura é o estado em que o produto chega para ser desmontado. Riggs et al [3] utilizam a abordagem do gráfico de precedência conjunta para incorporar as diferentes condições de fim de vida em um único modelo e então determinar um sequenciamento de tarefas levando em conta as diversas condições.

Gungor e Gupta [4] investigaram a ocorrência de diferentes condições de fim de vida no problema de balanceamento de linha de desmontagem através da presença de falhas na execução de tarefas. Algumas tarefas podem não ser executadas devido a danos presentes nos componentes.

Altekin et al. [5] e Riggs et al. [6] abordaram o tema de balanceamento de linha de desmontagem parcial, incorporando realismo ao problema. Ilgin e Gupta [7] fizeram uma revisão extensa de condições de fim de vida no que se trata de desmontagem para reciclagem e reaproveitamento.

O restante deste artigo está estruturado da seguinte forma. A seção II apresenta uma explicação sobre gráficos de precedência e como montar um gráfico de precedência conjunta. Em seguida o modelo estudado é apresentado na seção III. Na seção IV, segue a formulação do problema de balanceamento linha de desmontagem. A seção V apresenta os resultados e discussão seguido das conclusões finais na seção VI.

II. GRÁFICO DE PRECEDÊNCIA CONJUNTA

Gráficos de precedência são gráficos onde arcos ligam nós de forma que os nós representam tarefas e os arcos indicam ordens específicas em que as tarefas têm de ser realizadas.

O gráfico de precedência conjunta considera todas as condições de fim de vida possíveis do problema. O estado de fim de vida é então determinado a partir de todas as condições de fim de vida de cada componente. Dessa forma haverá uma probabilidade para que cada estado de fim de vida ocorra.

Essa abordagem parte de um produto padrão que chega para desmontagem em estado de produto novo, sem danos ou defeitos. Logo, ele passará por todas as etapas de desmontagem e todas as etapas levarão em média o tempo padrão para serem executadas.

Através de amostragens, as condições de fim de vida de um produto pode ser levantado e a variação no tempo de desmontagem pode ser determinado. Peças podem não estar presentes devido a diversas razões (perdas durante transporte, remoção por parte dos consumidores) resultando em tempos menores em determinadas etapas. Diversos tipos de danos podem dificultar a execução de alguma etapa, fazendo com que ela demore mais para terminar. Essas variações nos tempos de execução podem levar a variações no layout de estações de trabalho.

Cada condição de fim de vida irá gerar um no gráfico de precedência e a partir desses gráficos, monta-se um gráfico de precedência conjunta para então fazer o balanceamento da linha de desmontagem considerando as condições de fim de vida.

O gráfico de precedência conjunta é construído através de uma abordagem de média ponderada de todos os gráficos de precedência das diversas condições de fim de vida. Equação (1) mostra como é calculado o tempo de realização de cada tarefa no gráfico de precedência conjunta, sendo t_i o tempo da tarefa i no gráfico de precedência conjunta, p_q a probabilidade de ocorrer o estado de fim de vida q e t_{iq} o tempo de realização da tarefa i no estado de fim de vida q .

$$t_i = \sum_{q=1}^Q p_q t_{iq} \quad \forall i \quad (1)$$

III. MODELO

O modelo de telefone celular escolhido para fazer esta análise é o Samsung SCH-3500 de 2001, o mesmo utilizado

por Gupta et al [1] e Kalayci et al [2]. Esse equipamento possui 21 tipos diferentes de partes que resultam em 25 tarefas a serem realizadas para a desmontagem completa. As tabelas I e II detalham as partes com suas quantidades e as tarefas necessárias respectivamente.

TABELA I. LISTA DE PARTES

Identificação da parte	Parte	Número de parte
1	Antena	1
2	Bateria	1
3	Guiã da antena	1
4	Parafuso (Tipo 1)	2
5	Parafuso (Tipo 2)	4
6	Clipe	1
7	Selo de borracha	1
8	Alto falante	1
9	Cabo branco	1
10	Cabo vermelho/azul	1
11	Cabo laranja	1
12	Capa de metal	1
13	Cobertura frontal	1
14	Cobertura traseira	1
15	Placa de circuito	1
16	Tela de plástico	1
17	Teclado	1
18	LCD	1
19	Sub-teclado	1
20	Placa de circuito interno	1
21	Microfone	1

Através dos dados das tabelas anteriores é possível montar o gráfico de precedência da desmontagem do equipamento em seu estado padrão, exposto na Fig. 1. Os números próximos aos nós representam o tempo de execução daquela tarefa.

