

O PROBLEMA DINÂMICO DE RE-CONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE MONTAGEM

Ormeu Coelho da Silva Júnior

Universidade Federal de Minas Gerais

ormeucoelho@yahoo.com.br

Gilberto de Miranda Júnior

Universidade Federal de Minas Gerais

miranda@dep.ufmg.br

Samuel Vieira Conceição

Universidade Federal de Minas Gerais

svieira@dep.ufmg.br

Resumo

Neste trabalho é apresentada uma nova classe de problemas envolvendo as linhas de montagem, na qual se considera a necessidade de re-configuração devido à mudança no tempo de ciclo requerido. São propostos quatro modelos de programação inteira mista para o caso, sendo três deles baseados em um horizonte de planejamento discretizado em períodos, dando ao problema um caráter dinâmico. Simultaneamente, força-se uma suavização a carga de trabalho entre as estações, limitando-a com valores mínimos e máximos. Os modelos foram implementados em um pacote comercial de programação matemática e os resultados de alguns testes preliminares também são apresentados. Comparações entre o uso sucessivo de abordagens clássicas (tipo SALBP) e a modelagem dinâmica demonstram a superioridade da abordagem proposta.

Palavras-chave: re-projeto de sistemas de montagem, balanceamento de linhas de montagem, programação inteira mista.

Abstract

In this paper we present a new version for the problems involving assembly lines where the necessity of successive re-configuration is caused by variations in the cycle time. We propose four mixed integer programming formulations for the problem, three of them using a time horizon divided in periods. Such assumption gives the problem a dynamic character. The proposed models also prescribe the station workload fall into a given interval. It was implemented in a commercial package for mathematical programming and some results are reported. Comparisons are made with the repetitive use of classical models (SALBP like) to demonstrate the superiority of this new approach.

Keywords: assembly systems re-design, assembly line balancing, mixed integer programming.

1. Introdução

Linhas de montagem são sistemas de produção orientados por fluxo presentes especialmente em indústrias de alto volume de bens padronizados. Em geral, são constituídas por uma série de estações de trabalho, manuais ou automatizadas, ligadas por uma correia transportadora – ou mecanismo similar –, através das quais um ou vários produtos são montados. Em cada uma destas estações, uma ou mais tarefas são executadas. É destacável a importância do tema para indústria, pelo seu papel como principal sistema produtivo na produção em massa. Tecnicamente, o balanceamento de linhas de montagem consiste em alocar as tarefas de montagem de um ou mais produtos a estações de trabalho, atendendo algumas restrições tecnológicas. Em grande parte das abordagens disponíveis se considera uma demanda estática a partir da qual o tempo de ciclo da linha (intervalo entre a conclusão de dois produtos consecutivos) é calculado. Em função deste parâmetro a linha é então re-balanceada e até mesmo re-projetada, o que implica em maiores investimentos em capital. Por outro lado, sabe-se que uma boa parte das empresas modernas opera sob incerteza quanto às demandas que enfrentarão ao longo do tempo. Logo, se a linha for projetada para um dado padrão de demanda pode facilmente se tornar ociosa ou sobrecarrega no futuro. Por isso, pode ser preciso re-configurar a linha mais de uma vez ao longo do seu ciclo de vida. Nestes casos, a ampliação da linha só deve ser feita se for estritamente necessária para o atendimento da demanda. A retração, entretanto, possui dois aspectos: a redução dos custos com infra-estrutura (estações); e a incidência de custos de adaptação à nova estrutura. Sendo assim, ela só será vantajosa se as economias obtidas por um ou mais períodos operando de forma reduzida compensarem os custos de adaptação. Além disso, devem-se levar em conta elevações futuras na demanda que possam forçar novos aumentos do número de estações, que implicariam em custos de adaptação. Outro inibidor da contração é a ocorrência de efeitos de depreciação sobre as estações que fazem com que o retorno financeiro com a liberação de uma estação seja inferior ao custo de sua aquisição. Sob ação de todos estes custos, torna-se óbvio que a melhor solução para todo horizonte de planejamento da empresa não será necessariamente composta pela melhor solução em cada período.

Pela complexidade deste cenário, propõe-se um conjunto de formulações de programação inteira mista para minimizar os custos totais de re-configuração de linhas de montagem mono-produto e seriais. A vantagem desta abordagem se deve à visibilidade que ela tem das variações do tempo de ciclo, o que impede movimentos desnecessários como, por exemplo, contrair e expandir a estrutura em um intervalo de tempo tão curto que seria mais barato pagar pela manutenção da capacidade ociosa. Em todos estes modelos, há um *trade-off* entre a possibilidade de retrair a estrutura para economizar recursos e a os custos incorridos com sua re-alocação. Incluem-se ainda restrições que limitam o carregamento das estações, pois esta questão não poderia ser resolvida hierarquicamente devido aos custos de deslocamento de tarefas entre estações. Ou seja, depois de construir as soluções para cada período do horizonte, não se pode aplicar um modelo para suavizar a carga de trabalho, pois a otimalidade não poderia mais ser garantida. Para avaliar as formulações propostas, testes computacionais foram feitos com o pacote computacional XPRESS-MP em três grupos de instâncias: um obtido da literatura, outro de exemplos gerados aleatoriamente e em um terceiro formado por problemas reais obtidos de nossas experiências com uma empresa de manufatura contratada do setor eletroeletrônico. Nestes testes, analisou-se o impacto que as variações dos diferentes parâmetros de custo e das restrições de ocupação provocam sobre a qualidade das soluções obtidas. Foram testados também dois formatos para o custo e o lucro unitários com a variação do número de estações (custo e lucro simétricos e assimétricos) e um formato para os custos de deslocamento que depende apenas das tarefas. Analisou-se, também, o desempenho do modelo em um horizonte rolante de planejamento, pois este pressuposto reflete bem a realidade daqueles sistemas sujeitos à alteração das previsões de demanda ao longo tempo. Por fim, é possível mostrar que esta formulação otimiza o

controle de capacidade da linha, oferecendo soluções de menor custo total que a re-configuração período a período da linha.

O trabalho está organizado da seguinte maneira: na seção 2, traça-se uma breve revisão sobre os problemas de balanceamento e projeto de sistemas de montagem; na seção 3, define-se o problema de re-configuração de uma linha de montagem em uma única ocasião; a seção 4 aborda as formulações para o problema de re-configuração dinâmica; na seção 5, são apresentados limites e inferiores e regras de redução para os problemas definidos; já na seção 6, são apresentados os resultados para os experimentos de computação. A última seção traz as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

2. O Problema de Balanceamento de Linhas de Montagem

O balanceamento de linhas de montagem é um dos problemas de engenharia industrial mais abordados pela pesquisa operacional, com trabalhos registrados há quase cinquenta anos. Dois parâmetros são particulares à grande maioria das variantes do problema de balanceamento. Uma delas é a existência de relações de precedência entre as tarefas de montagem. Ou seja, a execução de certas tarefas está condicionada ao término de outras antes que ela inicie. Por isso, estas tarefas deverão ser alocadas nas mesmas estações de trabalho que suas precedentes, ou em estações posteriores àquelas em que estações elas foram alocadas, dado o sentido do fluxo de produção. O outro parâmetro é o tempo ciclo de operação da linha que representa o intervalo de tempo entra a saída de dois produtos consecutivos em uma linha cadenciada. Becker & Scholl (2006) apresentam a revisão mais extensa encontrada na literatura sobre o tema. Eles caracterizam o problema generalizado de balanceamento de linhas de montagem (GALBP) em contraposição ao que chamam de problema de balanceamento de linha simples (SALBP). Este último é a versão mais simples do problema, que trata o balanceamento de uma linha mono-produto. Existem duas variantes deste problema: o SALBP-1, cujo objetivo é minimizar o número de estações de trabalho necessárias para alocação de todas as tarefas, respeitando as relações de precedência entre elas e o tempo de ciclo de operação da linha; e o SALBP-2, que tenta minimizar o tempo de ciclo, também sujeito a restrições de precedência (Bayards, 1986). Scholl & Becker (2006) fazem uma revisão das principais abordagens exatas e heurísticas aplicadas ao SALBP. Formulações de programação inteira para os dois tipos de problema simples de balanceamento estão disponíveis em Askin & Standridge (1993), Pinnoi & Wilhelm (1998) e Uğurdağ et al (1997). Outra revisão que cataloga métodos de otimização para vários problemas de balanceamento está em Rekiek et al (2002).

Becker & Scholl (2006) definem as diferenças entre as versões simples e generalizada, além de revisar os principais problemas generalizados. Considera-se, por exemplo, os problemas de balanceamento envolvendo linhas produtoras de múltiplos modelos e linhas de modelos mistos. As primeiras fabricam vários produtos em lotes separados por operações intermediárias de *setup* enquanto as demais produzem ao mesmo tempo mais de um modelo (Bukchin & Rabinowitch, 2005; Simaria & Vilarinho, 2004; MacMullen & Frazier, 1997; Van Hope, 2006; Gökçen & Erel, 1998). Outro problema de bastante interesse é o balanceamento de linhas em forma de “U”, como se vê nos trabalhos de Gökçen & Ağpak (2006), Nakade & Ohno (1999), Aase et al (2004) e Urban (1998). Outras questões como a suavização da carga de trabalho e a possibilidade de paralelismo (duplicação da capacidade) em algumas estações estão listadas nos trabalhos de Becker & Scholl (2006) e Pinnoi & Wilhelm (1995).

O projeto de sistemas de montagem aparece em algumas publicações como Gadidov & Wilhelm (1999), Pinnoi & Wilhelm (2000) e Bukchin & Tzur (2000), que tratam o projeto de uma linha mono-produto e serial. A principal diferença deste problema em relação ao SALBP se refere ao objetivo que tem um caráter de custo real, refletindo as decisões de abertura de estações e atribuição de facilidades (como máquinas e ferramentas) a elas.

Sawik (1995) apresenta modelos de programação inteira para um problema que ele define como projeto de sistemas de montagem flexíveis. As formulações consideram a produção simultânea de mais de um produto e tem como objetivo a atribuição de tarefas às estações, minimizando a carga de trabalho e as movimentações de material entre as estações. Também se explora a decisão integrada de seleção de equipamentos e definição do número de equipamentos “paralelos” em cada estação. Aase et al (2004) discutem as condições sob as quais valeria a pena migrar uma linha serial para o formato em “U” e apresentam uma formulação de programação inteira apropriada que é similar às utilizadas no SALBP. Recentemente, algumas publicações atentaram para o re-balanceamento, mas sem explorar o aspecto dinâmico do problema e sua dependência em relação aos custos e receitas inerentes à variação da estrutura (Fernandes & Delaio, 2000).

Há um bom número de técnicas de solução para aos problemas de balanceamento e projeto. Muitos métodos exatos foram analisados com grande destaque para o uso de programação dinâmica e métodos baseados em *branch-and-bound* (Scholl & Becker, 2006). Em função disso, desenvolveram-se procedimentos especializados, limites inferiores, regra de redução e de dominância que permitem melhorar a performance computacional. O mais simples dos limites inferiores é obtido com a relaxação das restrições de integralidade das tarefas. Pelo menos três tipos de limites inferiores podem ser gerados se o SALBP for relaxado como problema de empacotamento (*Bin Packing Problem*). Há ainda os limites de sequenciamento estabelecidos por Jonhson (1988), que representam o SALB-1 através de um problema de sequenciamento em máquina única com objetivo de minimização do *makespan*. Uma classe de limites que muito empregada compreende a idéia de melhorias destrutivas, que consiste em aumentar um dado limite inicial sempre que for possível contradizer seu valor (Klein & Scholl, 1999; Fleszar & Hindi, 2003; Scholl & Becker, 2006). Outra alternativa para reduzir o esforço computacional dos métodos de solução são as regras de dominância. Elas analisam soluções parciais e seus respectivos problemas residuais para eliminar conjuntos de soluções comprovadamente piores. Já as regras de redução atuam através de alterações dos tempos de processamento das tarefas e das relações de precedência (Bayards, 1986; Hackmann et al 1989; Klein & Scholl, 1996; Scholl & Klein, 1999; Peeters & Degraeve, 2006; Fleszar & Hindi, 2003; Miltenburg, 2006). Desigualdades válidas para alguns problemas de balanceamento e projeto são apresentadas por Pinnoi & Wilhelm (2000).

Muitos outros trabalhos que envolveram heurísticas especializadas ou meta-heurísticas também foram feitos. Particularmente, para o SALBP foram desenvolvidas muitas heurísticas construtivas baseadas em regras de prioridade entre as tarefas. Estas regras são aplicadas a uma lista não-crescente de índices, calculados a partir dos tempos das tarefas e das relações de precedência. Há duas formas de orientar a construção destas soluções. Os procedimentos orientados por tarefa alocam a tarefa selecionada por prioridade a uma das estações às quais ela pode ser atribuída, enquanto os procedimentos orientados por estação abrem as estações uma a uma, sucessivamente, atribuindo as tarefas disponíveis de maior prioridade e que sejam condizentes com a capacidade da estação aberta. Alguns procedimentos de melhora estudados utilizam uma busca bidirecional, na qual a tarefa é atribuída à estação mais cedo ou mais tarde na qual pode ser alocada, dependendo de onde o valor do índice de prioridade for maior (Talbot et al, 1986; Hackman, 1989). Recentemente, muita atenção têm sido dedicada a procedimentos de melhora, com especial destaque para o uso de meta-heurísticas como busca tabu, recozimento simulado, colônia de formigas e, principalmente, algoritmos genéticos. Nestes procedimentos é usual gerar soluções iniciais através de uma heurística construtiva como as referidas acima (Rubinovitz & Levitin, 1995; Kim et al, 1996; Gonçalves & Almeida, 2002; Lapierre et al, 2006; Levitin et al, 2006; Bautista & Pereira, 2006). Revisões que se completam e cobrem apropriadamente as variações do problema de balanceamento e os métodos de solução aqui referidos podem ser encontrados em Talbot et al (1986), Bayards (1986), Rekiek et al (2002), Scholl & Becker (2006) e Becker & Scholl (2006).

