Problema de balanceamento de linhas de
produção e integração de trabalhadores

Mayron César de Oliveira Moreira

SERVIÇO DE PÓS-GRADUAÇÃO DO ICMC-USP

Data de Depósito:

Assinatura: _____

Mayron César de Oliveira Moreira

Problema de balanceamento de linhas de produção e integração de trabalhadores

Tese apresentada ao Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação - ICMC-USP, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências - Ciências de Computação e Matemática Computacional. *VERSÃO REVISADA*

Área de Concentração: Ciências de Computação e Matemática Computacional

Orientador: Prof. Dr. Alysson Machado Costa

**USP – São Carlos
Julho de 2015**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Achille Bassi
e Seção Técnica de Informática, ICMC/USP,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

dp de Oliveira Moreira, Mayron César
 Problema de balanceamento de linhas de produção e
 integração de trabalhadores / Mayron César de
 Oliveira Moreira; orientador Alysson Machado Costa.
 -- São Carlos, 2015.
 123 p.

 Tese (Doutorado - Programa de Pós-Graduação em
 Ciências de Computação e Matemática Computacional) --
 Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação,
 Universidade de São Paulo, 2015.

 1. Linhas de produção. 2. Trabalhadores com
 deficiência. 3. Programação inteira-mista. 4.
 Heurísticas construtivas. I. Machado Costa, Alysson,
 orient. II. Título.

Mayron César de Oliveira Moreira

The assembly line worker integration and balancing problem

Doctoral dissertation submitted to the Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação - ICMC-USP, in partial fulfillment of the requirements for the degree of the Doctorate Program in Computer Science and Computational Mathematics. *FINAL VERSION*

Concentration Area: Computer Science and Computational Mathematics

Advisor: Prof. Dr. Alysson Machado Costa

USP – São Carlos
July 2015

A todos aqueles que acreditaram em mim ...

Agradecimentos

Esta tese foi definitivamente uma obra coletiva. A todos os autores, que contribuíram diretamente ou indiretamente com esta obra, seguem os meus mais sinceros agradecimentos.

Agradeço a Deus pela vida. Aos meus pais, Adilson e Vera, por todo apoio incondicional.

Aos meus irmãos, Amanda e Mayke, e à toda minha família mineira, avó, tios, tias, primos, primas e afilhados. Em especial, fica a minha eterna gratidão às minhas tias Naná, Adalúcia e Arleth.

À minha família de Macaubal, pelos momentos aos quais tenho o prazer de viver desde 2011.

À FAPESP e à CAPES, por todo apoio financeiro.

Aos meus orientadores, Cristóbal Miralles, Rafael Pastor, Jean-François Cordeau e Gilbert Laporte, pelo apoio científico, pela generosidade e pelo respeito.

Ao Alysson, pelas orientações, conversas, momentos descontraídos e pela amizade, a qual me orgulha tanto.

À professora Franklina, por todo apoio durante toda caminhada.

Ao meu amigo Carlos, pelo companheirismo e atenção durante minha estadia em Valência.

Aos meus amigos David, Serge, Bruno, Larissa e Gisa, por me proporcionarem momentos maravilhosos em Montréal.

Aos meus amigos Alex, Thaís, Vinícius, Maikel, Flávio, Rafa, Físico, Januario, Chris e Rafa Rossato, que me estenderam a mão em momentos tão oportunos nesses quatro anos.

Aos meus amigos do LOT, do DOE, do CIRRELT e da vilinha: obrigado por deixarem a minha rotina mais leve.

À Andreza, pelo amor, companheirismo, cumplicidade e carinho. Este momento é nosso!

Resumo

Diversas pesquisas e estudos científicos mostram que uma grande porcentagem das pessoas com deficiência é excluída do mercado de trabalho, sobretudo em países em desenvolvimento. Com o intuito de alterar essa realidade, destacam-se, entre outras medidas, a criação de Centros de Trabalho para Deficientes (CTDs). Tais organizações empregam trabalhadores com deficiência em vários setores empresariais, dando-lhes oportunidades iniciais e preparando-os para que possam, mais tarde, ser inseridos no mercado de trabalho convencional. Vários destes centros operam linhas de produção, principal objeto de estudo desta tese.

Nosso estudo é situado em uma etapa idealmente posterior aos CTDs, referente à inserção de trabalhadores com deficiência em linhas de produção convencionais. A demanda por estudos neste contexto tem crescido nos últimos anos, devido sobretudo a políticas corporativas de responsabilidade social e exigências legislativas, como a “Lei das Cotas”, presentes em diversos países.

O planejamento da operação de linhas de produção na presença de trabalhadores com deficiência envolve uma série de desafios, devido à heterogeneidade entre trabalhadores, que faz com que o tempo de execução das tarefas seja dependente de cada indivíduo. Nos deparamos, assim, com um problema de dupla alocação, em que as variáveis de decisão determinam as tarefas a serem inseridas em estações e a alocação de trabalhadores para as mesmas, de modo a otimizar alguma medida de eficiência. O balanceamento de linhas de produção convencionais com uma parcela de trabalhadores com deficiência é denominado *problema de balanceamento de linhas de produção e integração de trabalhadores* (ALWIBP, do inglês: *assembly line worker integration and balancing problem*), sendo um caso particular do *problema de balanceamento de linhas de produção e designação de trabalhadores* (ALWABP, do inglês: *assembly line worker assignment and balancing problem*), cuja ocorrência é mais comum em linhas de CTDs.

Nosso objetivo consiste em estudar formas eficientes de proporcionar a integração de trabalhadores com deficiência em linhas convencionais. Para tanto, abordamos variações do ALWIBP que consideram: (i) minimização de diferentes funções objetivo (número de estações ou tempo de ciclo); (ii) linha de produção com leiautes distintos (simples ou em U); (iii) incertezas quanto ao tempo de execução de cada tarefa (abordagem robusta); (iv) estratégias de rotação de tarefas ou alocação de trabalhadores com deficiência na linha com espaçamento regular. Para cada uma destas extensões, foram desenvolvidos formulações matemáticas, métodos de resolução e novos conjuntos de instâncias teste.

Experimentos computacionais indicam possibilidades de adaptação de linhas de produção convencionais à inserção de trabalhadores com deficiência, a custos adicionais baixos ou quase nulos. Portanto, este trabalho oferece alternativas para uma maior flexibilidade na integração de pessoas com deficiência, tornando-os tão eficientes quanto qualquer outro trabalhador denominado “convencional”.

Palavras-chave: Linhas de produção, integração de trabalhadores com deficiência, programação inteira-mista.

Abstract

A number of studies show that a large percentage of disabled people are excluded from the labor market, in particular in developing countries. In order to deal with this problem, one can highlight the importance of Sheltered Work Centers for Disabled (SWDs). These organizations employ disabled workers in various corporate sectors, giving them initial opportunities and preparing them so that they can be later integrated into the conventional labor market. Many of these centers operate assembly lines, the main object of study of this thesis.