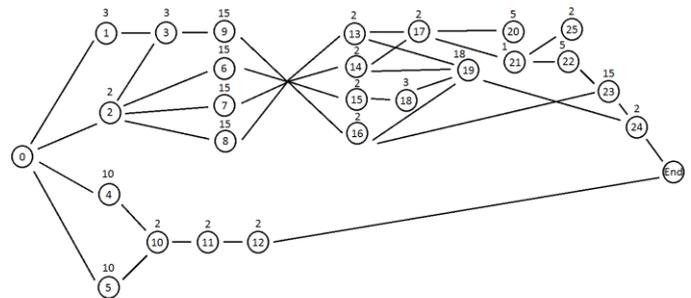


Fig. 1. Gráfico de precedência do equipamento padrão.

Para determinar o efeito do estado de fim de vida na desmontagem, são consideradas algumas condições diferentes de fim de vida de alguns componentes. Os elementos mais suscetíveis a danos geralmente são baterias e parafusos, pelo fato das pessoas reutilizarem baterias em outros aparelhos e desmontarem por conta própria para realizarem consertos ou por simples curiosidade.

Logo, foi estimada a probabilidade de que a bateria do telefone esteja faltando e os parafusos espanados. Assim, o tempo de remoção da bateria passa a ser nulo caso ela esteja faltando e o tempo de remoção dos parafusos aumenta por causa do dano causado a eles. A tabela III indica as probabilidades de ocorrer as diferentes condições de fim de vida de cada componente, assim como quais tarefas serão afetadas e como.

TABELA II. LISTA DE TAREFAS

Identificação da tarefa	Tarefa	Tempo de execução	Precedência
1	Remover antena	3	0
2	Remover bateria	2	0
3	Descartar guia da antena	3	1, 2
4	Remover parafuso A (Tipo 1)	10	0
5	Remover parafuso B (Tipo 1)	10	0
6	Remover parafuso 1 (Tipo 2)	15	2
7	Remover parafuso 2 (Tipo 2)	15	2
8	Remover parafuso 3 (Tipo 2)	15	2
9	Remover parafuso 4 (Tipo 2)	15	2
10	Remover clipe	2	4, 5
11	Remover selo de borracha	2	10
12	Remover alto falante	2	11
13	Desconectar cabo branco	2	6, 7, 8, 9
14	Desconectar cabo vermelho/azul	2	6, 7, 8, 9
15	Desconectar cabo laranja	2	6, 7, 8, 9
16	Remover capa de metal	2	6, 7, 8, 9
17	Remover cobertura frontal	2	13, 14
18	Remover cobertura traseira	3	15
19	Remover placa de circuito	18	13, 14, 16, 18
20	Remover tela de plástico	5	17
21	Remover teclado	1	17
22	Descartar LCD	5	21
23	Remover sub-teclado	15	16, 22
24	Remover placa de circuito interno	2	19, 23
25	Remover microfone	2	21

TABELA III. PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE FIM DE VIDA

Probabilidade	Descrição	Tarefas afetadas	Tempo novo [s]
35%	Bateria faltando	2	0
25%	Parafuso Tipo 1 espanado	4, 5	15
20%	Parafuso tipo 2 espanado	6, 7, 8, 9	20

O tempo de ciclo em uma linha de desmontagem é dado por:

$$c = \frac{\text{período de planejamento}}{\text{número de itens a desmontar}} \quad (2)$$

E é restringido por

$$c \geq t_i, i = 1 \dots N \quad (3)$$

Dessa forma, o tempo de ciclo é dado por:

$$c = t_{\max} \quad (4)$$

onde $t_{\max} = \max(t_1, t_2, \dots, t_N)$.

O balanceamento de linha tem como objetivo minimizar a quantidade de estações de trabalho, portanto é preciso conhecer os limites máximo e mínimo da quantidade de estações. O limite máximo é dado pela quantidade de tarefas a serem realizadas, uma vez que cada tarefa pode ser realizada em uma única estação, logo:

$$M_{\max} = N \quad (5)$$

O limite mínimo é dado pelo tempo total para realizar a desmontagem dividido pelo tempo de ciclo,

$$M_{\min} = \frac{T}{c} \quad (6)$$

IV. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE BALANCEAMENTO DE LINHA DE DESMONTAGEM

A função objetivo almeja minimizar a quantidade de estações de trabalho e é dada por:

$$\min \sum_{j=1}^? S_j \quad S_j = 0,1 \quad j = 1, \dots, ? \quad (7)$$

Sujeito a

$$\sum_{j=1}^? x_{i,j} = 1 \quad i = 1, \dots, N \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^N t_i x_{i,j} \leq c S_j \quad j = 1, \dots, ? \quad (9)$$

$$x_{i,j} \leq \sum_{h=1}^j x_{i',h} \quad \forall i, i \neq i', j = 1, \dots, ?, i' \in P(i) \quad (10)$$

$$x_{i,j} = 0,1 \quad \forall i, \forall j \quad (11)$$

A restrição (8) atribui cada tarefa a uma estação e evita que a mesma tarefa seja realizada em mais de uma estação. A restrição (9) é uma restrição de tempo, onde não se permite que o tempo de execução das tarefas em uma dada estação ultrapasse o tempo de ciclo. A restrição (10) é uma restrição de precedência, onde a tarefa i' será designada à mesma estação ou a uma estação precedente da tarefa i , dado o

conjunto de tarefas precedentes $P(i)$. A restrição (11) é uma restrição de não-divisibilidade que não permite que uma tarefa seja dividida entre mais de uma estação