3. Re-configuração de Sistemas de Montagem

A re-configuração de uma linha de montagem traz consigo os custos e receitas incorridas na variação da estrutura atual, assim como os custos de adaptação aos novos padrões operacionais. No primeiro caso, procura-se representar, por exemplo, o custo ou lucro com a abertura e o fechamento de estações de trabalho – compreende-se que o fechamento de uma estação poderá representar lucro sempre que o ativo desmobilizado tiver algum valor residual, podendo ser vendido ou utilizado para outra finalidade. Já a parcela de custos operacionais diz respeito à mudança na alocação de tarefas, que poderá acarretar a necessidade de treinamento de outro operador ou mesmo adaptações para que a nova estação seja capaz de realizar as novas operações alocadas.

Em alguns sistemas mais intensivos em capital é possível que os custos de mão-de-obra possam ser desconsiderados quando comparados aos custos acima citados. Sendo assim, o rearranjo do sistema será limitado a minimizar a soma das parcelas de custos referentes à variação e à adaptação da estrutura. Uma formulação simples é capaz de representar estes dois aspectos. Ela considera a existência de uma solução inicial para uma linha mono-produto serial e um novo valor para o tempo que ciclo que será considerado na re-configuração. Não há alterações na sequência tecnológica, logo, consideram-se as mesmas sequências tecnológicas. A tabela 3.1 traz as notações para leitura do modelo proposto na sequência.

Conjuntos de Índices	Parâmetros
J – Conjunto das tarefas a serem alocadas. K – Conjunto de estações disponíveis para alocação.	t_j – Tempo de processamento da tarefa j . tc – Tempo de ciclo. IP – Conjunto de pares de tarefas, i e j , tal que i precede j . $y_{ok} - 1$, se a estação k está aberta na solução inicial e 0 , caso contrário. $xo_{kj} - 1$, se a tarefa j estava alocada à estação k na solução inicial.
Variáveis	
y_k – se a estação k , está aberta na nova solução. x_{kj} – se a tarefa j foi atribuída a estação k na nova solução.	ca_k – Custo (ou lucro) com a abertura ou o fechamento da estação k , respectivamente. c_{kj} – Custo de re-alocar a tarefa j à estação k , tal que $c_{kj} > 0$, se $xo_{kj} = 0$ e $c_{kj} = 0$, se $xo_{kj} = 1$.

3.1 – Conjuntos, parâmetros e variáveis para o problema de re-balanceamento de linha. Fonte: autor.

A primeira formulação para o problema de re-configuração de sistemas de montagem (ASRP) é apresentada nas expressões (1.1) a (1.9).

$$\min f = \sum_{k \in K} ca.(y_k - y_{o_k}) + \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} c_{kj} \cdot (1 - x_{o_{kj}}) \cdot x_{kj} \quad (1.1)$$

sujeito a :

$$\sum_{k \in K} x_{kj} = 1 \quad \forall j \in J \quad (1.2)$$

$$\sum_{j \in J} t_j \cdot x_{kj} = c \cdot y_{kt} + e_k - f_k \quad \forall k \in K, \forall t \in T \quad (1.3)$$

$$x_{kj} \leq \sum_{h \in K / h \leq k} x_{hi} \quad \forall (i, j) \in IP, \forall h \in K \quad (1.4)$$

$$y_{k-1} \geq y_k \quad \forall k \in K \setminus \{k=1\} \quad (1.5)$$

$$e_k \leq E_{MAX} \cdot y_k \quad \forall k \in K, \forall t \in T \quad (1.6)$$

$$f_k \leq F_{MAX} \cdot y_k \quad \forall k \in K, \forall t \in T \quad (1.7)$$

$$x_{kj}, y_k \in \{0,1\} \quad \forall k \in K, \forall j \in J \quad (1.8)$$

$$e_k, f_k \geq 0 \quad \forall k \in K, \forall t \in T \quad (1.9)$$

A função objetivo (1.1) representa o custo total com a alteração do sistema de montagem atual. Observe que este custo pode assumir valores negativos representando, neste caso, que o lucro obtido com a retração do número de postos supera os custos de re-alocação das tarefas. Em (1.2), (1.3) e (1.4) são escritas, respectivamente, as restrições de obrigatoriedade de atribuição de cada tarefa a exatamente uma estação, respeito ao tempo de ciclo e respeito às relações de precedência. Diferente das formulações utilizadas por Askin e Standridge (1993) e Pinnoi e Wilhelm (1999) para resolver o SALBP, preferiu-se empregar uma variável de abertura estações, y_k , para ligar a atribuição de tarefas à abertura das estações, conforme o trabalho de Bayards (1986) e algumas variações que incluem o projeto do sistema de montagem como em Gadidov e Wilhelm (1999) e Pinnoi e Wilhelm (1995;1998;1999). Mesmo aumentando o número de variáveis do modelo, este artifício melhora o limite de programação linear, reduzindo significativamente o tempo de solução dos problemas de maior porte. Outra diferença em relação aos modelos anteriores aparece na restrição (1.3) de respeito ao tempo de ciclo que foi escrita como uma igualdade para incorporar o cálculo das folgas e excessos de carregamento em cada estação. Observe que há também uma meta de capacidade, M , que representa uma referência em relação a qual a folga e o excesso máximos serão definidos através das restrições (1.6) e (1.7). A restrição (1.5) tem por objetivo melhorar limites, forçando a abertura sequencial das estações, o que limita o número de soluções possíveis. Em (1.8) e (1.9) declara-se os domínios das variáveis do modelo.

Todavia esta formulação tem como limitação a simetria entre os valores do custo e do lucro com a expansão e a contração da estrutura, respectivamente. Se, em uma aplicação específica, existir forte depreciação da infra-estrutura, este pressuposto pode não ser verdadeiro. Pode-se fazer uma pequena alteração na formulação anterior para que ela possa contabilizar e aplicar custos separadamente a cada estação aberta ou fechada. Isto pode ser obtido com a substituição do primeiro termo da função objetivo (1.1) pela expressão (1.10) e pela inserção do conjunto adicional de restrições em (1.11)-(1.14) para contabilizar a quantidade de estações fechadas ou abertas.

$$f = ca \cdot \sum_{k \in K} A_k + cf \cdot \sum_{k \in K} A_k + \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} c_{kj} \cdot (1 - xo_{kj}) \cdot x_{kj} \quad (1.10)$$

$$\sum_k (y_k - yo_k) - \sum_{k \in K} A_k + \sum_{k \in K} F_k = 0 \quad (1.11)$$

$$A_{kt} \leq A_{k-1t} \quad \forall k \in K \setminus \{k=1\}, \forall t \in T \quad (1.12)$$

$$F_{kt} \leq F_{k-1t} \quad \forall k \in K \setminus \{k=1\}, \forall t \in T \quad (1.13)$$

$$A_k, F_k \in \{0,1\} \quad \forall k \in K \quad (1.14)$$

As variáveis contínuas A e F em (1.11) contabilizam o número de estações abertas ou fechadas no re-projeto. Também é necessário considerar um novo parâmetro, c_f , que representa o lucro com o fechamento de uma estação, tal que $c_a > c_f$, isto é, os efeitos de depreciação fazem com que a receita com a revenda seja menor que o custo de aquisição. Em função disto, não é preciso garantir que apenas uma das variáveis assumirá valor maior que zero. Todavia, se esta formulação for utilizada em um caso simétrico, deve-se incorporar as restrições em (1.15).

$$A_k + F_k \leq 1 \quad \forall k \in K \quad (1.15)$$

Esta restrição evita a geração de soluções artificiais equivalentes em custo às soluções verdadeiras. É o que acontece, por exemplo, com uma solução em que n estações são abertas e outra em que m estações são abertas e $(m - n)$ são fechadas. Obviamente, a segunda é uma má descrição dos “movimentos” da estrutura.

4. Problema de Re-projeto Dinâmico de Sistemas de Montagem (DASRP)

Se a variação nos níveis de demanda for muito grande, re-configurar a linha oferecerá uma forma de gerir adequadamente a capacidade, reduzindo os custos totais envolvidos. Este cenário se tornará mais atraente quando houver custos de manutenção das estações abertas, representando, por exemplo, a taxa de salário ou o consumo de insumos como energia e comunicação. Por isso, é preciso utilizar uma ferramenta que permita dizer em quais momentos vale a pena – ou mesmo é obrigatório – alterar a estrutura.

Considere, então, uma previsão de demanda para um horizonte de planejamento finito, discretizado em períodos, com uma demanda determinística em cada um deles. Deseja-se definir o número de estações que estarão abertas em cada período e quais tarefas serão atribuídas a elas. A segunda formulação apresentada aqui, (F-2), tenta responder a este problema de planejamento. A tabela 4.1 traz as notações necessárias para descrever esta nova formulação.

Conjuntos de Índices	Parâmetros
----------------------	------------

J – Conjunto das tarefas a serem alocadas. K – Conjunto de estações disponíveis para alocação. T – Conjunto de períodos do horizonte de planejamento.	T_j – Tempo de processamento da tarefa j . tc_t – Tempo de ciclo no período t . IP – Conjunto de pares de tarefas, i e j , tal que i precede j . $yo_k = 1$, se a estação k está aberta na solução inicial e 0, caso contrário. $xo_{kj} = 1$, se a tarefa j estava alocada à estação k na solução inicial. ca – Custo (ou lucro) com a abertura (ou o fechamento) da estação. c_{kj} – Custo de re-alocar a tarefa j à estação k , tal que $c_{kj} > 0$, se $xo_{kj} = 0$ e $c_{kj} = 0$, se $xo_{kj} = 1$. s_k – custo de manter a estação k aberta por um período. $FMAX$ – Folga máxima de tempo em qualquer estação aberta. $EMAX$ – Máximo excesso de tempo em qualquer estação aberta.
Variáveis	
y_{kt} – se a estação k , está aberta na solução do período t . x_{kjt} – se a tarefa j foi atribuída à estação k na solução do período t .	

4.1 – Dados para o problema de re-balanceamento dinâmico de linha de montagem. Fonte: autor.

A partir destas definições, uma primeira formulação para o problema de re-configuração multi-periódica é mostrada nas expressões (2.1) – (2.9).

$$\min \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} ca_k \cdot (y_{kt} - y_{kt-1}) + \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} c_{kj} \cdot (1 - x_{kjt-1}) \cdot x_{kjt} + \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} s_k \cdot y_{kt} \quad (2.1)$$

s.a.

$$\sum_{k \in K} x_{kjt} = 1 \quad \forall j \in J, \forall t \in T \quad (2.2)$$

$$\sum_{j \in J} t_j \cdot x_{kjt} = c \cdot y_{kt} + e_{kt} - f_{kt} \quad \forall k \in K, \forall t \in T \quad (2.3)$$

$$x_{kjt} \leq \sum_{h \in K, h \leq k} x_{hit} \quad \forall (i, j) \in IP, \forall h \in K, \forall t \in T \quad (2.4)$$

$$y_{k-1,t} \geq y_{k,t} \quad \forall k \in K, \forall t \in T \quad (2.5)$$

$$e_{kt} \leq E_{MAX} \cdot y_{kt} \quad \forall k \in K, \forall t \in T \quad (2.6)$$

$$f_{kt} \leq F_{MAX} \cdot y_{kt} \quad \forall k \in K, \forall t \in T \quad (2.7)$$

$$x_{kj}, y_k \in \{0,1\} \quad \forall k \in K, \forall j \in J \quad (2.8)$$

$$e_{kt}, f_{kt} \geq 0 \quad \forall k \in K, \forall t \in T \quad (2.9)$$

A função objetivo em (2.1) contabiliza o custo total de re-projeto do sistema somando em cada período os mesmos custos considerados no modelo definido em (1.1) – (1.9) e mais uma parcela que representa o custo de manutenção da estrutura. De (2.2) a (2.9) estão escritas, período a período, as restrições correspondentes àquelas em (1.2) – (1.9). É fácil observar que a função objetivo desta formulação é não-linear em relação às variáveis de atribuição. Entretanto, pode-se torná-la linear inserindo uma nova variável, m_{kjt} , tal que $m_{kjt} = x_{kjt} \cdot x_{kjt-1}$, $\forall k \in K, \forall j \in J, \forall t \in T$. A função objetivo fica então reescrita como se vê em (2.10).

$$f = \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} ca_k \cdot (y_{kt} - y_{kt-1}) + \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} c_{kj} \cdot (x_{kjt} - m_{kjt}) + \sum_{k \in K} s_k \cdot y_k \quad (2.10)$$