Our study considers an ideally later stage of SWDs, related with the insertion of disabled workers in conventional assembly lines. The demand for studies in this field has grown over the years, due to corporate social responsibility policies and legal requirements such as “quotas legislations”, present in many countries.

Planning the operation of assembly lines with disabled workers involves a series of challenges due to the heterogeneity among workers, which are reflected in task times being worker dependent. This results in a double allocation problem, where decisions must determine both the tasks and the workers to be assigned to the stations, in order to optimize some efficiency measure. The conventional assembly line balancing with a parcel of disabled workers is known as the assembly line worker integration and balancing problem (ALWIBP), being a particular case of the assembly line worker assignment and balancing problem (ALWABP), which occurrence is more common in SWDs.

Our goal consists in studying efficient ways to promote the integration of people with disabilities in conventional assembly lines. For that, we address ALWIBP variants that consider: *(i)* minimization of different objective functions (number of stations or cycle time); *(ii)* different assembly line layouts (simple or U-shaped); *(iii)* uncertainties on task execution times (robust approach); *(iv)* job rotation strategies or allocation of disabled workers in the line with regular spacing. For each of these extensions, we develop mathematical formulations, solution methods and new sets of benchmark instances.

Computational experiments indicate possibilities for adapting conventional assembly lines to the insertion of disabled workers, at low or close to null additional costs. Therefore, this study offers alternatives ways of increasing flexibility in the integration of people with disabilities, making them as efficient as any other conventional worker.

Keywords: Assembly lines, integration of disabled workers, mixed-integer programming.

Sumário

Lista de Abreviaturas	xiii
Lista de Figuras	xv
Lista de Tabelas	xvii
1 Introdução	1
2 Definições formais do problema	5
2.1 Notações e definições	5
2.2 SALBP	6
2.2.1 Variantes de interesse do SALBP	7
2.2.1.1 SALBP-F	7
2.2.1.2 SALBP-1	9
2.2.1.3 SALBP-2	10
2.2.1.4 SALBP-E	11
2.3 ALBP com trabalhadores heterogêneos	13
2.3.1 Variantes de interesse do ALBP com trabalhadores heterogêneos	14
2.3.1.1 ALWABP-2	14
2.3.1.2 UALWABP	17
2.3.1.3 ALWABP com rotação de tarefas	18
2.3.1.4 ALBP na presença de um único trabalhador com deficiência	20
3 Revisão bibliográfica	23
3.1 SALBP	23
3.1.1 Variantes de interesse do SALBP	24
3.1.1.1 SALBP-1	24
3.1.1.2 SALBP-2	26
3.1.1.3 SALBP-E	26
3.1.1.4 RSALBP	27
3.1.1.5 UALBP	27
3.1.1.6 ALBP com rotação de tarefas	29
3.1.1.7 ALBP com trabalhadores de diferentes níveis de desempenho	30
3.2 ALBP com trabalhadores heterogêneos	31
3.2.1 Variantes de interesse do ALBP com trabalhadores heterogêneos	31
3.2.1.1 ALWABP-2	31

3.2.1.2	Outras problemas de linhas de produção com trabalhadores heterogêneos	32
4	ALWIBP	35
4.1	Formulação matemática	35
4.1.1	ALWIBP-1	35
4.1.2	ALWIBP-1S _{min}	37
4.2	Métodos heurísticos	37
4.2.1	Heurística Construtiva de Inserção	37
4.2.1.1	Estrutura geral da heurística	37
4.2.1.2	Pseudocódigo	40
4.2.1.3	Variantes do algoritmo	40
4.2.2	Heurística de Pós-Otimização	40
4.2.2.1	Busca Local 1	41
4.2.2.2	Busca Local 2	42
4.3	Experimentos computacionais	42
4.3.1	Instâncias teste	42
4.3.2	Resultados	43
4.3.2.1	Experimento 1: resultados dos modelos ALWIBP-1 e ALWIBP-1S _{min}	43
4.3.2.2	Experimento 2: resultados das heurísticas	47
4.3.2.3	Experimento 3: validação das heurísticas	48
5	RALBP com trabalhadores heterogêneos	53
5.1	Formulação matemática	53
5.1.1	Modelo MR1	54
5.1.2	Modelo MR2	55
5.2	Métodos heurísticos	57
5.2.1	Heurística Construtiva de Inserção - Versão Robusta	57
5.3	Experimentos computacionais	58
5.3.1	Instâncias teste	58
5.3.2	Resultados	58
5.3.2.1	Experimento 1: aplicabilidade da abordagem robusta	59
5.3.2.2	Experimento 2: resultados dos modelos	59
5.3.2.3	Experimento 3: resultados da heurística	60
6	UALWIBP	65
6.1	Formulação matemática	65
6.1.1	UALWIBP-1	66
6.1.1.1	Modelo MU1	66
6.1.1.2	Modelo MU2	67
6.1.2	UALWIBP-1Cr	68
6.1.2.1	Modelo MUCr1	68
6.1.2.2	Modelo MUCr2	68
6.2	Métodos heurísticos	69

6.2.1	Heurística Construtiva de Inserção - Versão linhas em U	69
6.3	Experimentos computacionais	70
6.3.1	Instâncias teste	70
6.3.2	Resultados	70
6.3.2.1	Experimento 1: resultados dos modelos UALWIBP-1 e UALWIBP-1Cr	71
6.3.2.2	Experimento 2: resultados das heurísticas	72
6.3.2.3	Experimento 3: comparações entre as soluções dos modelos UALWIBP-1 e ALWIBP-1	75
7	ALWIBP-2	79
7.1	Formulação matemática	79
7.1.1	ALWIBP-2	79
7.1.2	ALWIBP-2WR	80
7.2	Métodos heurísticos	84
7.2.1	Heurística construtiva baseada em regularidade de trabalhadores	84
7.2.2	Heurística construtiva baseada em regularidade de trabalhadores com aleatoriedade	86
7.3	Experimentos computacionais	86
7.3.1	Instâncias teste	86
7.3.2	Resultados	86
7.3.2.1	Experimento 1: resultados do modelo ALWIBP-2	87
7.3.2.2	Experimento 2: resultados do modelo e heurísticas do ALWIBP-2WR	87
8	ALWIBP com rotação de tarefas	91
8.1	Formulação matemática	91
8.1.1	Modelo Básico	94
8.1.2	Modelo Cíclico	95
8.2	Experimentos computacionais	95
8.2.1	Instâncias teste	95
8.2.2	Resultados	96
8.2.2.1	Experimento: resultados dos modelos Básico e Cíclico	96
9	Conclusões	101
A	Heurísticas construtivas de Scholl e Voss (1996)	105
	Referências Bibliográficas	109

