Análise da eficiência de linhas de produção com trabalhadores deficientes

Alysson M. Costa[1], Lana Mara R Santos [2], Mayron César de O. Moreira[1], Cristóbal Miralles[3]

[1] *Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo*

[2] *Departamento de Matemática, Universidade Federal de Viçosa*

[3] *ROGLE - Dpto. Organización de Empresas, Universidad Politécnica de Valencia*

alysson@icmc.usp.br, lanamara@ufv.br, mayron@icmc.usp.br, cmiralles@omp.upv.es

Resumo

Portadores de deficiências encontram enormes dificuldades em participar ativamente do mercado de trabalho. Embora as causas sejam complexas e multi-facetadas, é seguro afirmar que desinformação e preconceito são fatores de peso nessa indesejada situação. Este trabalho atua no sentido de mostrar que é infundada a crença de que pessoas com deficiências são incapazes de colaborar eficientemente no processo produtivo. De fato, nossos resultados sugerem que, com uma boa programação da linha de montagem, os desempenhos de linhas com ou sem trabalhadores deficientes são virtualmente os mesmos. Isto leva à questão da obtenção de boas programações. Neste trabalho, propomos uma formulação matemática específica para o caso em que há um trabalhador deficiente na linha de montagem. Resultados computacionais mostram a eficiência desta nova formulação.

Palavras-chave: Programação matemática, linhas de produção, trabalhadores deficientes.

Abstract

People with disabilities are usually excluded from the work market. Although the reasons for this fact are various, it is clear that prejudice plays an important role in this undesired phenomenon. This articles tries to contribute in this matter by showing that the idea that disabled workers cannot appropriately contribute in the productive processes is false. Indeed, our results show that, with a good assembly line programming, the performances of lines with and without disabled workers are virtually the same. This leads to the question of obtaining good programmings. In this article, we propose a mathematical model that is specific for the case where the assembly line has a single disabled worker. Computational results show the efficacy of this new formulation.

Keywords: Mathematical programming, assembly lines, disabled workers.

1 Introdução

No Brasil, a porcentagem de pessoas deficientes em idade ativa que participam efetivamente do mercado de trabalho é extremamente baixa. De fato, um estudo da Secretaria do Trabalho do município de São Paulo indica que apenas 10% dos trabalhadores com deficiência executavam algum tipo de atividade produtiva nesta municipalidade no ano de 2004 (SERPRO 2004). As razões para esta triste estatística são complexas e envolvem certamente preconceito e desinformação. Barnes (1991) menciona que "assim como o racismo, o sexismo, o heterossexismo e outras formas de preconceito, a discriminação contra pessoas com deficiências é institucionalizada na própria essência da sociedade". Ainda que Barnes se referisse especificamente à sociedade britânica e ainda que já se tenham passado quase duas décadas desde a publicação do seu livro, não nos parece estranho aplicar o seu comentário ao caso vivido no Brasil, atualmente. Infelizmente, é nisso que somos levados a crer quando comparamos as taxas de empregabilidade para pessoas deficientes da sociedade à qual o autor se refere (cerca de 87%, segundo a OMS) com as porcentagens mencionadas anteriormente para o caso da cidade de São Paulo. Neste contexto, acreditamos que toda ação que venha combater o preconceito contra esta parcela significativa da população mundial (mais de 600 milhões de pessoas, ainda segundo a OMS, sendo que destes, cerca de 25 milhões se encontram no Brasil) é válida. Tal combate é a motivação principal deste trabalho.

Nós nos interessamos em particular pela participação de pessoas com deficiências em linhas de produção. Este interesse é justificado pelo fato de ser em atividades de produção que parece se concentrar a maior parte dos empregos para esta classe de trabalhadores. De fato, em estudo realizado na cidade de São Carlos, Simonelli et al. (2006) listaram a seguinte distribuição das vagas para trabalhadores deficientes: produção (88%), tarefas administrativas (6%), serviços gerais (5%) e outras tarefas exigindo nível técnico (1%).