Além disso, as restrições (2.11) – (2.13) devem ser adicionadas ao modelo.

$$m_{kjt} \leq x_{kjt-1} \quad \forall k \in K, \forall j \in J, \forall t \in T \quad (2.11)$$

$$m_{kjt} \leq 1 - x_{kjt} + x_{kjt-1} \quad \forall k \in K, \forall j \in J, \forall t \in T \quad (2.12)$$

$$m_{kjt} \in \{0,1\} \quad \forall k \in K, \forall j \in J, \forall t \in T \quad (2.13)$$

Assim como na formulação para o re-projeto em única ocasião, em (2.1) e (2.10) se adota a simetria entre o custo e o lucro unitários quando a estrutura varia sua capacidade. Todavia, conforme já mencionado, a retração da estrutura pode ser desmotivada se houver efeitos de depreciação consideráveis. Visto que o saldo entre o lucro de fechamento e o custo de abertura é negativo, pode ser mais vantajoso manter a estrutura ociosa do que retraí-la para, futuramente, expandi-la. Obviamente, isto também dependerá da intensidade dos custos de manutenção e da quantidade de períodos em que a estação puder operar com menos estações. Uma forma de tratar este problema é mostrada na formulação (3.1)-(3.17) que difere da anterior apenas pela presença de $2 \cdot T$ novas variáveis e um grupo de T restrições. Ela computa, em cada período, o custo ou lucro marginais a cada unidade de variação no número de estações. Para isso, consideram-se dois novos grupos de variáveis binárias, A_{kt} e F_{kt} , e seus respectivos custos ca_k e cf_k . Sendo assim, a formulação F-3 fica escrita pelas expressões:

$$\min \sum_{t \in T} (ca_k \cdot A_{kt} - cf_k \cdot F_{kt}) + \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} c_{kj} \cdot (x_{kit} - m_{kjt}) + \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} s_k \cdot y_{kt} \quad (3.1)$$

s.a.

$$\sum_{k \in K} x_{kjt} = 1 \quad \forall j \in J, \forall t \in T \quad (3.2)$$

$$\sum_{j \in J} t_j \cdot x_{kjt} = c \cdot y_{kt} + e_{kt} - f_{kt} \quad \forall k \in K, \forall t \in T \quad (3.3)$$

$$x_{kjt} \leq \sum_{h \in K \setminus \{h \leq k\}} x_{hit} \quad \forall (i, j) \in IP, \forall h \in K, \forall t \in T \quad (3.4)$$

$$e_{kt} \leq E_{MAX} \cdot y_{kt} \quad \forall k \in K, \forall t \in T \quad (3.5)$$

$$f_{kt} \leq F_{MAX} \cdot y_{kt} \quad \forall k \in K, \forall t \in T \quad (3.6)$$

$$y_{kt} \geq y_{k-1t} \quad \forall k \in K \setminus \{k = 1\}, \forall t \in T \quad (3.7)$$

$$m_{kjt} \leq x_{kjt} \quad \forall k \in K, \forall j \in J, \forall t \in T \quad (3.8)$$

$$m_{kjt} \leq 1 - x_{kjt} + x_{kjt-1} \quad \forall k \in K, \forall j \in J, \forall t \in T \quad (3.9)$$

$$\sum_{k \in K} (y_{kt} - y_{kt-1}) - \sum_{k \in K} A_{kt} + \sum_{k \in K} F_{kt} = 0 \quad \forall t \in T \quad (3.10)$$

$$\sum_{k \in K} (y_{kt} - y_{kt-1}) - \sum_{k \in K} A_{kt} + \sum_{k \in K} F_{kt} = 0 \quad \forall t \in T \quad (3.10)$$

$$A_{kt} \leq A_{k-1t} \quad \forall k \in K \setminus \{k = 1\}, \forall t \in T \quad (3.11)$$

$$F_{kt} \leq F_{k-1t} \quad \forall k \in K \setminus \{k = 1\}, \forall t \in T \quad (3.12)$$

$$A_{kt} + F_{kt} \leq 1 \quad \forall k \in K, \forall t \in T \quad (3.13)$$

$$A_{kt} + F_{kt} \leq 1 \quad \forall k \in K, \forall t \in T \quad (3.13)$$

$$x_{kjt}, y_{kt}, A_{kt}, F_{kt} \in \{0,1\} \quad \forall k \in K, \forall j \in J, \forall t \in T \quad (3.14)$$

$$m_{kjt}, e_{kt}, f_{kt} \geq 0 \quad \forall k \in K, \forall j \in J, \forall t \in T \quad (3.15)$$

Em (3.1), a única parcela da função objetivo que a torna diferente de (2.10) é aquela que diz respeito ao custo ou lucro com a variação da estrutura. Aqui, as variáveis A_{kt} e F_{kt} são ativadas, em ordem crescente de k , $k \in K$, até que se atinja a quantidade de estações variada, no período em questão. Através das restrições (3.10)-(3.12) estas variáveis são utilizadas para que a função objetivo possa calcular o custo ou lucro total de fechamento e abertura através, respectivamente, da soma dos custos e lucros marginais para um número de estações igual à quantidade de estações variadas. As demais restrições são as mesmas que foram definidas para a formulação anterior, inclusive no que se refere a linearização da segunda parcela da função objetivo.

O formato dos parâmetros de custo marginal, ca_k e cf_k , pode especializar ainda mais o modelo. Duas formas alternativas são: considerar que eles possuem valores constantes para qualquer variação da quantidade de estações; ou que eles decresçam com o aumento da variação da quantidade de estações. Isto pode representar, por exemplo, o comportamento de custos como os de contratação e treinamento e de compra de equipamentos e ferramentas, que em maiores quantidades propiciam redução do custo unitário. Com os custos assim estabelecidos, a estrutura tem um estímulo adicional para se contrair quando há elevação do tempo de ciclo. Também é possível considerar este efeito de escala durante a contração da estrutura, visto que as operações de venda de ativos também são afetadas por ele. Entretanto, neste trabalho se estudou somente o caso em que o valor do lucro marginal é constante.

A última formulação dinâmica proposta para o problema de re-configuração considera que não é possível recuperar o valor dos ativos depreciados quando há contração da linha de montagem. Além disso, as estações que foram desativadas em alguns períodos permanecem disponíveis para serem reativadas em períodos futuros. Os custos marginais de abertura incidem, então, apenas sobre as unidades adicionais em relação ao número máximo de estações já instaladas, podendo ser constantes ou decrescentes, como na formulação (3.1)–(3.17). Sobre a quantidade total que é aberta em cada período incide um custo marginal de instalação em cada estação k , ci_k . Esta variante do problema foi idealizada a partir de nossa experiência com uma empresa de manufatura contratada do setor eletroeletrônico, mais especificamente, nos processos de montagem manual de produtos finais. As expressões de (4.1)-(4.19) definem o modelo proposto:

$$\min \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} (ca_k \cdot \delta_{kt} + ci_k \cdot A_{kt}) + \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} \sum_{i \in J} c_{ki} \cdot (x_{kjt} - m_{kjt}) + \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} s_k \cdot y_{kt} \quad (4.1)$$

s.a.

$$\sum_{k \in K} x_{kjt} = 1 \quad \forall j \in J, \forall t \in T \quad (4.2)$$

$$\sum_{j \in J} t_j \cdot x_{kjt} = c \cdot y_{kt} + e_{kt} - f_{kt} \quad \forall k \in K, \forall t \in T \quad (4.3)$$

$$x_{hjt} \leq \sum_{h \in K / h \leq k} x_{hjt} \quad \forall (i, j) \in IP, \forall h \in K, \forall t \in T \quad (4.4)$$

$$e_{kt} \leq E_{MAX} \cdot y_{kt} \quad \forall k \in K, \forall t \in T \quad (4.5)$$

$$f_{kt} \leq F_{MAX} \cdot y_{kt} \quad \forall k \in K, \forall t \in T \quad (4.6)$$

$$y_{kt} \geq y_{k-1t} \quad \forall k \in K \setminus \{k=1\}, \forall t \in T \quad (4.7)$$

$$m_{kjt} \leq x_{kjt} \quad \forall k \in K, \forall j \in J, \forall t \in T \quad (4.8)$$

$$m_{kjt} \leq 1 - x_{kjt} + x_{kjt-1} \quad \forall k \in K, \forall j \in J, \forall t \in T \quad (4.9)$$

$$\sum_{k \in K} (y_{kt} - y_{k-1t}) - \sum_{k \in K} A_{kt} + \sum_{k \in K} F_{kt} = 0 \quad \forall t \in T \quad (4.10)$$

$$\sum_{k \in K} (y_{kt} - y_{k-1t}) - \sum_{k \in K} A_{kt} + \sum_{k \in K} F_{kt} = 0 \quad \forall t \in T \quad (4.10)$$

$$A_{kt} \leq A_{k-1t} \quad \forall k \in K \setminus \{k=1\}, \forall t \in T \quad (4.11)$$

$$F_{kt} \leq F_{k-1t} \quad \forall k \in K \setminus \{k=1\}, \forall t \in T \quad (4.12)$$

$$A_{kt} + F_{kt} \leq 1 \quad \forall k \in K, \forall t \in T \quad (4.13)$$

$$d_t = d_{t-1} - a_t + F_t \quad \forall t \in T \quad (4.14)$$

$$a_t \leq d_{t-1} \quad \forall t \in T \quad (4.15)$$

$$\sum_{k \in K} \delta_{kt} = \sum_{k \in K} A_{kt} - a_t \quad \forall t \in T \quad (4.16)$$

$$\delta_{kt} \leq \delta_{k-1t} \quad \forall k \in K \setminus \{k=1\}, \forall t \in T \quad (4.17)$$

$$x_{kjt}, y_{kt}, A_{kt}, F_{kt}, \delta_{kt} \in \{0,1\} \quad \forall k \in K, \forall j \in J, \forall t \in T \quad (4.18)$$

$$m_{kjt}, e_{kt}, f_{kt}, a_t, d_t \geq 0 \quad \forall k \in K, \forall j \in J, \forall t \in T \quad (4.19)$$

Esta formulação divide o total de estações possuídas em cada período em dois grupos de estações, ativas e desativadas. Para calcular e aplicar custos apenas à quantidade de estações adicionais, utilizou-se quatro novas variáveis, d_t , a_t e δ_t , $\forall t \in T$, sendo os dois primeiros grupos compostos por variáveis contínuas e o último por binárias. As variáveis d_t armazenam, em cada período, a quantidade de estações disponíveis, que é regulada pela equação de balanço (4.14). Nela, a_t aparece no lugar de $\sum_{k \in K} A_{kt}$ para evitar que d_t se torne negativo quando a quantidade de estações necessárias superar as disponíveis. Por isso mesmo, a_t foi limitada pela quantidade de estações disponíveis no período anterior na expressão (4.15). Em (4.16), as variáveis δ_t têm a função de contabilizar o número de estações adicionais, por período, para que sobre elas incidam os custos marginais na primeira parcela na função objetivo (4.1). Analogamente ao que foi feito para as variáveis de abertura, as restrições em (4.17) garantem a ativação das variáveis na ordem crescente do índice das estações. As demais restrições declaram o domínio das variáveis.

Por fim, deve-se observar que não foram feitas considerações sobre os impactos que alterações na estrutura do sistema geram sobre a curva de aprendizado da operação. Logo, a funcionalidade desta abordagem dependerá de outros fatores como a pluri-especialização (pelo menos parcial) dos operadores e a possibilidade de ajustar a infra-estrutura em tempo razoável frente à velocidade de variação da demanda prevista. Se estas condições não puderem ser garantidas, o modelo pode fornecer uma descrição inadequada dos custos reais.

5. Limites Inferiores e Regras de Redução para os Problemas de Re-configurações

Em todas as formulações de re-configuração apresentadas são válidas as mesmas restrições de integralidade e de precedência das tarefas, assim como as restrições de atendimento ao tempo de ciclo em cada estação. Portanto, os limites inferiores que se baseiam nestas restrições também são válidos para o ASRP ou para o DASRP. Basta, por exemplo, relaxar o pressuposto de integralidade das tarefas para aplicar, em cada período, o limite LM1. A exigência de que as tarefas sejam feitas sequencialmente em

qualquer estação permite que o problema de atribuição de cada período seja relaxado como problema de empacotamento. Daí, os limites LM2 e LM3 podem ser empregados, bastando para isso calculá-los em cada período com seu respectivo tempo de ciclo. O limite de seqüenciamento, LM4, proposto por Johnson (1988) também pode ser aplicado a cada valor de tempo de ciclo, porque se baseia nas relações de precedência e nos tempos de processamento das tarefas. Assim como também o podem aqueles que se baseiam no princípio de melhorias destrutivas como LM5, LM7 e LM8, que dependem apenas das relações de precedência e dos tempos de tarefas (Fleszar & Hindi, 2003). Este raciocínio também se estende ao limite LM6 que se baseia na dualidade entre as versões um e dois do SALBP (Scholl & Klein, 1997, apud Scholl & Becker, 2006).