V. RESULTADOS

As seguintes considerações foram feitas para introduzir condições diferentes de fim de vida para alguns componentes:

- 35% de chance da bateria estar faltando, resultando em tempo de execução nulo para a tarefa 2;
- 25% de chance que os parafusos do tipo 1 estejam danificados, dificultando a sua remoção e aumentando o tempo de execução das tarefas 4 e 5 para 15s;
- 20% de chance que os parafusos do tipo 2 estejam danificados, dificultando a sua remoção e aumentando o tempo de realização das tarefas 6, 7, 8 e 9 para 20s.

Esse cenário não é baseado em dados reais, é uma estimativa de possíveis situações que podem ocorrer no mundo real. Algumas pessoas podem guardar baterias para utilizar em outros aparelhos e parafusos podem ser danificados durante consertos do aparelho.

As três condições de fim de vida citadas anteriormente resultam em 8 combinações diferentes de estados de fim de vida, logo, tem-se 8 gráficos de precedência diferentes que podem ocorrer. A tabela IV detalha a probabilidade de ocorrência de cada estado de fim de vida e o tempo de execução de cada tarefa afetada pelas condições de fim de vida.

TABELA IV. ESTADOS DE FIM DE VIDA

Probabilidade	Tempo para tarefa 2 [s]	Tempo para tarefas 4, 5 [s]	Tempo para tarefas 6, 7, 8, 9 [s]
39,00% (padrão)	2	10	15
9,75%	2	10	20
13,00%	2	15	15
3,25%	2	15	20
21,00%	0	10	15
5,25%	0	10	20
7,00%	0	15	15
1,75%	0	15	20

A partir da tabela IV, é possível montar o gráfico de precedência conjunta para este cenário, mostrado na Fig. 2.

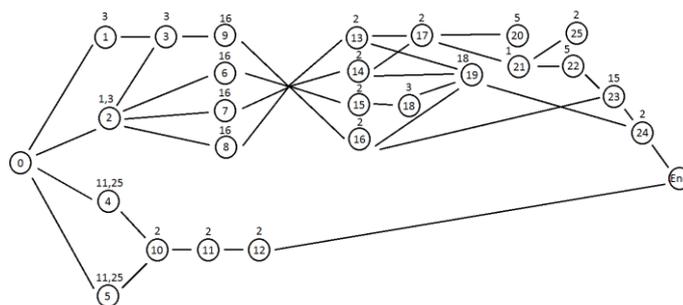


Fig. 2. Gráfico de precedência conjunta.

Mesmo com alteração no tempo de execução de algumas tarefas, o tempo de ciclo e os limites de quantidade de estações permanecem os mesmos.

$$c = 18s$$

$$9 \leq M \leq 25$$

O resultado ótimo para o caso padrão é conhecido dos trabalhos [1] e [2], resultando em 9 estações de trabalho e tempo ocioso de 7s ao longo de todo o processo. A distribuição das tarefas está detalhada na tabela V.

TABELA V. SEQUÊNCIA DE DESMONTAGEM PARA O CASO PADRÃO

Estação	Tarefas	Tempo da estação [s]	Tempo ocioso [s]
1	2, 6	17	1
2	7, 1	18	0
3	8, 3	18	0
4	9, 13	17	1
5	4, 14, 17, 21, 25	17	1
6	5, 22, 10	17	1
7	20, 15, 18, 16, 11, 12	18	0
8	19	17	1
9	23, 24	16	2

Quando analisado o gráfico de precedência conjunta, é notável que apesar de o número mínimo de estações ser 9, por causa das relações de precedência, o melhor resultado obtido foi de 10 estações de trabalho com um tempo ocioso de 19,2s. Isso se deve ao fato de que as tarefas mais impactadas pelo aumento no tempo de execução se encontravam em estações que já operavam na sua capacidade máxima. A tabela VI mostra a nova distribuição de tarefas para o caso do gráfico de precedência conjunta.