Neste trabalho, mostramos como um bom planejamento das linhas de produção pode ajudar na integração de trabalhadores com deficiências. Em particular, nos interessamos pelo caso em que estes trabalhadores participam de linhas de produção em fábricas convencionais, e não em centros especiais de trabalho para deficientes, foco dos estudos da literatura (Miralles et al. 2005, Miralles et al. 2007, Chaves et al. 2007, Miralles et al. 2008, Costa & Miralles 2009). Tal interesse se dá pelo fato de nos parecer que é a inclusão do trabalhador deficiente no mercado de trabalho *convencional*, e não em centros especiais, o objetivo último de toda atividade que vise integrar completamente estes cidadãos. Esta linha de pesquisa é motivada ainda pelo fato dos nossos resultados sugerirem que, com um bom planejamento, linhas de produção com um único trabalhador deficiente são virtualmente tão eficientes quanto linhas de produção sem a presença destes trabalhadores.

O restante deste documento está organizado da seguinte maneira: na próxima seção, apresentamos um breve resumo da literatura existente em alocação de trabalhadores com deficiências em linhas de produção. Em seguida, na Seção 3, apresentamos o modelo proposto por Miralles et. al (2007) e propomos uma nova formulação matemática para o caso em que só há um trabalhador com deficiência na linha. Na Seção 4, os resultados de testes computacionais com ambas formulações são listados e discutidos. Uma breve conclusão encerra este artigo na seção 5. Este trabalho é uma versão estendida de um resumo submetido à XIV Escuela Latinoamericana de Verano de Investigación de Opera-

ciones (Moreira et al. 2009).

2 Revisão bibliográfica

O estudo da alocação de trabalhadores com deficiências em linhas de produção é recente na literatura e começou com os trabalhos de Miralles et al. (2007, 2008), onde os autores introduziram o problema e o nomearam Problema de Balanceamento de Linhas de Produção e Designação de Trabalhadores (ALWABP, do inglês *Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem*). Nestes artigos, foram realçadas as diferenças entre o ALWABP e o problema clássico de balanceamento de linhas de produção: no caso do ALWABP, cada trabalhador executa uma tarefa com uma velocidade distinta, diferentemente do caso clássico conhecido como Problema Simples de Balanceamento de Linhas de Produção (SALBP, do inglês *Simple Assembly Line Balancing Problem*), onde os trabalhadores podem ser considerados *iguais*. Os autores propõem uma formulação matemática para o problema e um estudo de caso (Miralles et al. 2007), além de um algoritmo de branch-and-bound (Miralles et al. 2008). Chaves et al. (2008) resolvem o mesmo problema com auxílio de uma heurística por agrupamentos (Clustering Search). Recentemente, propusemos um algoritmo de busca tabu que apresentou bons resultados para o mesmo problema (Moreira & Costa 2009).

Extensões do ALWABP visando atender certas características particulares de contextos práticos ou estudar problemas adjacentes também já foram propostas na literatura. Miralles et al. (2005) consideram a situação em que as linhas de produção podem assumir a forma de U. Esta maior flexibilidade na configuração da linha pode acarretar em uma melhor distribuição de tarefas e trabalhadores às máquinas. Costa & Miralles (2009), por sua vez, consideram o problema de rotação de tarefas no contexto de linhas de produção em centros para trabalhadores deficientes. O artigo se baseia na idéia de que forçar os trabalhadores a executar o maior número possível de tarefas pode servir como atividade educacional e terapêutica. Os autores mencionam que o fim último dos centros para trabalhadores deficientes é preparar o trabalhador para o mercado convencional de trabalho e, por esse motivo, a rotação de tarefas assume uma importância fundamental.

Assim como o trabalho de Costa & Miralles (2009), todos os artigos mencionados consideram o caso em que há apenas trabalhadores deficientes na linha de produção. Neste trabalho, nos interessamos pela situação em que há apenas um trabalhador com deficiências na linha, ou seja, o caso que ocorre quando, em uma fábrica convencional, um trabalhador com deficiências é empregado. Acreditamos que o estudo desta situação é particularmente importante quando se imagina que o objetivo último desta área de pesquisa é integrar o trabalhador deficiente a linhas de produção convencionais de maneira transparente. Adicionalmente, tal estudo se torna interessante quando os resultados sugerem que a presença de um único trabalhador deficiente na linha influi muito pouco na eficiência desta.