Durante os testes computacionais com as formulações geradas foram utilizados os limites LM1, LM2, LM3, LM6 e LM7. Os demais não foram empregados devido a dificuldades de implementação e ao tempo restrito para desenvolvimento desta pesquisa. Porém, acredita-se que os resultados não foram comprometidos porque os limites implementados foram suficientes para obter valores bem próximos ao número de estações abertas em cada período na solução ótima. Em boa parte das instâncias testadas foi possível atingir o número de estações em um ou mais períodos do horizonte. Nos demais casos, os limites calculados estiveram de dez a trinta por cento abaixo do número de estações da solução ótima. Alguns resultados que exemplificam estas afirmações estão disponíveis no capítulo quatro.

Fleszar & Hindi (2003) descrevem um bom número de regras de redução para o SALBP-1. Entretanto, algumas destas regras não podem ser diretamente aplicadas às formulações de re-configuração, pois seu objetivo não é, necessariamente, buscar a configuração de linha com menor número de estações. A exemplo, as regras que empregam o princípio de aumentar o tempo de algumas tarefas não podem ser usadas porque haveria interferência inadequada nas restrições de suavização da carga. Entretanto elas poderiam ser empregadas apenas para calcular os limites inferiores visto que se apóiam nos pressupostos de indivisibilidade das tarefas e em relações de precedência válidas para todos os períodos. As regras de aumento das relações de precedência, de máximas tarefas e de junção de tarefas, também refletem a minimização do número de estações e, logo, não poderiam ser aplicadas diretamente.

Já a regra de subdivisão da rede poderia ser aplicada, pois depende apenas de questões tecnológicas presentes em cada período, como as relações de precedência e o tempo de ciclo da linha. Assim como as regras de aumento do tempo de tarefas, ela poderia ser utilizada na geração de limites para o número de estações. O mesmo sendo válido para a regra de tarefas falsas. Mesmo sendo estas regras aplicáveis aos modelos deste trabalho, elas não foram empregadas nos casos testados. Sugere-se, portanto, que seu impacto seja analisado em um estudo futuro. Outra possibilidade é estudar variações destas assim como regras de dominância, como faz Amen (2006) para um problema de balanceamento de linha cujo objetivo tem sentido de custo real.

Nos problemas testados foram empregadas duas regras de redução para limitar o número máximo de estações na nova configuração. Uma delas foi desenvolvida para caso de re-projeto em única ocasião e se baseia na viabilidade da solução inicial para o novo tempo de ciclo. A outra é aplicável a esta versão, como também às três formulações dinâmicas e se baseia nas restrições de ocupação mínima de cada estação. Visto que na revisão bibliográfica não se encontraram referências a estas regras, duas proposições foram formuladas e provadas. A seguir elas são apresentadas.

Proposição – 1: *Seja X' , uma dada solução viável para a formulação ASRP-F1, as restrições de abertura sequencial, $y_k \leq y_{k-1}, \forall k \in K \setminus \{k=1\}$ e carga mínima, $\sum_{j \in J} t_j \cdot x_{kj} = M \cdot tc \cdot y_k - f_k + e_k, \forall k \in K$, $e_k \leq E_{\max} \cdot tc \cdot y_k, \forall k \in K$. Considere ainda que M e E_{\max} representam, respectivamente, a meta de ocupação e a folga máxima em cada estação. Então, é válido afirmar que:*

$$\begin{aligned} & \{ [\exists Q \subseteq J \mid (q \in Q) \wedge \\ & (p_q < M - E_{\max})] \rightarrow [\exists k \mid (y_k = 1) \wedge (x_{kq} = 1) \wedge (x_{ks} = 0, \forall s \in J, s \neq q)] \} \\ & \Rightarrow (y_k = 0, \forall k, \lceil |Q|/2 \rceil + 1 \leq k \leq |K|). \end{aligned}$$

Prova: *Seja S , $S = \{(t_1, s_1), (t_2, s_2), \dots, (t_N, s_N)\}$, uma sequência de atribuição de tarefas t a estações s que atende as relações de precedência e em que há somente uma tarefa por estação. Considere, ainda, \underline{m} como o número de tarefas j , tais que $t_j < (M - E_{\max})$. Logo, N estações são usadas nesta solução que é inviável, pois contém \underline{m} estações nas quais as restrições de carga mínima não são atendidas.*

Para que uma solução viável seja obtida, além de atender as restrições de precedência, estas \underline{m} tarefas deverão ser alocadas em uma estação em que haja pelo menos mais uma tarefa para que as restrições de carga mínima sejam atendidas.

Se \underline{m} representar um número par de tarefas, o caso mais favorável ao atendimento das restrições de taxa ocupação mínima (que corresponde ao menor número de estações fechadas por não atender estas restrições) ocorre quando há, entre as combinações destas \underline{m} tarefas, de duas em duas, $\frac{\underline{m}}{2}$ agrupamentos tais que a desigualdade $p_i + p_j > (M - F_{\max})$ é válida para o par de tarefas i e j de cada agrupamento e não há tarefas repetidas entre estes agrupamentos. Se cada agrupamento representar a carga de uma estação, nesta solução, $\frac{\underline{m}}{2}$ estações deverão estar fechadas, pois terão taxa ocupação nula. Pela restrição de abertura sequencial, as estações fechadas em qualquer solução são sempre as últimas de maior índice dentre o total de estações disponíveis. Portanto, as últimas $\frac{\underline{m}}{2}$ estações deverão estar fechadas em qualquer solução viável.

Se \underline{m} for um número ímpar de tarefas, o caso mais favorável ao atendimento das restrições de carga mínima ocorrerá em uma das duas situações: (1) se houver pelo $(\underline{m} - 1)/2$ estações, cada uma com um agrupamento de duas tarefas i e j , tal que $p_i + p_j > (M - F_{\max})$, e uma tarefa restante que pode ser atribuída a uma das estações que contém as tarefas maiores que $(M - F_{\max})$; (2) ou se houver $(\underline{m} - 3)/2$ agrupamentos de duas tarefas e um agrupamento de três tarefas, tal que a ocupação que cada um exige da estação em que estão alocados é maior que $(M - F_{\max})$. Nos dois casos o número de estações que fica vazia após a formação dos agrupamentos é $\lceil (\underline{m} - 1)/2 \rceil$. Pelas mesmas restrições acima comentadas, estas são as $\lceil (\underline{m} - 1)/2 \rceil$ estações de maior índice.

Portanto, para qualquer valor de \underline{m} , o número de estações fechadas será $\lceil (\underline{m} - 1)/2 \rceil$.

Corolário do Proposição – 1: *Em cada período t , $t \in T$, a quantidade de tarefas cujo tempo de processamento é maior que $(M - F_{\max}) \cdot tc$ depende de seu respectivo valor para o tempo de ciclo, tc_t . Logo, a proposição 1 pode ser aplicada para determinar o número de tarefas com esta característica em cada período, \underline{m}_t , e, por conseguinte, a quantidade de estações que permanecerão fechadas nesta solução.*

Proposição – 2: *Considere uma solução inicial, X_0 , com n_0 estações. Se esta solução também for viável para as restrições (F1-2)-(F1-9) calculadas no novo tempo de ciclo, tc , n_0 representará um limite superior para o número de estações, n , nesta solução.*

Prova: *Dado que X_0 é uma solução viável para as restrições (F1-2)-(F1-9) calculadas em tc , o custo total de re-projeto se a estrutura for mantida inalterada será nulo, pois todas as parcelas de (1.1) também o serão. Qualquer solução com mais de n_0 estações implicará em um custo total de deslocamento $\sum_{k \in K} \sum_{j \in J} c_{kj} \cdot (1 - x_{0kj}) \cdot x_{kj} > 0$, pois um número de tarefas pelo menos igual a quantidade de estações adicionais deverá ser movimentada. Além disso, em qualquer expansão, $\sum_{k \in K} ca \cdot (y_k - y_{0k}) > 0$. Portanto, qualquer solução com mais de n_0 estações poderá ser desconsiderada, pois implicaria em um custo total superior ao de manter a solução inicial.*

6. Experimentos Computacionais

Os experimentos foram realizados em quatro frentes. Testes foram feitos para avaliar o desempenho computacional das formulações de re-configuração quando auxiliadas por limites inferiores e pelas regras de redução propostas. Os exemplos usados são adaptações de um conjunto de casos da literatura, de outros gerados aleatoriamente e de alguns obtidos a partir da colaboração com uma empresa de manufatura contratada do setor eletroeletrônico. Os casos da literatura foram obtidos a partir do endereço www.assembly-line-balancing.de. Foram utilizados apenas os tempos das tarefas e as relações de precedência, os demais parâmetros foram gerados aleatoriamente instância por instância. Os testes também analisam a capacidade do ASDP e do DASRP reduzirem os custos de operação dos sistemas de montagem ao longo do tempo. As formulações propostas também foram aplicadas a dois casos reais envolvendo linhas de montagem do setor eletroeletrônico.

6.1. Desempenho computacional das formulações

Nesta seção, apresenta-se uma série de testes computacionais para avaliar o impacto das regras de redução e dos limites inferiores propostos para as versões do ASRP. A tabela 4.1 apresenta os resultados obtidos para a formulação (1.1)–(1.9) do ASRP quando a regra de redução baseada na ocupação mínima é aplicada nos dois grupos de instâncias acima referidas. As instâncias formuladas a partir de casos da literatura são referenciadas da mesma forma que na fonte. Foram registrados os valores do *gap* de programação linear, do tempo de processamento e da quantidade de variáveis restantes após algumas variáveis serem prefixadas com o uso dos limites inferiores do número de estações e com a regra de ocupação mínima. A primeira coluna de resultados reporta a performance da formulação quando a regra de ocupação mínima é aplicada juntamente aos limites adaptados do SALBP-1. Já a segunda traz os resultados obtidos com auxílio apenas dos limites inferiores.

Instância	Tarefas	Estações	No. Var.	Gap de PL (%)	Tempo (h / ' / '')	No. Var. final	Gap de PL (%)	Tempo (h / ' / '')	No. Var. Final
Mertens	7	7	84	2,7	0,1''	23	2,68	0,1''	50

Bowman8	8	8	104	33,4	0,1''	14	33,4	0,1''	48
Jaeschke	9	9	126	7,3	0,0''	27	0,00	0,0''	64
Mansoor	11	11	176	4,7	0,1''	66	4,69	0,1''	118
Jackson	11	11	176	0,0	0,1''	56	0,00	0,1''	145
Mitchell	21	21	546	0,0	0,2''	165	1,11	0,1''	456
Roszieg	25	25	750	20,0	0,7''	259	20,13	1,3''	732
Heskia	28	28	924	9,5	0,5''	623	9,47	1,0''	902
Buxey	29	29	986	13,6	5,7''	572	13,59	7,1''	924
Sawyer30	30	30	1.050	65,9	1,1''	400	65,88	5,0''	1.026
Lutz1	32	32	1.184	7,6	34,7''	613	7,63	16,0''	1.138
Gunther	35	35	1.400	43,9	23,8''	730	43,83	80,1''	1.376
Kilbrid	45	45	2.250	30,5	20,9''	1.170	30,44	33,7''	2.226
Hahn	53	53	3.074	47,6	14,8''	1.653	47,59	50,9''	3.053
Tonge70	70	70	5.250	$\leq 20,98^+$	$> 8' 30''$	2.778	$\leq 20,55^+$	$> 27' 25,8''$	5.041
Wee-Mag	75	75	6.000	21,48	4' 4,4''	2.991	21,48	12' 48''	5955

⁺ Instâncias em que a solução obtida está abaixo da ótima em até 5%.

Tabela 6.1 – Desempenho computacional da formulação ASRP-F1 em instâncias adaptadas da literatura e instância geradas aleatoriamente. Fonte: autor.

Instância	Tarefas	Estações	No. Var.	Tempo (h / ' / '')	No. Var. final	Tempo (h / ' / '')	No. Var. final
Roszieg	25	25	750	0,1''	73	0,2''	257
Heskia	28	28	924	0,3''	130	0,9''	571
Buxey	29	29	986	0,5''	192	1,2''	514
Sawyer30	30	30	1050	2,0''	226	3,0''	471
Lutz1	32	32	1184	0,2''	88	0,3''	615
Gunther	35	35	1400	0,5''	188	1,1''	701
Kilbrid	45	45	2250	0,1''	289	0,3''	1131
Hahn	53	53	3074	0,1''	226	0,3''	1553
Warnecke	58	58	3654	1' 2,1''	1123	2' 11,2''	1855
Tonge70	70	70	5250	8,3''	632	1' 15,4''	2683
Wee-Mag	75	75	6000	44,4''	1734	1' 9,1''	3000
Lutz2	89	89	8366	6' 43,1''	1709	46' 4,6''	4199
Lutz3	89	89	8366	1' 35,0''	1703	10' 52,2''	4279

Tabela 6.2 – Comparação das duas regras de redução propostas quanto ao desempenho computacional da formulação ASRP-F1 em instâncias adaptadas da literatura. Fonte: autor.

O impacto da segunda regra de redução – baseada na redução do tempo de ciclo – foi analisado com base em um subconjunto das instâncias mostradas na tabela 6.1. Nestas instâncias o tempo de ciclo requerido foi definido abaixo do valor da solução inicial para que a regra pudesse ser aplicada. Como se vê na tabela 6.2, houve uma redução substancial da quantidade de variáveis e, por conseguinte do tempo de processamento. Entretanto, a validade desta regra é limitada, pois depende de condições muito específicas para ser

aplicada. Ao contrário do que acontece com a regra de redução baseada na ocupação mínima.