TABELA VI. SEQUÊNCIA DE DESMONTAGEM PARA O CASO DO GRÁFICO DE PRECEDÊNCIA CONJUNTA

Estação	Tarefas	Tempo da estação [s]	Tempo ocioso [s]
1	1, 2, 4	15,55	2,45
2	3, 5, 10	16,25	1,75
3	6, 11	18	0
4	7	16	2
5	8	16	2
6	9	16	2
7	12, 13, 14, 15, 16, 17, 18	15	3
8	19	18	0
9	20, 21, 22, 25	13	5
10	23, 24	17	1

Apesar do elevado tempo ocioso total, a estação com o maior tempo ocioso é de 5s, mostrando uma boa utilização dos recursos disponíveis.

Em um segundo cenário, foi desconsiderado a condição dos parafusos tipo 2 estarem danificados e então analisado o efeito desse cenário no sequenciamento das tarefas. Nesse caso, a melhor configuração foi de 9 estações de trabalho com tempo ocioso de 5,2s.

TABELA VII. SEQUÊNCIA DE DESMONTAGEM PARA O CASO DO GRÁFICO DE PRECEDÊNCIA CONJUNTA (PARAFUSO TIPO 2 SEM DANOS)

Estação	Tarefas	Tempo da estação [s]	Tempo ocioso [s]
1	2, 6	16,3	1,7
2	7, 1	18	0
3	8, 3	18	0
4	9, 13	17	1
5	4, 14, 15, 16	17,25	0,75
6	5, 17, 18, 21	17,25	0,75
7	19	18	0
8	10, 11, 12, 20, 22, 25	18	0
9	23, 24	17	1

Como se pode notar, a sequência final muda significativamente com relação ao caso padrão e ao caso com as três condições de fim de vida.

Por fim foi testado o caso de apenas os parafusos do tipo 2 apresentarem danos. Como as tarefas relacionadas aos parafusos do tipo 2 possuem um tempo de execução mais elevado, elas se tornam mais restritivas para o problema. Nesse caso, o melhor resultado obtido foi de 10 estações de trabalho com tempo ocioso de 21.7s. Por ser a condição mais restritiva, o sequenciamento das tarefas ficou igual ao caso de ambos os tipos de parafuso apresentarem dano.

TABELA VIII. SEQUÊNCIA DE DESMONTAGEM PARA O CASO DO GRÁFICO DE PRECEDÊNCIA CONJUNTA (PARAFUSO TIPO 1 SEM DANOS)

Estação	Tarefas	Tempo da estação [s]	Tempo ocioso [s]
1	1, 2, 4	14,3	3,7
2	3, 5, 10	15	3
3	6, 11	18	0
4	7	16	2
5	8	16	2
6	9	16	2
7	12, 13, 14, 15, 16, 17, 18	15	3
8	19	18	0
9	20, 21, 22, 25	13	5
10	23, 24	17	1

VI. OBSERVAÇÕES FINAIS

Ao final deste estudo, os resultados mostraram que ao considerar diferentes estados de fim de vida, a divisão de tarefas nas estações de trabalho pode mudar, assim como a quantidade de estações necessárias também pode ser alterada.

As mudanças decorrentes de cada estado de fim de vida é altamente dependente da probabilidade de ocorrência de cada estado e também do efeito gerado por ele (variação no tempo de execução de uma tarefa). Portanto é preciso analisar cada problema individualmente, considerando todos as condições de fim de vida presentes para obter um sequenciamento eficiente para cada caso.

REFERÊNCIAS

- [1] Gupta, S. M., Erbis, E., McGovern, S. M. Disassembly Sequencing Problem: A Case Study of a Cell Phone. Proceedings of the SPIE International Conference on Environmentally Conscious Manufacturing IV, Philadelphia, Pennsylvania, pp. 43- 52, October 26-27, 2004.
- [2] Kalayci, C. B., Hancilar, A., Gungor, A., Gupta S. M. Multi-objective fuzzy disassembly line balancing using a hybrid discrete artificial bee colony algorithm. Journal of Manufacturing Systems 37 (2015) 672–682
- [3] Riggs, R. J., Battaia, O., Hu, S. J. Disassembly line balancing under high variety of end of life states using a joint precedence graph approach. Journal of Manufacturing Systems 37 (2015) 638–648.
- [4] Gungor A, Gupta SM. A solution approach to the disassembly line balancing problem in the presence of task failures. Int J Prod Res 2001;39:1427–67.
- [5] Altekin FT, Kandiller L, Ozdemirel NE. Profit-oriented disassembly line balancing. Int J Prod Res 2008;46(10):2675–93.
- [6] Riggs RJ, Jin X, Hu SJ. Two-stage sequence generation for partial disassembly of products with sequence dependent task times. Procedia CIRP2015;29:698–703.
- [7] Ilgin MA, Gupta SM. Environmentally conscious manufacturing and product recovery (ECMPRO): a review of the state of the art. J Environ Manage2010;91(3):563–91.