3 Formulações Matemáticas

Um modelo matemático linear inteiro misto para o problema foi proposto por Miralles et al. (2007). Uma versão adaptada deste modelo é reproduzida abaixo:

$$\text{Min } C \tag{1}$$

subject to

$$\sum_{w \in W} \sum_{s \in S} x_{swi} = 1, \qquad \forall i \in N, \tag{2}$$

$$\sum_{s \in S} y_{sw} = 1 \qquad \forall w \in W, \tag{3}$$

$$\sum_{w \in W} y_{sw} = 1 \qquad \forall s \in S, \tag{4}$$

$$\sum_{w \in W} \sum_{s \in S} s \cdot x_{swi} \leq \sum_{w \in W} \sum_{s \in S} s \cdot x_{swj} \qquad \forall j \in N, i \in D_j, \tag{5}$$

$$\sum_{w \in W} \sum_{i \in N} p_{wi} \cdot x_{swi} \leq C \qquad \forall s \in S, \tag{6}$$

$$\sum_{i \in N} x_{swi} \leq M y_{sw} \qquad \forall w \in W, \forall s \in S, \tag{7}$$

$$y_{sw} \in \{0, 1\} \qquad \forall s \in S, \forall w \in W, \tag{8}$$

$$x_{swi} \in \{0, 1\} \qquad \forall s \in S, \forall w \in W, \forall i \in N. \tag{9}$$

Onde,

- i,j índices para tarefas,
- w índice para trabalhadores,
- s índice para estações de trabalho,
- N conjunto das tarefas,
- W conjunto dos trabalhadores,
- S conjunto dos estações de trabalho,
- A designações *a priori* de tarefas a trabalhadores,
- Z designações *a priori* de estações de trabalho a trabalhadores,
- C tempo de ciclo,
- m número de estações de trabalho,
- p_{wi} tempo de processamento da tarefa i quando executada pelo trabalhador w,
- D_j conjunto de tarefas imediatamente precedentes à tarefa j no grafo de precedência,
- x_{swi} variável binária. Igual a 1 apenas se a tarefa i é alocada ao trabahador w na estação de trabalho s,
- y_{sw} variável binária. Igual a 1 apenas se o trabalhador w é alocado à estação s,
- M constante tal que $M > |N|$.

O objetivo da formulação (1)-(9) é a minimização do tempo de ciclo, i.e., o maior dos tempos gastos em uma máquina. As restrições (2) garantem que cada tarefa é executada, enquanto (3) e (4) asseguram que cada trabalhador é alocado a uma única máquina e que cada máquina recebe um único trabalhador, respectivamente. As restrições (5) garantem que as precedências de execução entre as tarefas são respeitadas. Finalmente, as restrições (6) associam à variável C a medida do tempo de ciclo. O conjunto destas restrições é uma versão agregada (e mais forte) das restrições apresentadas por Miralles et al. (2007). Finalmente, as restrições (7) garantem que uma tarefa só é executada por um trabalhador w em uma máquina s caso este trabalhador realmente esteja alocado a esta máquina. Nestas restrições, usamos um valor de limitante M mais apertado que o original proposto por Miralles et al. (2007).

A formulação (1)-(9) foi desenvolvida para o caso em que se deseja alocar trabalhadores deficientes em um centro especial de trabalho. Ou seja, cada trabalhador $w \in W$ considerado é, *a priori*, um trabalhador com deficiências. Obviamente, a formulação (1)-(9) pode ser utilizada para o caso proposto neste artigo, em que só há um trabalhador com deficiências na linha. Para isso, basta utilizar-se parâmetros p_{wi} apropriados: quando o trabalhador w não apresentar deficiências, ele executará cada tarefa com o tempo-base (relativo à execução da tarefa por um trabalhador convencional ou por um trabalhador deficiente cuja deficiência em nada atrapalhe a execução daquela tarefa em particular). Note, entretanto, que este procedimento torna a formulação (1)-(9) redundante em muitos aspectos. De fato, $|W|-1$ trabalhadores (todos, a exceção do trabalhador com deficiências) possuem tempos de execução de tarefas iguais e, portanto, soluções equivalentes podem ser obtidas trocando-se a posição de dois ou mais destes trabalhadores. Com o fim de eliminar estas simetrias, propomos, neste trabalho, uma formulação específica para o caso em que apenas um trabalhador com deficiência é alocado na linha de produção. Esta formulação é apresentada abaixo:

$$\text{Min } C \tag{10}$$

subject to

$$\sum_{s \in S} x_{si} = 1, \qquad \forall i \in N, \tag{11}$$

$$\sum_{s \in S} y_s = 1, \tag{12}$$

$$\sum_{s \in S} s \cdot x_{si} \leq \sum_{s \in S} s \cdot x_{sj}, \qquad \forall j \in N, i \in D_j, \tag{13}$$

$$\sum_{i \in N} t_i \cdot x_{si} \leq C, \qquad \forall s \in S, \tag{14}$$

$$\sum_{i \in N} (t_i + a_i) \cdot x_{si} \leq C + L(1 - y_s) \qquad \forall s \in S, \tag{15}$$

$$y_s \in \{0, 1\} \qquad \forall s \in S, \tag{16}$$

$$x_{si} \in \{0, 1\} \qquad \forall s \in S, \forall i \in N. \tag{17}$$

Onde, além dos parâmetros definidos anteriormente, temos:

t_i tempo que um trabalhador sem deficiências demora para executar a tarefa i.,

a_i tempo adicional que o trabalhador com deficiência demora para executar a tarefa i.,

L valor suficientemente grande,

y_s variável binária. Igual a 1 se o trabalhador com deficiências é alocado à máquina s, e igual a 0 caso contrário,

x_{si} variável binária. Igual a 1 se a tarefa i é alocada à máquina s, e igual a 0 caso contrário,

Nesta nova formulação ainda minimiza-se o tempo de ciclo. As restrições (11) garantem que todas as tarefas são executadas enquanto (12) asseguram que o trabalhador com deficiências é alocado a uma das máquinas. As restrições (13) garantem que a solução respeita as precedências de execução de tarefas. O tempo de ciclo é determinado pelas restrições (14) e (15). Todas as máquinas respeitam o tempo de ciclo quando se considera que as tarefas são executadas por um trabalhador sem deficiências, conforme determinado por (14). Além disso, para a máquina onde o trabalhador com deficiências é alocado, o tempo de ciclo deve ser respeitado considerando-se os tempos de execução de tarefas quando realizadas por este trabalhador. O parâmetro L deve ser um valor suficientemente grande para tornar as restrições (15) redundantes para todo s cujo y_s for diferente de 1. Pode-se utilizar, por exemplo, $L = \sum_i a_i$.

O valor de L apresentado acima falha para os casos em que o trabalhador deficiente não consegue executar alguma(s) das tarefas. De fato, nesta situação, o valor de a_i seria, *a priori*, infinito, e as restrições (15) perderiam o sentido. Pode-se contornar este problema através da definição de valores mais apropriados para os parâmetros a_i associados a tarefas que não podem ser executadas pelo trabalhador deficiente. Usamos o seguinte artifício: sempre que o trabalhador com deficiências não consegue realizar a tarefa i, definimos a_i como $\overline{C}$, um limitante superior para o tempo de ciclo mínimo. Neste trabalho, usamos $\overline{C} = \sum_{i \in N} t_i$, ou seja, valor que seria obtido se um trabalhador sem deficiências executasse, sozinho, todas as tarefas.

4 Resultados e discussão

Nesta seção, apresentamos resultados computacionais para os modelos discutidos anteriormente. Nos interessamos fundamentalmente por duas questões. Por um lado, queremos analisar a influência da presença do trabalhador deficiente na linha de produção e, por outro, estudar a eficiência da nova formulação proposta. Testes computacionais foram executados utilizando-se instâncias disponíveis na literatura (Chaves et al. 2007). São quatro grupos de instâncias chamados de Roszieg (4 ou 6 trabalhadores, 25 tarefas), Heskia (4 ou 7 trabalhadores, 28 tarefas), Wee-mag (10 ou 17 trabalhadores, 70 tarefas) e Tonge (11 ou 19 trabalhadores, 75 tarefas) que foram baseadas em instâncias clássicas de Hoffmann (1990) para o SALBP.