Lista de Abreviaturas

ALBP	<i>Assembly Line Balancing Problem</i>
ALBHW	<i>Assembly Line Balancing with Hierarquical Worker Assignment</i>
ALWABP	<i>Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem</i>
ALWIBP	<i>Assembly Line Worker Integration and Balancing Problem</i>
ALWIBP-2WR	<i>Assembly Line Worker Integration and Balancing Problem type 2 with Worker Regularity</i>
B&B	<i>Branch-and-Bound</i>
BS	<i>Iterated Beam Search</i>
CIH	<i>Constructive Insertion Heuristic</i>
CH	<i>Constructive Heuristic for ALWABP</i>
CS	<i>Clustering Search</i>
CTD	<i>Centros de Trabalho para Deficientes</i>
GRASP	<i>Greedy Randomized Adaptative Search Procedure</i>
HAJR	<i>Hybrid Algorithm for the Job Rotation scheduling</i>
Het-FSSP	<i>Heterogeneous Flow Shop Scheduling Problem</i>
HGA	<i>Hybrid Genetic Algorithm</i>
OS	<i>Order Strength</i>
PALWABP	<i>Parallel Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem</i>
PD	<i>Programação Dinâmica</i>
RALWIBP	<i>Robust Assembly Line Worker Integration and Balancing Problem</i>
RICH	<i>Robust Insertion Constructive Heuristic</i>
RP	<i>Regra de Prioridade</i>
RSALBP	<i>Robust Simple Assembly Line Balancing Problem</i>
SALBP	<i>Simple Assembly Line Balancing Problem</i>
SH	<i>Substitution Heuristic</i>
SSI	<i>Solution Similarity Index</i>
UALBP	<i>U-shaped Assembly Line Balancing Problem</i>
UALWABP	<i>U-shaped Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem</i>
UALWIBP	<i>U-shaped Assembly Line Worker Integration and Balancing Problem</i>
UCIH	<i>U-shaped Constructive Insertion Heuristic</i>
WRCH	<i>Worker Regularity Constructive Heuristic</i>
WRCHR	<i>Worker Regularity Constructive Heuristic with Randomness</i>
WREA	<i>Worker Regularity Exact Algorithm</i>
WRGM	<i>Worker Regularity Generator Model</i>
WRM	<i>Worker Regularity Model</i>

Lista de Figuras

2.1	Grafo (rede) de precedências com 9 tarefas.	6
2.2	Solução do SALBP-F para $m = 5$ e $c = 8$	8
2.3	Solução do SALBP-1 para $\bar{c} = 9$, obtendo $m = 5$	9
2.4	Solução do SALBP-1 para $\bar{c} = 9$, obtendo $m = 4$	10
2.5	Solução do SALBP-2 para $m = 3$ e $c = 13$. A estação s_1 em destaque representa o gargalo (tempo de ciclo) da linha de produção.	11
2.6	Solução do SALBP-2 para $m = 3$ e $c = 18$. A estação s_1 em destaque representa o gargalo (tempo de ciclo) da linha de produção.	11
2.7	SALBP-E – solução da combinação $m = 3$ e $c = 13$	12
2.8	Solução do ALWABP com infactibilidade do tipo trabalhador/tarefa.	14
2.9	Solução factível do ALWABP para $m = 3$ e $c = 14$	14
2.10	Solução do ALWABP-2 para $m = 3$ e $c = 35$. A estação s_2 em destaque representa o gargalo (tempo de ciclo) da linha de produção.	15
2.11	Solução do ALWABP-2 para $m = 3$ e $c = 25$. A estação s_3 em destaque representa o gargalo (tempo de ciclo) da linha de produção.	15
2.12	Linhas de produção em U com 7 estações de trabalho (Fonte: (Becker e Scholl, 2006)).	17
2.13	Grafo de precedências da Figura 2.1 com a adição da rede de precedências “fantasma”.	18
2.14	Solução factível do ALWABP com rotação de tarefas, com 3 estações, 9 tarefas e 2 subperíodos.	19
2.15	Solução do ALWABP com rotação de tarefas com infactibilidade trabalhador/tarefa na estação s_2 (tarefas E e D), relativa ao trabalhador w_2	19
2.16	Solução do ALWABP com rotação de tarefas com infactibilidade trabalhador/tarefa na estação s_2 (tarefa B), relativa ao trabalhador w_3	20
4.1	Heurística construtiva de inserção: escolha de qual trabalhador com deficiência inserir nas estações candidatas.	39
4.2	Heurística construtiva de inserção: alocação do trabalhador com deficiência na estação mais apropriada.	39
4.3	Heurística construtiva de inserção: fixação de tarefas e trabalhadores, com a alocação do trabalhador com deficiência restante.	39
6.1	Tarefas candidatas à designação – condições (i) e (ii).	69
6.2	Tarefas candidatas à designação – condição (iii).	69
6.3	Tarefas candidatas à designação – condição (iv), com fixação de estações <i>backward</i>	70
6.4	Tarefas candidatas à designação – condição (v).	70

7.1	Instância com 8 tarefas e 2 trabalhadores com deficiência.	82
7.2	Solução do ALWIBP-2WR com tempo de ciclo igual a 30 e regularidade igual a 0,8.	82
7.3	Solução do ALWIBP-2WR com tempo de ciclo igual a 25 e regularidade igual a 1,2.	82
8.1	Grafo (rede) de precedências com 15 tarefas.	92
8.2	Solução factível do ALWIBP com rotação de tarefas <i>Básica</i> , com 8 estações, 15 tarefas, 4 subperíodos e 3 trabalhadores com deficiência.	93
8.3	Solução factível do ALWIBP com rotação de tarefas <i>Cíclica</i> com 8 estações, 15 tarefas, 4 subperíodos e 3 trabalhadores com deficiência.	93