Instância	Tarefas	Estações	Períodos	No. Variáveis	Gap de PL (%)	Tempo /' / ''	(:	No. Var. final	Gap de PL (%)	Tempo (h /' / ''	No. Var. final
Mertens	7	7	12	1.596	2,67	1,3''		378	1,44	1,2''	1.596
Bowman8	8	8	10	1.680	7,63	0,5''		588	7,54	0,5''	1.680
Jaeschke	9	9	10	2.070	5,08	0,2''		368	3,87	0,7''	2.070
Mitchell	21	21	4	3.948	7,20	15,0''		1022	7,86	50,1''	3.948
Mansoor	11	11	7	2.079	11,44	5,3''		795	11,44	13,1''	2.079
Jackson	11	11	10	2.970	11,74	12,5''		851	10,57	41,3''	2.970
Roszieg	25	25	3	4.125	11,87	23,4''		1209	11,87	89,0''	4.125
Heskia	28	28	4	6.832	10,15	6' 51,6''		3569	10,15	11' 12,4''	6.832
Gunther	35	35	3	7.875	20,23	32' 1,9''		2997	18,21	3: 50' 26,7''	6464
Aleatória	15	15	3	1.575	70,91	4,3''		434	71,19	43,0''	778
Aleatória	10	10	8	2.000	0,00	0,2''		114	0,00	0,2''	1.682
Aleatória	15	15	4	2.100	24,83	0,7''		505	24,86	5,1''	1.101
Aleatória	15	15	5	2.625	30,92	0,4''		639	16,76	11,6''	1.526
Aleatória	15	15	5	2.625	16,71	1,1''		692	16,73	2,4''	1.576
Aleatória	20	20	3	2.700	15,87	1' 5,6''		795	17,53	1' 43,9''	2.145
Aleatória	13	13	7	2.821	19,28	1,4''		486	26,55	4,9''	1.406
Aleatória	17	17	5	3.315	33,79	7,0''		877	33,80	4' 41,5''	2.729
Aleatória	20	20	4	3.600	30,79	16,8''		1648	18,49	13,6''	2.785
Aleatória	20	20	4	3.600	26,48	4,0''		1081	57,62	10,6''	2.794
Aleatória	20	20	4	3.600	50,72	9' 10,0''		2948	50,18	12' 38,7''	2.948
Aleatória	20	20	4	3.600	17,14	1' 5,5''		940	17,53	13' 16,2''	2.802
Aleatória	20	20	4	3.600	26,24	19,5''		994	26,50	1' 12,3''	2.920
Aleatória	18	18	6	4.428	18,9	7,2''		1131	19,37	32,5''	3.575
Aleatória	25	25	3	4125	54,08	1' 5,8''		1027	56,61	5' 39,1	2916
Aleatória	27	27	3	4779	50,51	8' 29,8''		2071	50,51	26' 52,4''	3443
Aleatória	35	35	3	7875	73,93	5: 14' 33,1''		2983	< 61,9 ⁺	> 25: 0' 0''	5553

⁺ Instâncias em que a solução obtida está abaixo da ótima em até 5%.

Tabela 6.3 – Desempenho computacional das formulações (3.1)-(3.15) para o DASRP em um conjunto de instâncias aleatórias. Fonte: autor.

A tabelas 6.3 mostra o desempenho computacional da formulação (3.1)-(3.15) em instâncias adaptadas da literatura e em outras geradas aleatoriamente. Novamente os resultados obtidos com regra de redução e os limites – descritos na primeira coluna – são superiores àqueles obtidos apenas com aplicação dos limites inferiores. O mesmo conjunto de instâncias foi testado com a formulação (4.1)-(4.19) para o DASRP e os resultados são mostrados na tabela 6.4. Quanto à dimensão das instâncias, o desempenho desta formulação se mostrou muito próximo ao daquela em (3.1)-(3.15), mesmo contendo mais variáveis. A proporção do total de variáveis que foi eliminada com o a regra de redução foi igual ou

superior a obtida para esta última formulação. Da mesma forma que nos testes anteriores, o *gap* de programação linear teve qualidade igual ou ligeiramente inferior ao das instâncias em que apenas os limites inferiores foram usados.

Instância	Tarefas	Estações	Períodos	No. Variável	Gap de PL (%)	Tempo (: ' / '')	No. Var. final	Gap de PL (%)	Tempo (: ' / '')	No. Var. final
Mertens	7	7	12	1.704	2,66	1,4''	397	1,54	2,3''	941
Bowman8	8	8	10	1.780	5,93	0,5''	627	5,93	0,7''	840
Mansoor	11	11	7	2.170	11,97	13,7''	739	10,35	36,3''	1.557
Jaeschke	9	9	10	2.180	3,84	0,2''	391	3,89	0,6''	983
Jackson	11	11	10	3.100	14,35	11,4''	883	13,39	23,6''	2.154
Mitchell	21	21	4	4.040	7,21	15,8''	1.046	7,86	1' 11,7''	2.589
Roszieg	25	25	3	4.206	11,87	10,1''	1.268	11,87	1' 10,9''	3.477
Heskia	28	28	4	6.952	6,46	13' 15,6''	3.621	6,46	24' 6,8''	6001
Gunther	35	35	3	7.986	17,33	59' 32,3''	3.034	18,21	3' 59' 9,2''	6464
Aleatória	15	15	3	1.626	36,11	4,6''	445	36,17	14,7''	803
Aleatória	10	10	8	2.096	0,00	0,1''	114	0,00	0,1''	333
Aleatória	15	15	4	2.168	2,90	0,2''	516	2,90	0,4''	1.131
Aleatória	15	15	5	2.710	30,92	2,2''	650	16,86	5,8''	1.603
Aleatória	15	15	5	2.710	4,95	1,1''	709	4,97	2,6''	1.623
Aleatória	13	13	7	2.926	19,22	3,0''	510	19,22	5,2''	1.474
Aleatória	17	17	5	3.410	19,01	8,0''	898	19,02	4' 49,8''	2.822
Aleatória	20	20	3	2.766	11,58	43,0''	1756	13,04	1' 17,9''	2209
Aleatória	20	20	4	3.688	16,09	24,8''	1.154	8,32	10,4''	2880
Aleatória	20	20	4	3.688	9,78	6' 29''	3.034	9,78	7' 2,9''	3034
Aleatória	20	20	4	3.688	18,34	7' 56,6''	959	18,91	1' 38'' 15,6''	2871
Aleatória	20	20	4	3.688	12,34	14,4''	1.012	12,52	2' 16,8''	3006
Aleatória	18	18	6	4.548	13,15	1,8''	1163	13,61	9,9''	3693
Aleatória	25	25	3	4.206	12,34	14,4''	1.088	12,52	2' 16,8''	2.995
Aleatória	27	27	3	4.866	19,99	1' 10,4''	2.156	19,99	4' 51,8''	3528
Aleatória	35	35	3	7986	38,48	2: 12' 24''	3092	< 41,21 ⁺	> 9: 36' 20''	5662

Tabela 6.4 – Desempenho computacional da formulação (4.1)-(4.19) para o DASRP em instâncias adaptadas da literatura. Fonte: autor.

As duas alternativas de formulação do DASRP com custos e lucros marginais simétricos, também foram avaliados quanto ao *gap* linear e o tempo de processamento. A tabela 6.5 mostra as comparações entre as formulações (2.2)-(2.13) e (3.1)-(3.9), descritas na primeira e segunda coluna, respectivamente. Nas instâncias menores, os tempos de processamento da formulação (2.2)- (2.13) são ligeiramente inferiores aos da (3.1)-(3.9), sendo que este comportamento se inverte quando a dimensão das instâncias aumenta. Todavia, os limites de programação linear parecem não ter sofrido grande impacto com a mudança do modelo de programação inteira mista.

Instância	Tarefas	Estações	Períodos	Gap de PL (%)	Tempo (h / ' / '')	No. Var. inicial	No. Var. final	Gap de PL (%)	Tempo (h / ' / '')	No. Var. inicial	No. Var. final
Mertens	7	7	12	3,06	0,3''	1.428	364	3,06	0,3''	1.596	378
Bowman8	8	8	10	7,33	0,4''	1.520	535	9,14	0,5''	1.680	588
Mansoor	11	11	7	12,78	3,3''	1.925	751	12,78	7,9''	2.079	795
Jaeschke	9	9	10	5,84	0,2''	1.890	351	5,84	0,2''	2.070	368
Jackson	11	11	10	13,85	24,7''	2.750	817	13,85	35,1''	2.970	851
Mitchell	21	21	4	7,21	9,3''	3.780	989	7,21	19,8''	3.948	1.022
Roszieg	25	25	3	11,87	22,5''	3.975	1.194	11,87	45,4''	4.125	1.209
Heskia	28	28	4	11,03	10' 23,0''	6.608	3.475	11,03	12' 41,8''	6.832	3.569
Aleatória	20	20	4	50,18	9' 10,1''	3.440	2.788	50,18	24' 1,8''	3.600	2.948
Aleatória	20	20	4	62,43	19,4''	3.440	1.024	63,76	14,7''	3.600	1.648
Aleatória	20	20	4	22,42	5,6''	4.212	1.075	22,42	4,3''	4.428	1.131
Aleatória	25	25	3	59,77	1' 17,1''	3.975	994	59,42	55,1''	4.125	1.027
Aleatória	27	27	3	59,85	22' 4,0''	4.617	1.909	59,85	11' 44,7''	4.779	2.071

Tabela 6.5 – Comparação do desempenho computacional das formulações (2.2)-(2.13) e (3.1)-(3.9) para o DASRP com custo e lucro marginais simétricos. Fonte: autor.

6.2. Comparação das formulações com o SALBP-1 e o WSP

Nesta seção, analisou-se a dependência das formulações do ASRP e do DASRP em relação aos custos de variação da estrutura e à visibilidade do horizonte de planejamento. Para isso, fizeram-se comparações contra duas abordagens tradicionais, o SALBP-1 e o WSP. Para tornar a comparação mais igualitária, no primeiro caso foi empregada uma versão adaptada do SALBP-1 proposto por Bayards (1986) em que as restrições de atendimento ao tempo de ciclo foram substituídas por (1.3), (1.6) e (1.7) de modo que o cálculo de folgas e excessos fosse incorporado no modelo. A segunda comparação foi feita em relação à abordagem hierárquica que consiste em aplicar o SALBP-1 para determinar o menor número de estações e, posteriormente, o WSP para suavizar distribuição da carga de trabalho entre elas.

Este experimento foi feito com uma instância aleatória, cujos tempos de processamento e as relações de precedência podem ser vistos na figura 6.1, sendo os demais dados complementados pela tabela 4.7. Os valores considerados para o custo marginal de abertura, o lucro marginal de fechamento e custo unitário de manutenção são de 2.029,0, 1.591,3 e 279,89 unidades monetárias, respectivamente.

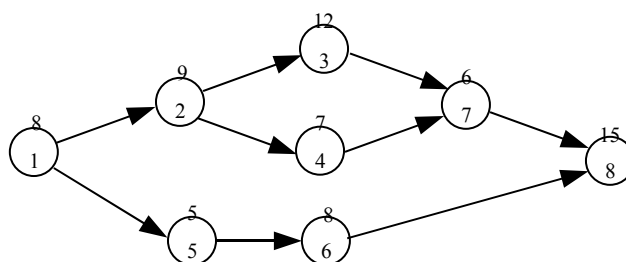


Figura 6.1 – Diagrama de precedência e tempos de processamento para um produto hipotético. Fonte: autor, 2006.

Tarefa	Custo de Deslocamento	Períodos	Tempo de Ciclo	Solução Inicial ($tc = 11$)
1	190,7	1	15	Estação 1: {1,2}
2	210,9	2	18	Estação 2: {3}
3	115,6	3	26	Estação 3: {4,5}
4	297,6	4	27	Estação 4: {6,7}
5	101,1	5	18	Estação 5: {8}
6	277,1	6	15	Estação 6: {}
7	258,6	7	16	Estação 7: {}
8	188,7	8	27	Estação 8: {}
-	-	9	19	-
-	-	10	31	-

Tabela 6.6 – Parâmetros para instância ilustrada na figura 4.1. Fonte: autor.

Nas figuras 6.2-(a) a 6.2-(d) as soluções propostas por cada uma formulações do ASRP são comparadas àquelas obtidas com SALBP-1. Deve-se observar que os custos de marginais de abertura e de ativação presentes na formulação (4.1)-(4.19) foram definidos de modo que sua soma seja igual ao custo de marginal de abertura usado em (3.1)-(3.15). Por sua vez, o custo de marginal de abertura foi calculado como a diferença entre este custo e o lucro marginal de fechamento da formulação, (3.1)-(3.15). Para aproximar os resultados da formulação (1.1)-(1.9) daqueles gerados pelas demais formulações, incorporou-se uma parcela de referente a taxa de salário na função objetivo (1.1). Desta forma, a diferença entre o ASRP e DASRP fica limitada à visibilidade do horizonte de planejamento.