As instâncias de Chaves et al. (2007) consideram o caso de centros de trabalhadores deficientes e, neste trabalho, foram modificadas para a situação em que apenas um trabalhador apresenta deficiências (os outros executam cada tarefa no menor dos tempos disponíveis). As Tabelas 1-4 compilam os resultados obtidos no tocante à questão da perda de eficiência devido à presença de um trabalhador

deficiente. Para cada grupo de instâncias, as tabelas mostram a média do tempo de ciclo para o caso em que havia um trabalhador deficiente na linha de produção (coluna Média ALWABP) e para o caso em que não havia trabalhadores deficientes (coluna Média SALBP – os resultados desta coluna foram obtidos resolvendo-se o problema SALBP para as instâncias de Chaves et al. (2007) onde o tempo de execução de cada tarefa foi definido como o menor tempo de execução da tarefa na instância original).

Família	Grupo	Média SALBP	Média ALWABP	Perda de eficiência
Roszieg	1	12,30	12,85	4,47%
Roszieg	2	13,50	14,13	4,63%
Roszieg	3	18,30	18,93	3,42%
Roszieg	4	18,20	18,88	3,71%
Roszieg	5	6,30	6,40	1,59%
Roszieg	6	7,20	7,28	1,16%
Roszieg	7	10,00	10,20	2,00%
Roszieg	8	9,10	9,27	1,83%
Média		**11,86**	**12,24**	**2,85%**

Tabela 1: Família Roszieg: perda de eficiência devido ao trabalhador deficiente

Família	Grupo	Média SALBP	Média ALWABP	Perda de eficiência
Heskia	1	76,20	78,13	2,53%
Heskia	2	88,10	90,45	2,67%
Heskia	3	132,10	135,35	2,46%
Heskia	4	133,40	136,40	2,25%
Heskia	5	26,20	26,47	1,04%
Heskia	6	32,20	32,41	0,67%
Heskia	7	65,20	65,29	0,13%
Heskia	8	55,00	55,23	0,42%
Média		**76,05**	**77,47**	**1,52%**

Tabela 2: Família Heskia: perda de eficiência devido ao trabalhador deficiente

Os resultados indicam que que a inclusão de um trabalhador deficiente afetou muito pouco a qualidade da solução (menos de 1,4%, em média, de perda na eficiência da linha). Esta perda de eficiência é ainda menos significativa para as instâncias maiores, onde os valores de aumento médio atingiram 0,59% (Wee-mag) e 0,50% (Tonge). Esses resultados são explicados pelo fato de, com mais trabalhadores na linha, a tarefa de alocação se torna mais flexível e é possível alocar ao trabalhador deficiente um conjunto de tarefas para as quais ele é tão eficaz quanto um outro trabalhador qualquer. De fato, as tabelas 3 e 4 mostram que para diversos grupos de problemas, não houve perda alguma ao se incluir o trabalhador deficiente.

Acreditamos que estes resultados, embora facilmente compreensíveis de um ponto de vista lógico e matemático, vão contra o senso comum que tende a enxergar o deficiente como um estorvo para a sociedade - e não alguém capaz de trabalhar e produzir eficientemente. Por este motivo, esperamos que este tipo de análise possa contribuir para o combate ao preconceito contra cidadãos portadores de deficiência.