Lista de Tabelas

2.1	Notação.	5
2.2	Versões do SALBP.	7
2.3	Matriz dos tempos de execução dos tarefas no ALWABP.	13
3.1	Trabalhos que estudam balanceamento de linhas de produção com tempos de execução de tarefas dependentes do trabalhador.	33
4.1	Regras de prioridade de tarefas utilizadas pela CIH	40
4.2	Resultados computacionais dos modelos ALWIBP-1 e ALWIBP-1S _{min} ($ N = 50$) . .	45
4.3	Resultados computacionais dos modelos ALWIBP-1 e ALWIBP-1S _{min} ($ N = 100$) .	46
4.4	Resultados computacionais das abordagens heurísticas ($ N = 50$)	49
4.5	Resultados computacionais das abordagens heurísticas ($ N = 100$)	50
4.6	Resultados computacionais da CIH ($ N = 1000$)	51
5.1	Regras de prioridade de tarefas utilizadas pela RICH	57
5.2	Número de instâncias cujas soluções obtidas pelo modelo do ALWIBP-1 foram factíveis para o RALWIBP-1.	59
5.3	Número de soluções por status.	60
5.4	Preço da robustez (%) considerando a melhor solução dos modelos MR1 e MR2. . .	61
5.5	Gaps (%) dos modelos MR1 e MR2 obtidos pelo CPLEX.	62
5.6	Tempo computacional(s) dos modelos MR1 e MR2 obtidos pelo CPLEX.	63
5.7	Resultados obtidos pela RICH.	64
6.1	Regras de prioridade de tarefas utilizadas pela UCIH	70
6.2	Resultados computacionais dos modelos MU1, MU2, MUCr1 e MUCr2 para instâncias médias ($ N = 50$) e grandes ($ N = 100$).	71
6.3	Resultados computacionais das melhores soluções dos modelos UALWIBP-1 para instâncias médias ($ N = 50$).	72
6.4	Resultados computacionais das melhores soluções dos modelos UALWIBP-1 para instâncias grandes ($ N = 100$).	73
6.5	Resultados computacionais das melhores soluções dos modelos UALWIBP-1Cr para instâncias médias ($ N = 50$).	73
6.6	Resultados computacionais das melhores soluções dos modelos UALWIBP-1Cr para instâncias grandes ($ N = 100$).	74
6.7	Resultados computacionais da U-CIH para instâncias médias ($ N = 50$).	75
6.8	Resultados computacionais da U-CIH para instâncias grandes ($ N = 100$).	76

6.9	Resultados computacionais da U-CIH para instâncias muito grandes ($ N = 1000$). . .	76
6.10	Comparações entre as soluções ótimas dos modelos ALWIBP-1 e UALWIBP-1, para instâncias médias ($ N = 50$).	77
6.11	Comparações entre as soluções ótimas dos modelos ALWIBP-1 e UALWIBP-1, para instâncias grandes ($ N = 100$).	77
7.1	Regras de prioridade de tarefas utilizadas pela CH.	85
7.2	Resultados do modelo ALWIBP-2 com as melhores soluções do modelo SALBP-2 ($ N = 50$).	87
7.3	Resultados dos algoritmos WREA, WRCH e WRCHR com as melhores soluções do modelo SALBP-2 ($ N = 50$).	89
7.4	Percentual de instâncias para as quais cada regra de prioridade forneceu a melhor solução ($ N = 50$).	89
8.1	Exemplo dos tempos de execução das tarefas. A coluna “conv” corresponde ao tempo de execução de cada tarefa por um trabalhador “convencional”.	92
8.2	Resultados computacionais dos modelos de rotação de tarefas <i>Básico</i> e <i>Cíclico</i> ($ N = 50$).	97
8.3	Resultados computacionais dos modelos de rotação de tarefas <i>Básico</i> e <i>Cíclico</i> ($ N = 100$).	98
8.4	Resultados computacionais referentes aos aumentos de tempo de ciclo e percentual de execução de tarefas diferentes, para os modelos de rotação de tarefas <i>Básico</i> e <i>Cíclico</i> ($ N = 50$).	98
8.5	Resultados computacionais referentes aos aumentos de tempo de ciclo e percentual de execução de tarefas diferentes, para os modelos de rotação de tarefas <i>Básico</i> e <i>Cíclico</i> ($ N = 100$).	99

Capítulo 1

Introdução

Desde os tempos mais remotos, a civilização leva consigo a ideia de que a deficiência é um sinal de desarmonia, impureza, ou até “pecado”, segregando e causando várias formas de discriminação (Carmo, 1989). Um exemplo deste descaso pode ser visto na Carta Magna de 1824, considerada a primeira Constituição brasileira. Este documento declarava que pessoas com deficiência não eram capazes de realizar qualquer atividade, não tendo seus direitos garantidos por lei (Paim, 2006).

Segundo o Relatório Mundial sobre a Deficiência, mais de um bilhão de pessoas apresentam algum tipo de necessidade especial, das quais aproximadamente 200 milhões possuem severos tipos de dificuldades funcionais (WHO e WBG, 2011). No Brasil, de acordo com dados do Censo 2010 publicados no fim de 2011, existe um contingente de 15,8 milhões (8,3 % da população) de deficientes físicos.

Pessoas com deficiência foram historicamente excluídas da sociedade, enfrentando restrições a direitos básicos como educação, transporte, moradia, saúde e emprego, em parte causadas pelas barreiras arquitetônicas das cidades. Em particular, a respeito das taxas de empregabilidade, podemos dizer que variam de acordo com o país ou região considerados (Costa e Miralles, 2009). No entanto, em muitas nações, não existem dados de confiança relacionados à presença do portador de deficiência no mercado de trabalho (WHO e WBG, 2011). Para se ter uma ideia, a Organização Internacional do Trabalho (ILO, do inglês *International Labor Organization*) constatou que 16 de 111 países e territórios pesquisados não possuíam dado algum sobre trabalhadores com deficiência (ILO, 2007a). Com base no que há disponível a este respeito, o percentual de vários países em relação à razão de empregabilidade¹ compreende valores que vão desde baixos, como na África do Sul (30%) e Polônia (33%), até significativos, como na Suíça (81%) e na Noruega (76%) (Mitra, 2008; OECD, 2003).

De acordo com uma pesquisa feita pela Secretaria do Trabalho da cidade de São Paulo, cerca de 90% dos cidadãos deficientes em idade adulta do município estão desempregados (SERPRO, 2004). Recentemente, Garcia (2014) apresentou um mapeamento sobre a inserção formal de trabalhadores com deficiência no mercado de trabalho brasileiro baseado em estatísticas do Censo 2010 e da RAIS 2010 (Relação Anual de Informações Sociais). De acordo com este estudo, a população brasileira com deficiência em idade produtiva corresponde a 6,5 milhões (3,4% da população total). Destes, 3,1 milhões estão desempregados. Levando em conta que os dados indicaram 306 mil vínculos formais para trabalhadores com deficiência, podemos inferir que muitos deles estão em mercados informais, realizando atividades precárias, sem cobertura trabalhista e previdenciária.

Com frequência, fatores como a falta de preparo profissional aliada ao preconceito social e desconhecimento do próprio potencial do trabalhador são apontados como motivos principais da exclusão de pessoas com necessidades especiais do mercado de trabalho (Lobato, 2009). Todavia, tais motivos não são suficientes para explicar este fenômeno, uma vez que fatores políticos e corporativos continuam a influenciar de maneira muito forte essa inclusão social (WHO e WBG,

¹Do inglês *employment ratio*: mede a razão da taxa de pessoas com deficiência empregadas pela taxa de empregabilidade da população em geral. Notemos que, quanto maior for este valor, menor será a discrepância entre o número de trabalhadores com e sem deficiência que participam do mercado formal.