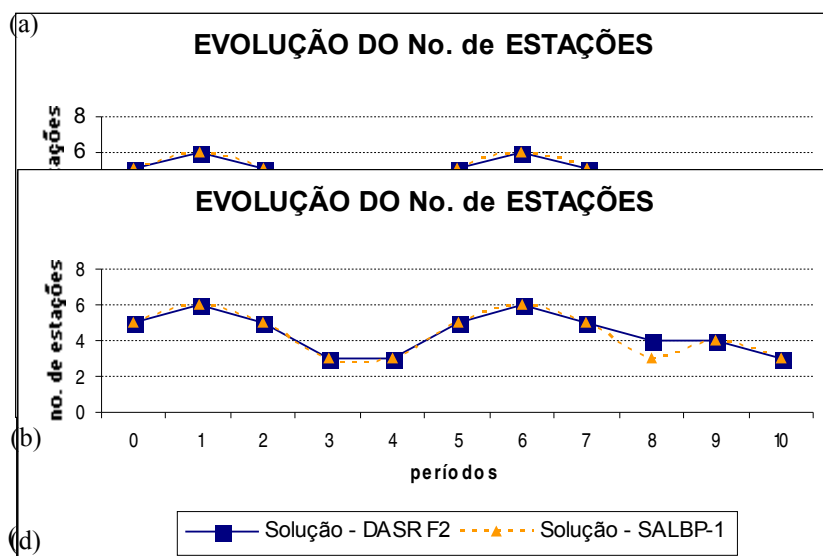


Figura 6.2 – Evolução do número de estações da linha montagem obtido pelas abordagens ASRP e DASRP comparadas ao SALBP-1. Fonte: autor, 2006.

A única solução de re-projeto que apresentou a mesma evolução do número de estações que o SALBP-1 foi aquela gerada pela aplicação sucessiva da formulação (1.1)-(1.9) para o ASRP. Entretanto, elas são diferentes quanto à alocação das tarefas, sendo que a solução do ASRP proporcionou um custo total re-configuração e operação inferior. Tal fato sinaliza que mesmo desconsiderando o horizonte de planejamento integral, a primeira formulação de re-configuração supera o SALBP-1 ao pressupor a existência de custos de re-alocação das tarefas e de variação da quantidade de estações de trabalho. As figuras 4.3-(a) e (b) apresentam os custos acumulados das formulações para o ASRP e o DASRP – com exceção da formulação (4.1)-(4.19) – comparados aos custos gerados pela solução SALBP-1 e do WSP. Como era de se esperar, as últimas duas abordagens implicaram em custos maiores que dos modelos propostos. A solução proposta pelo WSP, a mais cara delas, superou os custos da solução da formulação (3.1)-(3.15) em 54,9%.

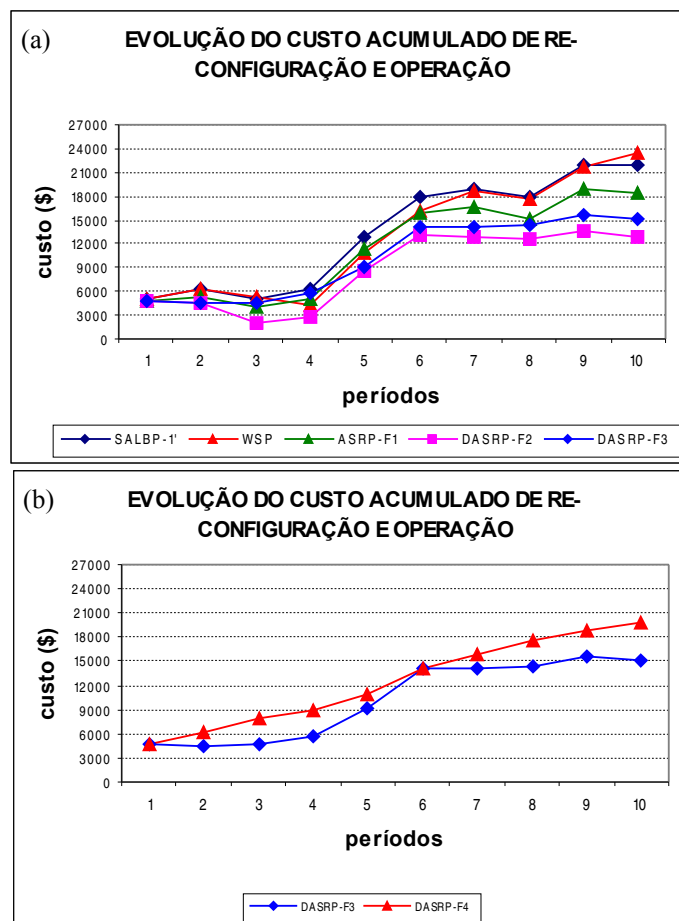


Figura 6.3 – Comparação do custo acumulado nas soluções das formulações SALBP-1 modificado, WSP, ASRP-F1, DASRP-F2, DASRP-F3 e DASRP-F4. Fonte: autor, 2006.

A importância da visibilidade do horizonte de planejamento é facilmente pela comparação dos resultados obtidos com as formulações (1.1)-(1.9) e (3.1)-(3.15). Através das figuras 6.2-(a) e (c), vê-se que eles diferem apenas nos períodos três, quatro e oito, onde a primeira levou a uma contração maior da linha de montagem, por não considerar a mudança do tempo de ciclo nos períodos à frente. Logo, ela apenas pondera entre as economias obtidas com a redução da linha e os respectivos custos de deslocamento, ignorando a necessidade de a aumentar a estrutura nos períodos cinco e seis. O mesmo acontece no período oito. Além de obter uma variação mais suave do número de estações da linha de montagem, a abordagem dinâmica atinge um custo total menor. Na figura 6.3-(a), estas vantagens são evidenciadas nos períodos três e quatro em que a formulação para o ASRP prescreveu uma retração da estrutura, gerando um custo de reabertura muito maior nos dois períodos seguintes e, conseqüentemente, fazendo com que seu custo acumulado se tornasse superior ao da formulação (3.1)-(3.15) a partir do período cinco. O mesmo padrão de movimentação acontece entre os períodos oito e nove.

Os efeitos de depreciação são evidenciados pelas diferenças entre as soluções das formulações DASRP-F2 e DASRP-F3, descritas nas figuras 6.2-(b) e 6.2-(c), respectivamente. Como se vê, o DASRP-F2 é mais flexível em ajustar a estrutura, pois desconsidera os custos de depreciação. Nos períodos três e quatro, por exemplo, ela gerou uma solução com mesmo número de estações que o SALBP-1, pois o lucro com o fechamento das estações compensou os custos da reabertura nos períodos seguintes.

Entretanto, no período oito, este efeito não é suficiente para contrabalançar os custos envolvidos com dois movimentos sucessivos: uma retração para três estações e uma nova expansão para quatro, no período nove. Caso estas alterações fossem feitas elas despenderiam a pelo menos 377,36 unidades montarias, o valor correspondente a dois deslocamentos sucessivos da tarefa oito. A inexistência de efeitos de depreciação fez com que DASRP-F2 oferecesse o menor custo total de re-configuração e operação dentre as abordagens analisadas.

A figura 6.3-(b) compara em separado as formulações DASRP-F3 e DASRP-F4 para evidenciar o efeito da depreciação total dos ativos sobre o custo acumulado das soluções. Como era de se esperar, a formulação DASRP-F4 gerou um custo acumulado não-decrescente e superior ao da formulação DASRP-F3 em todos períodos do horizonte de planejamento. Mesmo assim, a abordagem hierárquica, com o WSP, e aquela que aplica o SALBP-1 modificado tiveram custos superiores aos do DASRP-F4 em 17,6% e 10,8%, respectivamente.

6.3. Resposta à variação nos parâmetros de custo

Foram feitas algumas variações sobre os parâmetros de custo e sobre as restrições de ocupação das estações para avaliar a sensibilidade das formulações do DASRP. Inicialmente, observou-se o efeito dos custos de manutenção. Para isso, duplicou-se o valor utilizado na instância original, resolvendo-a a seguir com as três formulações dinâmicas do ASRP. Esta alteração foi suficiente para que a formulação mais flexível, o DASRP-F2, gerasse a mesma solução do SALBP-1. O aumento da atratividade pela retração da linha causou menos impacto sobre as soluções do DASRP-F3 e do DASRP-F4, onde a duplicação do custo de manutenção foi suficiente para incentivar a redução do número de estações nos períodos três e quatro, mas não no período oito. A solução obtida por estes dois modelos é graficamente igual a da figura 6.2-(b). Quando o custo unitário de manutenção se aproxima de 890 unidades monetárias, a retração da linha no período oito passa ser interessante. Neste momento, as soluções obtidas por DASRP-F3 e DASRP-F4 se igualam à solução do SALBP-1 em número de estações por período. Se um paralelo for traçado com os sistemas de montagem em que o custo de manutenção representa a taxa de salário dos trabalhadores, pode-se afirmar que há maior grau de movimentação à medida que o sistema se torna mais intensivo em mão-de-obra.

Os efeitos da depreciação também foram estudados. Para isso, o lucro de fechamento foi elevado gradativamente, reduzindo assim o custo de depreciação – calculado pela diferença entre o custo de abertura e a receita obtida com a desmobilização de uma estação. Os demais parâmetros foram definidos como na instância inicial. Observou-se que a linha sofre uma retração nos períodos três e quatro, quando o custo de depreciação está em torno de 104,2 unidades monetárias. Deste valor para cima a solução se iguala àquela obtida pelo DASRP-F2 e representada em 6.2-(b).

Mudanças nos custos de deslocamento também analisadas. Observou-se que somente variações muito significativas nestes custos são capazes de alterar a solução apresentada para o DASRP-F3 na figura 6.2-(c). A primeira mudança observada, uma retração nos períodos três e quatro, se tornou atrativa somente quando os custos de deslocamento passaram de um terço para um quarto dos valores da instância original, resultando em uma re-configuração com a mesma evolução no número de estações que aquela mostrada na figura 6.2-(b). Para qualquer redução além deste ponto não altera a solução, pois uma retração para três estações no período oito ofereceria uma economia de apenas 279,89 contra custos de deslocamento de 825,69 unidades monetárias para re-alocar as tarefas do período sete para o oito. Em relação às soluções apresentadas nas figuras 6.2-(c) e 6.2-(d), o número de estações prescritas pelo DASRP-F3 e pelo DASRP-F4 aumenta em uma unidade no período sete quando os custos de deslocamentos são elevados em 50%. Isso é possível

porque os movimentos de retração sucessivos para cinco e quatro estações são mais caros que a manutenção da configuração corrente por mais um período para, então retraindo a linha diretamente para quatro estações ($1204,41 + 1007,62 > 279,89 + 1007,62$).

Nas as formulações propostas, os custos de deslocamento dependem apenas da natureza da tarefa. Contudo, eles poderiam depender de outros fatores como, por exemplo, distância entre duas estações específicas na linha de montagem, ou mesmo estarem relacionados a mais de um parâmetro. Um caso interessante envolve os custos dependentes da natureza da tarefa e do número de estações em que ela foi deslocada. É o que acontece, por exemplo, na mudança de recursos cujo suprimento de energia, de materiais e informações é feito através de cabos e tubulações cuja instalação varia significativamente com o comprimento utilizado. Considera-se um custo dependente de sua natureza c_j que é aumentado de uma quantidade $\alpha_j \cdot c_j$, tal que $0 < \alpha_j \leq 1$, $\forall j \in J$, sempre que ela é re-allocada da estação k para a estação k' , $k' = k + 1$ ou $k' = k - 1$. Uma generalização para o deslocamento para qualquer estação é obtido pela seguinte expressão:

$$c_{kj} = \begin{cases} c_j \cdot (1 + \alpha_j \cdot |k - k'|) & k \in K, k \neq k' \\ 0, & k \in K, k = k' \end{cases}$$

Este pressuposto é coerente quando todos os pares de postos adjacentes tiverem a mesma distância entre si, ou quando as diferenças forem consideradas desprezíveis. Se não for possível considerar a distância entre postos constante ao longo de toda linha, pode-se substituir o fator α_j por $\alpha'_j \cdot l_{k_1 k_2}$, onde α'_j representa o taxa de aumento por unidade de comprimento e $l_{k_1 k_2}$ é a distância entre duas estações da linha $k_1, k_2 \in K, k_1 \neq k_2$.

6.4. Resposta à variação nos limites de folga e excesso de ocupação

As restrições de ocupação mínima e máxima permitem que algumas soluções sejam desconsideradas, melhorando, a princípio, o desempenho dos métodos computacionais. Todavia, este efeito dependerá dos limites escolhidos, além disso, o custo da solução também pode ser afetado significativamente à medida que o problema for mais restrito. Para avaliar este impacto, considerou-se uma instância adaptada a partir do diagrama de precedência descrito em Becker & Scholl (2006) e ilustrado na figura 6.4. Além destes tempos de processamento e relações de precedência, foram considerados os dados de entrada listados na tabela 6.8. A solução inicial ali apresentada também foi obtida no mesmo artigo. O custo e o lucro unitários de variação do número de estações foram $ca_k = 2500$ e $cf_k = 1500$ unidades monetárias, respectivamente, e a taxa de salário $s_k = 500$, $k \in K$.