Família	Grupo	Média SALBP	Média ALWABP	Perda de eficiência
Wee-mag	1	16,20	16,20	0,00%
Wee-mag	2	19,20	19,45	1,30%
Wee-mag	3	27,80	28,05	0,90%
Wee-mag	4	25,90	26,10	0,77%
Wee-mag	5	6,70	6,70	0,00%
Wee-mag	6	8,00	8,00	0,00%
Wee-mag	7	11,70	11,90	1,71%
Wee-mag	8	12,80	12,80	0,00%
Média		**16,04**	**16,15**	**0,59%**

Tabela 3: Família Wee-mag: perda de eficiência devido ao trabalhador deficiente

Família	Grupo	Média SALBP	Média ALWABP	Perda de eficiência
Tonge	1	48,20	48,60	0,83%
Tonge	2	50,60	50,90	0,59%
Tonge	3	71,10	71,70	0,84%
Tonge	4	77,60	78,40	1,03%
Tonge	5	18,30	18,30	0,00%
Tonge	6	27,10	27,10	0,00%
Tonge	7	45,50	45,50	0,00%
Tonge	8	36,70	36,95	0,68%
Média		**46,89**	**47,18**	**0,50%**

Tabela 4: Família Tonge: perda de eficiência devido ao trabalhador deficiente

No tocante ao funcionamento e eficiência da nova formulação proposta, (10)-(17), as mesmas instâncias mencionadas anteriormente foram utilizadas. Nestes novos testes, nos interessamos pelo tempo necessário pelo método de resolução (no caso o *branch-and-cut* do pacote comercial IBM ILOG CPLEX, versão 11.2, com parâmetros *default*, executado em processador com 2.33 GHz e 4 GB de memória RAM) para obtenção das soluções. Por fins práticos, o tempo de execução de cada instância foi limitado em 1800 segundos e, portanto, medimos também a porcentagem de instâncias resolvidas com cada uma das formulações. Os resultados são compilados na Tabela 3 onde, para cada uma das formulações, apresentam-se a porcentagem de instâncias resolvidas no tempo limite e os tempos médios de resolução para as quatro famílias de instâncias.

Família	Formulação de Miralles et al.		Formulação proposta, (10)-(17)	
	% resolvidas	tempo (s)	% resolvidas	tempo (s)
Roszieg	**100%**	14,70	**100%**	**0,09**
Heskia	**100%**	46,50	**100%**	**0,41**
Wee-mag	65,63%	241,02	**88,75%**	**0,60**
Tonge	54,38%	412,94	**83,75%**	**55,56**

Tabela 5: Porcentagens de instâncias resolvidas e tempos computacionais obtidos pelas duas formulações

Os resultados da Tabela 5 evidenciam a eficiência da nova formulação. De maneira geral, ela resolveu uma quantidade significativamente maior de problemas no tempo limite, em uma pequena fração do tempo utilizado quando a formulação resolvida foi a original de Miralles et al. (2007). Como forma de melhor avaliar a performance obtida com a nova formulação, usamos as curvas de desempenho propostas por Dolan & Moré (2002). A idéia das curvas de desempenho é apresentar, de maneira compacta e visual, uma comparação rápida da eficiência de métodos computacionais. No nosso caso, usamos o tempo gasto por cada método como parâmetro de comparação. Assuma que se deseja comparar $m \in M$ métodos em $p \in P$ problemas. Seja ainda $t_m(p)$ o tempo necessário pelo método m para resolver o problema p. Dolan & Moré (2002) definem a performance do método m no problema p como:

$$r_{p,m} = \frac{t_m(p)}{min\{t_\delta(p) : \delta \in M\}} \tag{18}$$

O perfil de desempenho do método é dado pela função:

$$\phi_m(\theta) = \frac{1}{|P|} \times \text{ número de problemas } p \in P \text{ tais que } r_{p,m} \leq \theta, \tag{19}$$

ou seja, para cada valor de θ, mede-se a porcentagem de problemas em que o método m é no máximo θ vezes menos eficiente que o método mais rápido. Traçando um gráfico para diversos valores de θ temos as curvas de desempenho. Abaixo, essas curvas são traçadas para o *branch-and-cut* do CPLEX quando a formulação original ou a nova formulação proposta são usadas, para cada uma das famílias de instâncias. Nas curvas, usamos uma escala logarítmica para θ. Assim, o eixo x apresenta $\tau = log_2(\theta)$ enquanto o eixo y representa os valores de $\phi_m(\theta)$.