2011).

Tendo em vista esse contexto, propiciar uma maior participação de pessoas com deficiência no mercado de trabalho vem sendo encarado como um grande desafio. Pesquisas recentes mostram que o trabalho tem influência direta nos âmbitos profissional e pessoal do indivíduo (Lobato, 2009). De acordo com Antunes (2004), o trabalho é fundamental na vida humana porque é condição para a existência social do homem. Giordano (2000) vai além e afirma que o trabalho como uma atividade de cunho social resulta em efeitos psicológicos positivos relevantes para o trabalhador. Além disso, Costa (2001) mostra que o trabalho leva a um aumento na auto-estima e na segurança no enfrentamento de barreiras sociais por parte das pessoas com deficiência.

A declaração e aprovação dos Direitos da Pessoa com Deficiência da Organização das Nações Unidas (ONU), em 1975, representa um marco na história da luta por melhores condições de vida, uma vez que obrigou países membros da ONU a proporem políticas de apoio a pessoas com deficiência. Além disso, mais recentemente, o artigo 27 da Convenção da ONU pelos Direitos das Pessoas com Deficiência reconhece e reforça o direito ao trabalho de maneira igualitária e imparcial (UN, 2006). Assim, com o objetivo de melhorar esse cenário tão desfavorável, algumas iniciativas foram adotadas.

Em países como Alemanha, Nova Zelândia, Canadá e Inglaterra, foram criados fundos de investimentos voltados à capacitação e ao treinamento do trabalhador deficiente (WHO e WBG, 2011). Outros programas que visam a formação técnica e profissional destes trabalhadores estão presentes em países como Bangladesh (Kalimullah e de Klerk, 2008), África do Sul (Coleridge, 2007), Nigéria (Alade, 2004), Camboja (ILO, 2007b) e Estados Unidos (Timmons *et al.*, 2006). O Brasil também possui programas similares aos referenciados acima, promovidos por organizações tais como a AACD (Associação de Assistência à Criança Deficiente) (AACD, 2001), o CVI-Rio (Centro de Vida Independente do Rio de Janeiro) (CVI Rio, 1982) e a FADERS (Fundação de Articulação e Desenvolvimento de Políticas Públicas para Pessoas Portadoras de Deficiência e de Altas Habilidades do Rio Grande do Sul) (FADERS, 1973).

Além de propostas que visam preparar o trabalhador, existe uma extensa legislação que garante os direitos do cidadão com deficiência. O poder público, entretanto, nem sempre garante sua eficácia (Paim, 2006; WHO e WBG, 2011). Particularmente, Lobato (2009) aborda a questão da Lei 8.213 de 1991, mais conhecida como “Lei das Cotas”, que obriga a reserva de 2% a 5% das vagas em empresas com mais de 100 funcionários para portadores de deficiência. Por meio de uma série de depoimentos de indivíduos de diferentes níveis de deficiência, Toldrá (2009) mostra que a lei de cotas permitiu uma redução do preconceito e uma maior visibilidade das diferentes capacidades desta parcela da população. Por outro lado, apesar de ser um instrumento de inclusão social, tal iniciativa é criticada por muitos, devido ao seu caráter emergencial e assistencialista (Lobato, 2009).

Uma outra forma de propiciar a inclusão de trabalhadores com deficiência são os Centros de Trabalho para Deficientes (CTDs), empresas sem fins lucrativos com sedes em países como Espanha, Japão, Inglaterra e Suíça. A política destes centros se baseia na contratação do maior número possível de trabalhadores com necessidades especiais, a fim de propiciar treinamento e um primeiro contato com o mercado de trabalho (Chaves, 2009). Idealmente, após um certo período nos CTDs, estas pessoas são absorvidas por empresas convencionais.

Pretendemos situar nosso estudo em linhas de produção na presença de trabalhadores com deficiência, em particular nos ambientes produtivos convencionais. Linhas de produção são componentes essenciais para a fabricação, em larga escala, de itens padronizados. As operações necessárias para a montagem de um produto são compostas por tarefas indivisíveis sujeitas a restrições tecnológicas como, por exemplo, relações de precedências. O transporte de um dado item entre diferentes estações é feito de maneira sequencial e, em cada estação, parte das tarefas necessárias para sua fabricação é executada pelo trabalhador ali alocado.

A motivação de se estudar linhas de produção neste contexto advém o potencial empregatício dessa atividade para pessoas com deficiência. Ford (1922) já descrevia em sua obra (ainda que de forma caricatural) que existiam muitas tarefas na indústria que não exigiam plenas capacidades físicas, podendo ser executadas por trabalhadores com deficiência. Simonelli (2005, 2009) e

Lobato (2009) apresentam dados e realizam estudos de caso que revelam oportunidades de trabalho promissoras no ambiente industrial. Com efeito, o estudo de Simonelli *et al.* (2006) realizado no município de São Carlos mostra que 88% das vagas disponíveis para pessoas com deficiência estão na produção.

Encontrar a melhor designação das tarefas aos trabalhadores respeitando suas restrições de precedência, além de outras peculiaridades do ambiente produtivo, constitui o que chamamos de *problema de balanceamento de linhas de produção* (ALBP, do inglês *assembly lines balancing problem*). No clássico *problema simples de balanceamento de linhas de produção* (SALBP, do inglês: *simple assembly line balancing problem*), devemos nos preocupar com a designação de tarefas às estações, uma vez que trabalhadores as executam em tempos homogêneos. Por outro lado, no *problema de balanceamento de linhas de produção e designação de trabalhadores* (ALWABP, do inglês: *assembly line worker assignment and balancing problem*), típico de ambientes como os CTDs, as particularidades de cada trabalhador fazem com que os tempos de execução das tarefas sejam muito distintos e dependentes do trabalhador escolhido. Isto dá origem a um problema de dupla alocação simultânea (trabalhadores e tarefas a estações de trabalho) de alta complexidade.

O *problema de balanceamento de linhas de produção e integração de trabalhadores* (ALWIBP, do inglês: *assembly line worker integration and balancing problem*) ocorre em linhas convencionais em que há um subconjunto de trabalhadores com algum tipo de deficiência, que deve ser incluído ou já faz parte do sistema. O caráter heterogêneo desta parcela de trabalhadores exige que novos modelos e algoritmos sejam desenvolvidos, tratando a questão da dupla alocação sujeita a restrições de precedências e possíveis infactibilidades das designações trabalhador/tarefa. Com efeito, o ALWIBP tem ganhado ênfase em muitos contextos práticos, uma vez que empresas vêm sendo obrigadas a ter um maior cuidado com a inserção de trabalhadores com deficiência em seus quadros de funcionários.