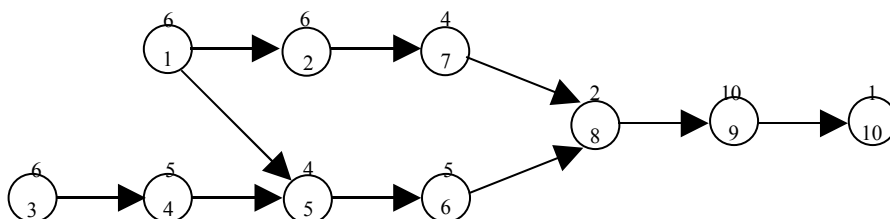


Figura 6.4 – Diagrama de precedência com tempos de processamento para uma montagem com dez tarefas. Fonte: Becker & Scholl, 2006.

Tarefa	Custo de Deslocamento	Períodos	Tempo de Ciclo	Solução Inicial ($t_c = 11$)
1	150	1	13	Estação 1: {1,3}
2	200	2	18	Estação 2: {2,4}
3	320	3	29	Estação 3: {5,6}
4	180	4	27	Estação 4: {7,8}
5	100	5	16	Estação 5: {9,10}
6	220	6	13	Estação 6: {}
7	300	-	13	Estação 7: {}
8	250	-	14	Estação 8: {}
9	100	-	27	Estação 9: {}
10	270	-	17	Estação 10: {}

Tabela 6.7 – Parâmetros adaptados para a instância obtida em Becker & Scholl (2006). Fonte: autor.

Testou-se inicialmente o caso menos restrito, ou seja, fixou-se o limite superior de ocupação de 100% e o inferior em 0% (na verdade, estabeleceu-se um valor de 0,1%, para evitar soluções em haja estações abertas sem que tarefas tenham sido atribuídas a ela). A solução obtida pela formulação DASRP-F3 foi processada em 52,8 segundos, tendo podado 610 variáveis de um total de 2.500 somente com o uso de limites inferiores. Sendo a ocupação mínima praticamente nula, o resultado permaneceu inalterado quando a regra de redução de ocupação mínima foi aplicada. Nesta solução, as ocupações de maior e o menor valor ao longo de todos os períodos, foram, respectivamente, 41,38 e 100%. Os parâmetros M , E_{\max} e F_{\max} foram, então, redefinidos para que correspondessem a estes valores de folga e excesso. Obviamente, isto tornou a formulação mais justa para esta instância, deixando o limite de programação linear um pouco mais próximo da solução ótima e reduzindo o tempo de processamento para 26,8 segundos. Ao mesmo tempo, o número de variáveis eliminadas aumentou para 802. Através da regra de ocupação mínima o número de variáveis eliminadas sobe para 1.750 e o tempo de processamento, cai novamente pela metade, atingindo 11 segundos.

Por outro lado, em uma aplicação prática, é comum definir os limites de ocupação para simular uma suavização da carga de trabalho entre as estações da linha. Neste caso, corre-se o risco de eliminar a melhor solução, ou seja, a solução ótima do problema menos restrito. Na instância anterior, considere que o limite máximo de ocupação desejado seja de 95% do tempo de ciclo e o limite inferior seja mantido em 0%. Neste caso, a solução ótima passaria a ser 19.830 unidades monetárias, 21,4% superior à anterior. Já para um limite de 85%, a solução ótima tem custo 24,9% superior, enquanto para uma ocupação máxima de 75% nem há solução viável. Estes resultados mostram que a forma como as restrições de folga e excesso são aplicadas pode ter grande impacto sobre o custo e a viabilidade e a qualidade das soluções obtidas. Logo, devem-se analisar as vantagens da equalização da carga de trabalho, pois ela tende a elevar os custos de re-configuração e operação. Deve-se lembrar que a presença de outras restrições tecnológicas como de separação e distanciamento de tarefas podem inviabilizar soluções dentro dos limites desejados. Nestas situações, concessões deverão ser feitas sobre os limites de folga e excesso até que uma solução viável seja atingida.

7. Estudo de Caso: Re-configuração de Linhas de Montagem Manuais no Setor Eletroeletrônico

A formulação do DASRP descrita em (4.1)-(4.19) foi inspirada a partir das necessidades de uma empresa do ramo eletroeletrônico e por isto mesmo testada na re-configuração de duas linhas de montagem manuais responsáveis pela produção de produtos finais. A empresa é uma filial brasileira de uma empresa multinacional que oferece serviços de manufatura contratada. Nesta área, são comuns grandes variações nos níveis de demanda capazes de tornar as linhas ociosas ou sobrecarregas em poucos meses. Outra particularidade são as baixas margens de lucro que forçam as empresas a atuarem na redução de seus custos logísticos e de produção. Logo, a empresa precisa lidar com a necessidade de usar um sistema de produção com baixos custos unitários e, ao mesmo tempo, tentar gerir sua capacidade para que os custos de sua operação sejam minimizados ao longo do tempo.

Aplicou-se a formulação dinâmica DASRP-F4 aos dados descritos na tabela 7.1 para as linhas que aqui serão chamadas de A e B. Além dos custos de deslocamento ali descritos, também foram considerados custos de abertura, manutenção e instalação, idênticos para todas as estações e iguais a 6.000, 1.200 e 300 unidades monetárias, respectivamente. Para tornar a função objetivo (4.1) mais adequada a este estudo de caso, incorporou-se nela uma parcela referente aos custos de fechamento escrita como $\sum_{k \in K} cf_k \cdot F_k$, sendo que o custo marginal de fechamento foi definido como constante e igual 800 unidades monetárias para todas as estações. Emprega-se um horizonte de planejamento rolante com revisões mensais do tempo de ciclo e cujos dados são mostrados na tabela 7.2. A re-configuração, tomou-se um horizonte com duração de três meses, analogamente ao que faz o departamento de engenharia industrial da empresa. Além disso, foram feitas oito revisões mensais e, em cada uma, a solução do primeiro mês do planejamento anterior foi considerada a nova solução inicial. Em todas as revisões a formulação dinâmica foi aplicada com E_{\max} e F_{\max} iguais a 0,25 e com M igual 0,75. Somente quando o problema se tornava inviável, eram feitos aumentos sucessivos de 0,05 sobre E_{\max} até que uma solução fosse encontrada. Como nas demais abordagens comparadas não há restrições de suavização da carga de trabalho, logo, pode-se dizer que a formulação DASRP-F4 estaria, a princípio, em desvantagem.

Linha	No. Tarefas	Relações de precedência direta	Tempos das tarefas	Restrições de Separação de Tarefas	Restrições de Junção de Tarefas	Custos de deslocamento das tarefas
A	27	(1,22) – (2,14) – (3,18) – (4,19) – (5,17) – (6,7) – (7,24) – (8,11) – (9,11) – (10,11) – (11,23) – (12,15) – (13,14) – (14,15) – (15,16) – (16,26) – (17,18) – (18,19) – (19,20) – (20,22) – (21,22) – (22,23) – (23,24) – (24,25) – (25,26) – (26,27)	55,3 – 5 – 15,2 – 24,9 – 26,7 – 3,1 – 4,6 – 14,9 – 9,7 – 3,2 – 5,8 – 9,4 – 25 – 3 – 14 – 16,5 – 26 – 6,5 – 17,4 – 27 – 20,3 – 15 – 12,4 – 19,7			
B	13	(1,3) – (2,4) – (3,4) – (4,5) – (5,12) – (6,7) – (7,10) – (8,9) – (9,10) – (10,12) – (11,12) – (12,13)	4,6 – 5,4 – 40,3 – 21,7 – 24,2 – 10,4 – 7,1 – 13,0 – 7,3 – 25,6 – 5,6 – 17,4 – 25,7			

Tabela 7.1 – Relações de precedência e tempos das tarefas dos dois casos reais. Fonte: autor.

PREVISÕES PARA O TEMPO DE CICLO DALINHA (8 REVISÕES PARA UM HORIZONTE DE 3 PERÍODOS)										
LINHAS	Períodos									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	85,06	79,39	66,16	-	-	-	-	-	-	-
	-	79,39	66,16	81,03	-	-	-	-	-	-
	-	-	90,22	65,10	74,66	-	-	-	-	-
	-	-	-	94,51	91,61	86,05	-	-	-	-
	-	-	-	-	82,5	80,7	59,2	-	-	-
	-	-	-	-	-	56,4	41,9	72,9	-	-
	-	-	-	-	-	-	59,1	54,5	74,2	-
	-	-	-	-	-	-	-	55,3	98,9	186,1
B	219,60	207,43	144,70	-	-	-	-	-	-	-
	-	176,11	146,17	171,67	-	-	-	-	-	-
	-	-	226,40	136,52	98,60	-	-	-	-	-
	-	-	-	125,73	98,89	91,96	-	-	-	-
	-	-	-	-	76,09	74,11	106,71	-	-	-
	-	-	-	-	-	64,58	91,05	132,69	-	-
	-	-	-	-	-	-	77,90	158,78	224,69	-
	-	-	-	-	-	-	-	73,07	138,23	219,72

Tabela 7.2 – Previsões de tempo de ciclo revistas para cada linha estudada. Fonte: autor.

O custo acumulado de re-configuração obtido com a formulação DASRP-F4 foi, então, comparado àquele gerado com o SALBP-1 e com a abordagem empregada pela empresa, que se resume em manter uma coleção de possíveis balanceamentos e aplicá-los à medida que os níveis de demanda variem. Estas comparações avaliam se o esforço pela redução do número de estações de trabalho ou se o uso de um catálogo de balanceamentos pré-definidos seriam boas práticas para gerir a capacidade da linha. Ao mesmo tempo, deseja-se validar, em um caso real, a superioridade das formulações dinâmicas em obter menores custos de re-configuração e operação. As figuras 7.1-(a) e (b) mostram as comparações do custo acumulado de re-configuração da linha A através do DASRP-F4 e as duas abordagens acima referidas. Como se vê, ao fim de oito meses, a diferença em relação ao custo das soluções do SALBP-1 foram pouco significativas. Este resultado se deve ao fato do sistema em estudo se basear em atividades manuais executadas com auxílio ferramentas e dispositivos simples, cuja re-alocação implica em custos muito pequenos em relação aos custos de variação do número de estações. Entretanto, como se viu na seção anterior, estes custos tendem a aumentar à medida que o sistema se torna mais intensivo em capital. Com relação ao método aplicado pela empresa, obteve-se um custo 35,7% maior. Porém, estas comparações foram feitas contra uma coleção de balanceamentos dedicada a um patamar de demanda bem superior ao que a linha enfrentou durante o horizonte analisado. Obviamente, esta diferença tender a cair se configurações de linha mais “enxutas” estiverem disponíveis.

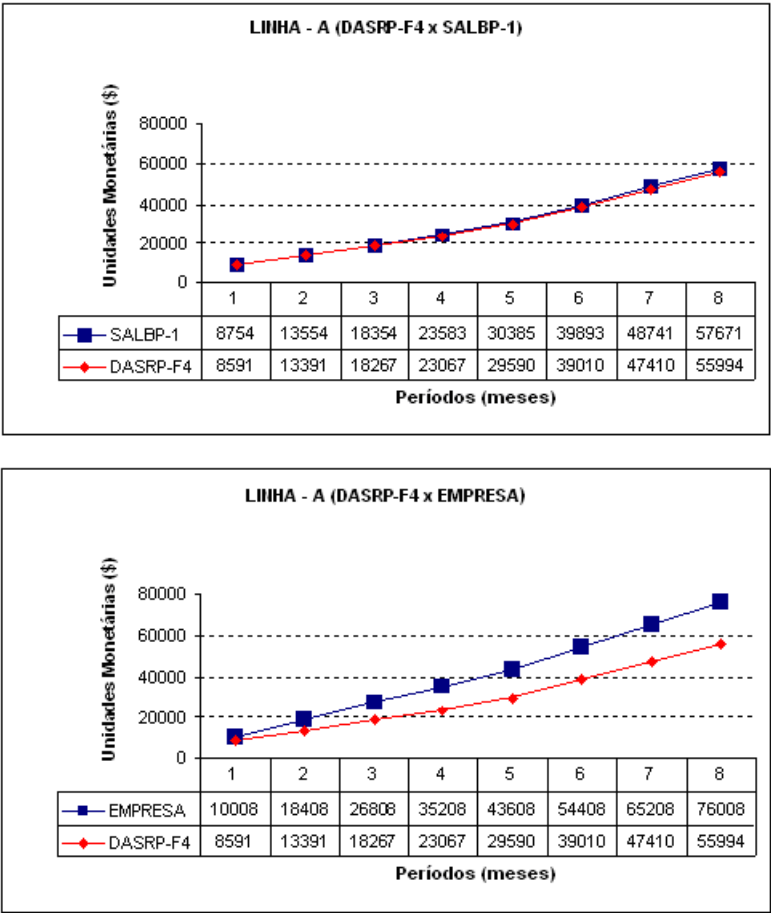


Figura 7.1 – Comparação do custo acumulado de re-configuração pelo DASRP-F4 com abordagem empregada pela empresa na linha A. Fonte: autor.