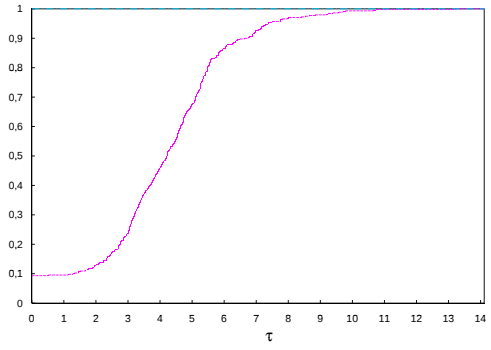


Figura 1: Curva de desempenho para família Roszieg

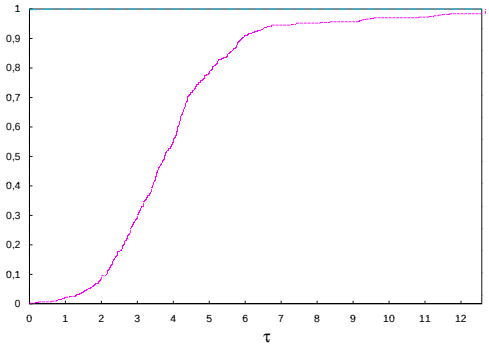


Figura 2: Curva de desempenho para família Heskia

Em todas as figuras, a linha pontilhada representa a curva de desempenho obtida para a formulação proposta, enquanto a linha cheia a curva de desempenho para a formulação original de Miralles et al. (2007). Tomando, por exemplo, a figura 3, a análise das curvas de desempenho pode ser feita brevemente da seguinte forma: observa-se que a curva de desempenho da formulação proposta inicia-se em 88,75%. Este valor equivale a quantidade de problemas em que ela obteve a melhor performance. A curva termina (para τ muito grande) em 88,75%. Este valor equivale à porcentagem de problemas resolvidos. Isso indica que sempre que foi possível resolver o problema com a nova formulação, isto foi feito de maneira mais rápida que resolvendo-se o problema com a formulação original. Por outro

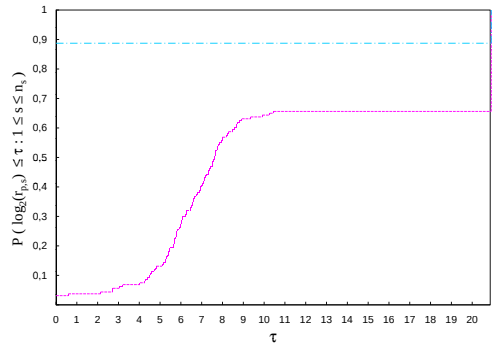


Figura 3: Curva de desempenho para família Wee-mag

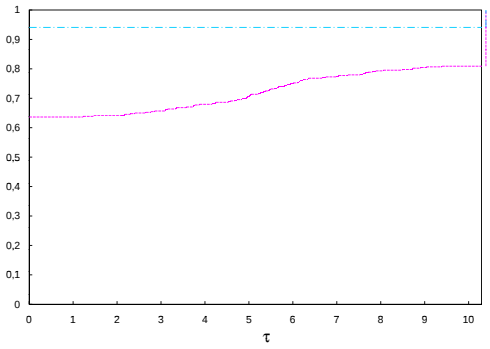


Figura 4: Curva de desempenho para família Tonge

lado, olhando-se a curva da formulação original, observa-se que ela foi a mais rápida em menos de 5% dos problemas e resolveu apenas 65,63% destes. Olhando-se para um valor intermediário de τ, observa-se, por exemplo, que a curva da formulação original vale cerca de 0,4 para $\tau = 7$. Este resultado pode ser interpretado da seguinte forma: a formulação original consegue resolver apenas 40% dos problemas quando o tempo é limitado a $2^7 = 128$ vezes o melhor tempo obtido para o problema. Estendendo a análise para outros valores de τ e para as outras curvas, observa-se a eficiência da nova formulação proposta. Por último, observe que as linhas pontilhadas (relativas à nova formulação) nas figuras 1 e 2 coincidem com o eixo esquerdo e a linha horizontal $\phi_m(\theta) = 1$, indicando que a resolução do problema com a nova formulação convergiu no tempo limite em 100% dos casos e foi sempre mais rápida que a resolução usando a formulação original de Miralles et al. (2007).