Neste trabalho, pretendemos estudar formas eficientes de se integrar trabalhadores com deficiência em linhas de produção convencionais, abordando variantes do problema que consideram diferentes formatos de linha e distintas características dos tempos de execução das tarefas. Nosso objetivo é mostrar que o bom planejamento de linhas de produção pode tornar invisíveis as dificuldades de trabalhadores com deficiência, levando-os a serem tão eficientes como qualquer outro trabalhador “convencional”.

O restante deste documento está estruturado da seguinte forma: o Capítulo 2 apresenta uma formalização dos problemas em estudo. O Capítulo 3 efetua uma revisão bibliográfica das abordagens mais próximas a este trabalho. No restante da tese, apresentamos a metodologia proposta, assim como os experimentos computacionais relativos a cada problema abordado. Com efeito, as contribuições deste trabalho são apresentadas do Capítulo 4 ao 8. No Capítulo 4, tratamos do ALWIBP, introduzindo formalmente o problema através de uma formulação matemática. Além disso, estudamos uma variação deste problema e desenvolvemos uma heurística construtiva baseada em regras de prioridade de tarefas. No Capítulo 5, estudamos uma abordagem robusta do ALWIBP, por meio da técnica de *budget* de incerteza (Bertsimas e Sim, 2003, 2004) incorporada a dois novos modelos baseados nos trabalhos mais proeminentes da literatura de linhas de produção com trabalhadores heterogêneos. Por fim, adaptamos a heurística proposta no capítulo anterior a fim de tratar do caso robusto. O Capítulo 6 se concentra em duas variantes do ALWIBP em um ambiente de linhas em U, através de dois modelos matemáticos para cada abordagem e uma outra extensão da heurística do ALWIBP. Estudamos o tipo 2 do ALWIBP no Capítulo 7, apresentando um modelo para o caso mais geral e acrescentando a este problema características que visam distribuir de forma mais uniforme os trabalhadores com deficiência em uma linha de produção. Para tanto, três algoritmos são propostos. O Capítulo 8 propõe dois mecanismos para o planejamento de rotação de tarefas no ALWIBP, baseados na fixação de tarefas nas estações de trabalho e realizando a rotação de trabalhadores em grupos de estações previamente determinados. Assim, o desafio deste problema consiste em determinar uma designação apropriada de tarefas e trabalhadores de forma que o tempo de ciclo máximo do período completo de rotação seja minimizado. Algumas conclusões e novas perspectivas para trabalhos futuros são apresentadas no Capítulo 9. Por fim, o Apêndice A descreve um método frequentemente utilizado nos algoritmos propostos: as heurísticas construtivas

de Scholl e Voss (1996).

Observemos que mesmo nos atendo à temática de trabalhadores com deficiência, os problemas propostos, assim como seus métodos de resolução, podem ser diretamente aplicados a linhas de produção na presença de trabalhadores em geral, cujo comportamento na execução de tarefas possua um viés heterogêneo.

Capítulo 9

Conclusões

Neste trabalho, efetuamos um estudo sobre o *problema de balanceamento de linhas de produção e integração de trabalhadores* (ALWIBP, do inglês: *assembly line worker integration and balancing problem*), além de algumas de suas variantes. O ALWIBP se insere em um contexto em que se deseja otimizar o funcionamento de linhas de produção convencionais na presença de trabalhadores com deficiência, parcela esta da mão-de-obra que apresenta heterogeneidade quanto ao tempo de execução das tarefas. Um levantamento inicial sobre a participação de pessoas com deficiência no mercado de trabalho foi realizado. Diversas estatísticas encontradas forneceram motivação para a resolução dos problemas propostos neste estudo.

Investigamos formas eficientes para a integração de trabalhadores com deficiência em linhas de produção convencionais, abordando variantes do ALWIBP. Consideramos diferentes formatos de linha e distintas características dos tempos de execução das tarefas. Listamos estes problemas a seguir: (i) ALWIBP-1; (ii) ALWIBP *robusto* (RALWIBP, do inglês: *robust assembly line worker integration and balancing problem*); (iii) ALWIBP em linhas em U (UALWIBP, do inglês: *U-shaped assembly line worker integration and balancing problem*); (iv) ALWIBP-2; (v) ALWIBP com rotação de tarefas. Nos itens (i)–(iii), efetuamos o balanceamento da linha minimizando o número de estações de trabalho para um dado tempo de ciclo, enquanto os itens (iv)–(v) se concentram na minimização do tempo de ciclo, considerando uma linha com um número pré-determinado de estações e trabalhadores. A escolha das funções objetivo em questão se dá devido a sua relevância prática e presença na maior parte dos trabalhos encontrados na literatura. Em todos os casos, garantimos a inserção dos trabalhadores com deficiência no sistema produtivo. Nosso objetivo é mostrar que o bom planejamento de linhas de produção pode possibilitar a inserção de trabalhadores com deficiência nas linhas sem que isso represente perdas significativas de produtividade.

Após uma revisão bibliográfica envolvendo o *problema simples de balanceamento de linhas de produção* (SALBP, do inglês: *simple assembly line balancing problem*), o *problema de balanceamento de linhas de produção e designação de trabalhadores* (ALWABP, do inglês: *assembly line worker assignment and balancing problem*) e problemas correlatos ao ALWIBP, iniciamos nosso desenvolvimento metodológico a partir do ALWIBP-1. Propusemos um modelo inteiro-misto para este problema, além de uma outra variante do ALWIBP-1 que adiciona um objetivo hierarquicamente secundário, visando uma maior participação de trabalhadores com deficiência pelo aumento de suas cargas de trabalho. A grande contribuição desta abordagem consiste em uma *heurística construtiva de inserção* (CIH, do inglês: *constructive insertion heuristic*), que se mostrou flexível a adaptações em outros problemas mostrados mais adiante.

Em síntese, a CIH parte de uma solução inicial composta por trabalhadores exclusivamente “convencionais” e tenta inserir os trabalhadores com deficiência de modo a reduzir o número de estações adicionais. Propomos também duas buscas locais baseadas em vizinhanças inteiro-mistas. Dando continuidade, projetamos um novo conjunto de instâncias a partir de características mais realistas encontradas em contextos práticos e relatadas na literatura. Os resultados computacionais mostram que, nas instâncias testadas, conseguimos um percentual de inserção de trabalhadores com deficiência de pelo menos 5%, com um ligeiro aumento no número de estações de trabalho.

Além disso, a CIH se mostrou eficaz e eficiente na resolução do ALWIBP-1 e sua escalabilidade foi atestada pela resolução de instâncias com até 1000 tarefas.