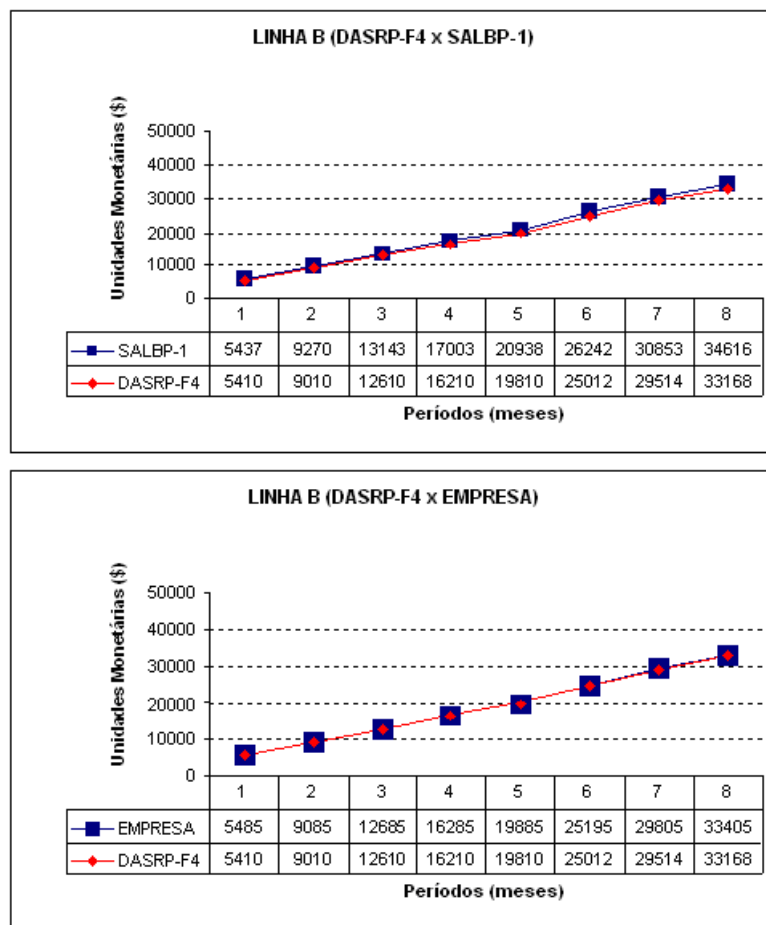


Figura 7.2 – Comparação do custo acumulado de re-configuração pelo DASRP-F4 com abordagem empregada pela empresa na linha B. Fonte: autor.

Para medir a interferência das restrições de ocupação mínima e máxima sobre o custo total, aplicou-se novamente o DASRP-F4 com $F_{\max} = 0,749$. Na figura 7.3 apresenta-se a evolução do custo total quando estas restrições não estão presentes. Neste caso, em particular, a diferença de custo foi praticamente desprezível, justificando a implementação da solução “suavizada”.

Na linha B, o custo acumulado de re-configuração da abordagem aplica pela empresa foi inferior ao obtido com o SALBP-1 e superior àquele com o DASRP-F4. Logo, pode-se dizer que as três abordagens foram praticamente equivalentes, resultado que pode ser atribuído à existência de uma coleção de balanceamentos viáveis mais apropriada aos níveis de demanda da linha. Além disso, as restrições de junção e separação de tarefas, assim como a existência de um número mínimo de estações, reduzem o espaço de soluções viáveis.

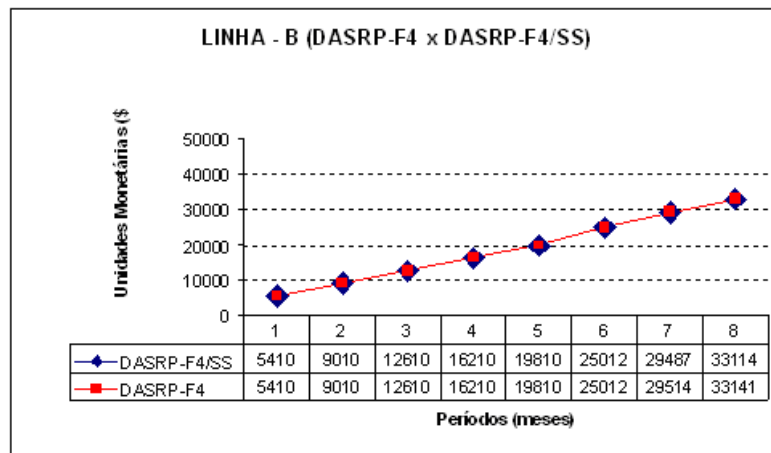


Figura 7.3 - Comparação do custo acumulado de re-configuração pelo DASRP-F4 com abordagem empregada pela empresa na linha B, . Fonte: autor.

8. Conclusões

Com os resultados apresentados, validou-se a importância do ASRP – e do DASRP – como uma nova classe de problemas de sistemas de montagem que se situa entre os extremos de uma linha serial mono-produto e abordagens mais flexíveis como aquelas que envolvem a produção de mais de um produto na mesma linha ou a adoção de leiautes alternativos, como em forma de “U”. A principal vantagem desta abordagem é conciliar os benefícios de uma linha dedicada com a possibilidade de ajustar a sua capacidade à medida que os níveis de demanda variam. Desta forma, pode-se minimizar os custos acumulados com a operação e a re-configuração da linha de montagem. O problema se diferencia dos demais problemas de balanceamento e projeto de sistemas de montagem descritos na literatura, pois considera a existência de custos de re-alocação de tarefas e de variação do número de estações. Além disso, incorporam-se limites de ocupação mínima e máxima sobre as estações ao invés de tratar a suavização da carga posteriormente. Como se viu, esta alternativa concilia o interesse de suavização da carga com seu impacto sobre o custo total de re-configuração.

As formulações propostas se mostraram computacionalmente adequadas para instâncias de tamanho moderado, com aproximadamente trinta tarefas de montagem e três períodos de planejamento. Todavia, maiores esforços no desenvolvimento de métodos especializados, de outros limites inferiores e outras regras de redução e de dominância seriam justificáveis, pois existem de sistemas que operam com um número superior de tarefas. Obviamente, ampliar o horizonte de planejamento é desejável, porém menos relevante devido ao aumento das incertezas que ele acarretaria.

O estudo de caso e os demais exemplos validaram a superioridade das formulações do ASRP e do DASRP quanto ao objetivo de minimização do custo acumulado com operação e re-configuração. Os resultados sinalizaram ainda que as diferenças de custos em relação ao SALBP-1 e à abordagem da empresa são maiores à medida que o sistema se torna mais intensivo em capital, implicando em maiores custos de re-alocação de tarefas. O uso de uma coleção de balanceamentos – abordagem aplicada pelo departamento de engenharia industrial da empresa – parece adequado para gerir a capacidade das linhas de montagem estudadas, desde que existam vários balanceamentos viáveis em torno do padrão de demanda observado. O estudo foi feito a partir de revisões mensais da previsão, em virtude da falta de dados históricos sobre a demanda. Contudo, seria interessante realizar a mesma análise com períodos de maior duração – de um ou dois meses, pelo menos. Esta alteração,

que, em princípio, não traz impactos computacionais, aproximaria o estudo de valores mais realísticos à capacidade de reação dos sistemas de manufaturas. Mesmo assim, as comparações foram bem sucedidas em seu propósito central de mostrar a redução de custos e a suavização da carga de trabalho com a re-configuração e operação de linha de montagem através das abordagens propostas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aase, G. R., Olson, J. R. & Schniederjans, M. J. (2004). U-shaped assembly line layouts and their impact on labor productivity: An experimental study. *European Journal of Operational Research*, 156, 698–711.
- Askin, R. G., Standridge, C. R. (1993). *Modeling and analysis of manufacturing systems*. Wiley, New York.
- Bautista, J. & Pereira, J. (2006). Ant algorithms for a time and space constrained assembly line balancing problem. *European Journal of Operational Research*, in press.
- Bayards, I. (1986). A survey on exact algorithms for the simple assembly line balancing problem. *Management Science*, 32, 909-932.
- Becker, C. & Scholl, A. (2006). A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 168, 694–715.
- Bukchin, J & Tzur, M. (2000). Design of flexible assembly line to minimize equipment cost. *IIE Transactions*, 32, 585-593.
- Bukchin, Y. & Rabinowitch, I. (2005). A branch-and-bound based solution approach for the mixed-model assembly line-balancing problem for minimizing stations and task duplication costs. *European Journal of Operational Research*, in press.
- Corominas, A., Pastor, R. & Plans, J. (2006) Balancing assembly line with skilled and unskilled workers. *The International Journal of Management Science*, in press.
- Fernandes, F. C. F. & Dalalio, A. G. (2000). Balanceamento e Rebalanceamento de linhas montagem operadas por grupos de trabalho autogeridos. *Gestão e Produção*, 7, 378-398.
- Fleszar, K. & Hindi, K. S. (2003). An enumerative heuristic and reduction methods for the assembly line balancing problem. *European Journal of Operational Research*, 145, 606–620.
- Gadidov, R. & Wilhelm, W. E. (1999). A cutting plane approach for the single-product assembly system design problem. Working paper. Department of Industrial Engineering. Texas, A&M University.
- Gökçen, H. & Ağpak, K. (2006). A goal programming approach to simple U-line balancing problem. *European Journal of Operational Research*, 171, 577–585.
- Gökçen, H. & Erel, E. (1998). Binary integer formulation for mixed-model assembly line balancing problem. *Computers and Industrial Engineering*, 34, 451-461.
- Gonçalves, J. F. & Almeida, J. R. (2002). A hybrid genetic algorithm for assembly line balancing. *Journal of Heuristics*, 8, 629-642.

Hackman, S. T., Magazine, M. J. & Wee, T. S. (1989). Fast, Effective Algorithms for Simple Assembly Line Balancing Problems. *Operations Research*, 37, 916-924.

Karabati, S., Sayin, S. (2003). Assembly line balancing in a mixed-model sequencing environment with synchronous transfers. *European Journal of Operational Research*, 149, 417-429.

Kim, Y. K., Kim, Y. J. & Kim, Y (1996). Genetic algorithms for assembly line balancing with various objectives. *Computers and Industrial Engineering*, 30, 397-409.

Klein, R. & Scholl, A. (1996). Maximizing the production rate in simple assembly line balancing – a branch-and-bound procedure. *European Journal of Operational Research*, 91, 367-385.

Lapierre, S. D., Ruiz, A. & Soriano, P. (2006). Balancing assembly lines with tabu search. *European Journal of Operational Research* 168 (2006) 826-837.

Levitin, G., Rubinovitz, J. & Shnits, B. (2006). A genetic algorithm for robotic assembly line balancing. *European Journal of Operational Research* 168 (2006) 811-825.

Miltenburg, J. (2006). Optimally balancing Large Assembly Lines: Updating Johnson's 1988 Fable algorithm. *INFOR*, 44, 23-42.

McMullen, P. R. & Frazier, G. V. (1997). A heuristic for solving mixed-model line balancing problems with stochastic task durations and parallel stations. *International Journal of Production Economics*, 51, 177-190.

Nakade, K. & Ohno, K. (1999). An optimal worker allocation problem for a U-shaped production line. *International Journal of Production Economics*, 60, 353-358.

Peeters, M. & Degraeve, Z. (2006). A linear programming based lower bound for the simple assembly line balancing problem. *European Journal of Operational Research*, 168, 716-731.

Pinnoi, A. & Wilhelm, W. E. (1995). A branch and cut approach for workload smoothing on assembly lines. Working paper. Department of Industrial Engineering. Texas, A&M University.

Pinnoi, A. & Wilhelm, W. E. (1998). Assembly System Design: A branch-and-cut approach. *Management Science*, 44, 1, 103-118.

Pinnoi, A., Wilhelm, W. E. (2000). Valid Inequalities for a class of assembly system problems. *European Journal of Operational Research*, 126, 31-50.

Rekiek, B., Doigui, A., Delchambre, A. & Bratcu, A. (2002). State of art of optimization methods for assembly line design. *Annual Reviews In Control*, 26, 163-174.

Rubinovitz, J. & Levitin (1995). Genetic algorithm for assembly line balancing. *International Journal of Production Economics*, 41, 343-354.

Sawik, T. (1995). Integer Programming Models for the Design a Balancing of Flexible Assembly Systems. *Mathematical Computer Modeling*, 12, 1-12.

Scholl, A. & Becker, C., 2006. State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 168, 666-693.

Scholl, A. & Becker, C. (2006). A note on “An exact method for cost-oriented assembly line balancing”. *International Journal of Production Economics*, 97, 343–352.

Scholl, A. & Klein, R. (1999). Balancing assembly lines effectively – a computational comparison. *European Journal of Operational Research*, 114, 50-58.

Simaria, A. S. & Vilarinho, P.M. (2004). A genetic algorithm based approach to the mixed-model assembly line balancing problem of type II. *Computers & Industrial Engineering*, 47 (2004) 391–407.

Talbot, F. B., Patterson, J. H., Gerhlein, W. V. (1986). A comparative evaluation heuristic for line balancing techniques. *Management Science*, 32, 430-454.

Uğurdağ, H. F., RachamadugU, R. & Papachristou, C. A. (1999). Designing paced assembly lines with fixed number of stations. *European Journal of Operational Research*, 114, 50-58.

Urban, T. L. (1998). Note. Optimal balancing of U-shaped assembly lines. *Management Science*, 44, 738-711.

Van Hop, N (2006) A heuristic solution for fuzzy mixed-model line balancing problem. *European Journal of Operational Research* 168 (2006) 798–810.