5 Conclusões

Neste trabalho, apresentamos uma nova formulação matemática para o problema de balanceamento de linhas de produção na presença de apenas um trabalhador com deficiências. Esta formulação apresentou resultados muito bons para este caso particular, sendo resolvida com a ajuda de um pacote comercial (CPLEX 11.2) em uma pequena fração do tempo necessário para a resolução da formulação original. Neste trabalho, também analisamos a influência da presença do trabalhador deficiente na eficiência produtiva da linha. Nossos resultados sugerem que um bom planejamento da alocação de tarefas pode tornar praticamente invisíveis as deficiências do trabalhador, no sentido de que a eficiência da linha é pouco (ou nada) modificada em comparação ao caso sem trabalhadores deficientes. Esperamos que tais resultados possam contribuir para a diminuição do preconceito e desinformação no tocante a esta questão e contribuir para aumentar a participação do deficiente no mercado de trabalho.

6 Agradecimentos

Este trabalho foi desenvolvido com apoio financeiro do CNPq, através do edital Jovens Pesquisadores 06/2008.

Referências

Barnes, C. (1991). *Disabled People in Britain and Discrimination*, C. Hurst & Co. Publishers.

Chaves, A. A., Miralles, C. & Lorena, L. A. N. (2007). Clustering search approach for the assembly line worker assignment and balancing problem, *Proceedings of the 37th International Conference on Computers and Industrial Engineering*, Alexandria, Egypt, pp. 1469 – 1478.

Chaves, A. A., Miralles, C. & Lorena, L. A. N. (2008). Uma metaheurística híbrida aplicada ao problema de balanceamento e designação de trabalhadores em linhas de produção, *Anais do XL SBPO*, João Pessoa, pp. 1479–1490.

Costa, A. M. & Miralles, C. (2009). Job rotation in assembly lines employing disabled workers, *International Journal of Production Economics* (forthcoming) .

Dolan, E. D. & Moré, J. J. (2002). Benchmarking optimization software with performance profiles, *Mathematical Programming* **91**: 201–213.

Hoffmann, T. (1990). Assembly line balancing: a set of challenging problems, *International Journal of Production Research* **28**: 1807–1815.

Miralles, C., Garcia-Sabater, J. P. & Andrés, C. (2005). Application of U-lines principles to the assembly line worker assignment and balancing problem (UALWABP). A model and a solving procedure, *Proceedings of the Operational Research Peripatetic Postgraduate Programme International Conference (ORP3)*, Valencia, Spain.

Miralles, C., Garcia-Sabater, J. P., Andrés, C. & Cardos, M. (2007). Advantages of assembly lines in sheltered work centres for disabled. A case study, *International Journal of Production Economics* **110**: 187–197.

Miralles, C., Garcia-Sabater, J. P., Andrés, C. & Cardos, M. (2008). Branch and bound procedures for solving the assembly line worker assignment and balancing problem: Application to sheltered work centres for disabled, *Discrete Applied Mathematics* **156**: 352–367.

Moreira, M. C. O. & Costa, A. M. (2009). A minimalist yet efficient tabu search for balancing assembly lines with disabled workers, *Anais do XLI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*.

Moreira, M. C. O., Santos, L. M. R. & Costa, A. M. (2009). Trabalhadores com deficiência em linhas de produção: modelo, resultados e discussões, *XIV ELAVIO (Aceito)*, El Fuerte, México.

SERPRO (2004). http://www.serpro.gov.br/noticias-antigas/noticias-2004/20041221_02 (Consultado em 23 de Março de 2009).

Simonelli, A. P., da Silva Rodrigues, D. & Soares, L. (2006). Caracterização do perfil de trabalhadores afastados e de pessoas com deficiência no mercado de trabalho do municipio de são carlos., *Anais das XIV Jornadas de Jovens pesquisadores da Associação de Universidades do Grupo Montevidéu*.