A questão da incerteza, inerente aos tempos de execução de tarefas por trabalhadores nas linhas de produção, é estudada no RALWIBP-1 através da abordagem do “budget” de incerteza (Bertsimas e Sim, 2003, 2004). Introduzimos duas formulações robustas inspiradas em modelos proeminentes de linhas de produção com trabalhadores heterogêneos. De forma complementar, uma adaptação da CIH denominada RICH (do inglês: *robust insertion constructive heuristic*) foi implementada para tratar o caso robusto do ALWIBP-1. Através de uma sequência de experimentos numéricos, variando parâmetros como “budget” de incerteza e percentual tempos adicionais de execução de tarefas, num total de 12 combinações, chegamos à conclusão de que o aumento do número de estações em soluções robustas é aceitável e, em alguns casos, nulo. Quanto à RICH, comprovamos sua eficiência a partir dos tempos computacionais e da qualidade das soluções obtidas. Podemos afirmar, diante de tais resultados, que esta abordagem se mostra importante em contextos nos quais é necessário trabalhar com soluções que tenham uma certa imunidade a variações do sistema.

Conduzimos um estudo sobre linhas em U no contexto do ALWIBP, motivados pela sua flexibilidade e eficácia, principalmente em sistemas do tipo *just-in-time*. Este tipo de linha tem a peculiaridade de permitir que tarefas sejam designadas às estações de maneira *forward* e *backward*. Propomos duas formulações para o UALWIBP-1 e uma versão da CIH para este problema, chamada *heurística construtiva de inserção em linhas em U* (UCIH, do inglês: *U-shaped line constructive insertion heuristic*). Adicionalmente, estudamos uma extensão do UALWIBP-1 que não permite a presença de trabalhadores com deficiência em estações *crossover*, uma vez que, em algumas situações, a ocupação destes postos exige características que alguns trabalhadores não possuem (por exemplo: facilidade de movimentação). Dois modelos foram propostos para esta variante, denominada UALWIBP-1Cr. Os testes computacionais indicam que a complexidade de se inserir trabalhadores com deficiência em linhas em U é similar à inserção dos mesmos em linhas convencionais simples. Além disso, verificamos o bom desempenho da abordagem heurística, que foi capaz de resolver problemas muito grandes (1000 tarefas) em menos de 100s, em média.

Consideramos, também, a minimização do tempo de ciclo diante de um número previamente fixado de estações. Primeiramente, estudamos o ALWIBP-2 e uma versão deste problema valorizando a distribuição uniforme de trabalhadores ao longo da linha (ALWIBP-2WR, do inglês: *ALWIBP-2 with worker regularity*), a fim de contribuir com a sua integração no sistema. Foram propostas formulações para os dois problemas, além de duas heurísticas construtivas para o ALWIBP-2WR. A *heurística construtiva baseada em regularidade de trabalhadores* (WRCH, do inglês: *worker regularity constructive heuristic*) trabalha com um conjunto de configurações de trabalhadores na linha, ordenados de forma ascendente pelo critério de regularidade. Em seguida, para cada distribuição obtida, utiliza uma heurística construtiva do ALWABP-2 para realizar as designações de tarefas. A diferença fundamental entre a WRCH e a WRCHR é que, na última, perfazemos as designações de tarefas escolhendo, aleatoriamente, uma dentre uma lista de candidatas. Assim como no ALWIBP-1, introduzimos um novo conjunto de instâncias para o ALWIBP-2. Os experimentos computacionais realizados apresentaram bons resultados iniciais referentes ao percentual de aumento do tempo de ciclo, comparado às melhores soluções do SALBP-2.

Por último, nos concentramos no desenvolvimento de modelos matemáticos para o problema de rotação de tarefas no contexto do ALWIBP. Este mecanismo possui uma função muito importante no planejamento e gerenciamento de linhas de produção, uma vez que está diretamente ligado a fatores como motivação e bem-estar dos trabalhadores. Desenvolvemos uma abordagem que fixa tarefas nas estações e rotaciona trabalhadores dentro de grupos de estações pré-determinados. Assim, os trabalhadores com deficiência são alocados às estações de forma que sejam capazes de executar as tarefas de seu grupo durante o período completo de rotação. Quanto a função objetivo, minimizamos o tempo de ciclo máximo considerando todos os subperíodos. Propomos duas formulações matemáticas baseadas em duas maneiras distintas para se efetuar a rotação, denominadas *Básica* e *Cíclica*. A partir de testes computacionais, observamos que ambas obtiveram

resultados similares, propiciando uma boa política de execução de tarefas diferentes sem, para isso, afetar consideravelmente o tempo de ciclo da linha.

Esta tese teve o caráter de introduzir e apresentar componentes elementares para a exploração dos cinco problemas aplicados ao contexto de linhas de produção convencionas na presença de trabalhadores com deficiência. Os próximos passos dos problemas (i), (ii) e (iii) consistem no desenvolvimento de metaheurísticas e algoritmos híbridos. Em relação ao problema (iv), faz-se necessário um estudo mais completo envolvendo testes computacionais com instâncias maiores, a fim de extrair informações complementares sobre o comportamento dos métodos propostos. Por fim, quanto ao problema (v), pretendemos considerar requisitos adicionais às modelagens, a fim de tratar questões como o agrupamento de trabalhadores com deficiência em um mesmo conjunto de estações e uma possível redução do número de tarefas executadas por trabalhadores com deficiência, devido à característica do tipo de rotação.

Como conclusão geral, pode-se extrair que a integração de trabalhadores com deficiência em linhas de produção convencionais dá origem a uma grande quantidade de problemas de otimização. Nesta tese, introduzimos alguns destes problemas, propondo modelos e métodos de resolução. Esperamos que este trabalho ajude a chamar a atenção da comunidade para esta família de problemas que possuem relevância científica e social.

Referências Bibliográficas

- AACD (2001)** Associação de Assistência à Criança Deficiente (Programa Trabalho Eficiente) - AACD. <http://www.aacd.org.br/pacientes.aspx> (acessado em 15 de março de 2012), 2001. Citado na(s) pág(s). 2
- Aase et al. (2003)** G. R. Aase, M. J. Schniederjans e J. R. Olson. U-OPT: an analysis of exact U-shaped line balancing procedures. *International Journal of Production Research*, 41:4185–4210. Citado na(s) pág(s). 28
- Aase et al. (2004)** G. R. Aase, J. R. Olson e M. J. Schniederjans. U-shaped assembly line layouts and their impact on labor productivity: an experimental study. *European Journal of Operational Research*, 156:698–711. Citado na(s) pág(s). 27, 28
- Ajenblit e Wainwright (1998)** D. A. Ajenblit e R. L. Wainwright. Applying genetic algorithms to the U-shaped assembly line balancing problem. Em *Proceedings of the 1998 IEEE Evolutionary Computation*, 96–101, Anchorage, EUA. Citado na(s) pág(s). 28
- Alade (2004)** E. B. Alade. Community-based vocational rehabilitation (CBVR) for people with disabilities: experiences from a pilot project in Nigeria. *British Journal of Special Education*, 31: 143–149. Citado na(s) pág(s). 2
- Alavidoost et al. (2015)** M. H. Alavidoost, M. H. Fazel Zarandi, M. Tarimoradi e Y. Nemati. Modified genetic algorithm for simple straight and U-shaped assembly line balancing with fuzzy processing times (accepted for publication). *Journal of Intelligent Manufacturing*, 1–24. Citado na(s) pág(s). 27
- Alem e Morabito (2011)** D. Alem e R. Morabito. Production planning in furniture settings via robust optimization. *Computers & Operations Research*, 39:139–150. Citado na(s) pág(s). 53
- Allwood e Lee (2004)** J. M. Allwood e W. L. Lee. The impact of job rotation on problem solving skills. *International Journal of Production Research*, 42:865–881. Citado na(s) pág(s). 29
- Antunes (2004)** R. Antunes. *A dialética do trabalho: escritos de Marx e Engels*. Expressão Popular, São Paulo. Citado na(s) pág(s). 2
- Araújo et al. (2012)** F. F. B. Araújo, A. M. Costa e C. Miralles. Two extensions for the assembly line worker assignment and balancing problem: parallel stations and collaborative approach. *International Journal of Production Economics*, 140:483–495. Citado na(s) pág(s). 32, 33
- Araújo et al. (2014)** F. F. B. Araújo, A. M. Costa e C. Miralles. Balancing parallel assembly lines with disabled workers (accepted for publication). *European Journal of Industrial Engineering*. Citado na(s) pág(s). 32, 33
- Aryanezhad et al. (2009)** M. B. Aryanezhad, A. S. Kheirkhah, V. Deljoo e S. M. J. Mirzapour Al-e-hashem. Designing safe job rotation schedules based upon workers' skills. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 41:193–199. Citado na(s) pág(s). 29

- Asensio-Cuesta et al. (2012a)** S. Asensio-Cuesta, J. A. Diego-Más, L. Canós-Darós e C. Andrés-Romano. A genetic algorithm for the design of job rotation schedules considering ergonomic and competence criteria. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 60:1161–1174. Citado na(s) pág(s). 29
- Asensio-Cuesta et al. (2012b)** S. Asensio-Cuesta, J. A. Diego-Más, L. V. Cremades-Oliver e M. C. González-Cruz. A method to design job rotation schedules to prevent work-related musculoskeletal disorders in repetitive work. *International Journal of Production Research*, 50:7467–7478. Citado na(s) pág(s). 29
- Avikal et al. (2013)** S. Avikal, R. Jain, P.K. Mishra e H.C. Yadav. A heuristic approach for U-shaped assembly line balancing to improve labor productivity. *Computers & Industrial Engineering*, 64:895–901. Citado na(s) pág(s). 28
- Avramidis et al. (2010)** A. N. Avramidis, W. Chan, M. Gendreau, P. L’Ecuyer e O. Pisacane. Optimizing daily agent scheduling in a multi-skill call center. *European Journal of Operational Research*, 200:822–832. Citado na(s) pág(s). 30
- Ayough et al. (2012)** A. Ayough, M. Zandieh e H. Farsijani. GA and ICA approaches to job rotation scheduling problem: considering employee’s boredom. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 60:651–666. Citado na(s) pág(s). 29
- Azizi et al. (2007)** N. Azizi, S. Zolfaghari e M. Liang. A new meta-heuristic approach for combinatorial optimization and scheduling problems. Em *Proceedings of the 2007 IEEE Symposium on Computational Intelligence in Scheduling*, 7–14, Hawaii, USA. Citado na(s) pág(s). 30
- Azizi et al. (2010)** N. Azizi, S. Zolfaghari e M. Liang. Modeling job rotation in manufacturing systems: the study of employee’s boredom and skill variations. *International Journal of Production Economics*, 123:69–85. Citado na(s) pág(s). 30
- Bartholdi e Eisenstein (1996)** J. J. Bartholdi e D. D. Eisenstein. A production line that balances itself. *Operations Research*, 44:21–34. Citado na(s) pág(s). 30
- Battaia e Dolgui (2013)** O. Battaia e A. Dolgui. A taxonomy of line balancing problems and their solution approaches. *International Journal of Production Economics*, 142:259–277. Citado na(s) pág(s). 7, 23
- Bautista e Pereira (2002)** J. Bautista e J. Pereira. Ant algorithms for assembly line balancing. Em Marco Dorigo, Gianni Di Caro e Michael Sampels, editors, *Ant Algorithms Proceedings of the Third International Workshop ANTS 2002*, 65–75. Springer. Lecture Notes in Computer Science, Vol. 2463. Citado na(s) pág(s). 25
- Bautista e Pereira (2009)** J. Bautista e J. Pereira. A dynamic programming based heuristic for the assembly line balancing problem. *European Journal of Operational Research*, 194:787–794. Citado na(s) pág(s). 25
- Bautista et al. (1996a)** J. Bautista, R. Companys e A. Corominas. Heuristics and exact algorithms for solving Monden problem. *European Journal of Operational Research*, 88:101–113. Citado na(s) pág(s). 81
- Bautista et al. (1996b)** J. Bautista, R. Companys e A. Corominas. A note on the relation between the product rate variation (PRV) problem and apportionment problem. *Journal of the Operational Research Society*, 47:1410–1414. Citado na(s) pág(s). 81
- Baybars (1986)** I. Baybars. A survey of exact algorithms for the simple assembly line balancing problem. *Management Science*, 32:909–932. Citado na(s) pág(s). 7, 23, 24

- Baykasoğlu e Dereli (2009)** A. Baykasoğlu e T. Dereli. Simple and U-type assembly line by using an ant colony based algorithm. *Mathematical and Computational Applications*, 14:1–12. Citado na(s) pág(s). [28](#)
- Baykasoğlu e Özbakır (2007)** A. Baykasoğlu e L. Özbakır. Stochastic U-line balancing using genetic algorithms. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 32:139–147. Citado na(s) pág(s). [27](#)
- Baykasoğlu e Özbakır (2015)** A. Baykasoğlu e L. Özbakır. Discovering task assignment rules for assembly line balancing via genetic programming. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 76:417–434. Citado na(s) pág(s). [25](#)
- Becker e Scholl (2006)** C. Becker e A. Scholl. A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 168:694–715. Citado na(s) pág(s). [xv](#), [7](#), [13](#), [17](#), [23](#), [27](#)
- Bellenguez-Morineau e Néron (2007)** O. Bellenguez-Morineau e E. Néron. A branch-and-bound method for solving multi-skill project scheduling problem. *RAIRO - Operations Research*, 47:155–170. Citado na(s) pág(s). [30](#)
- Benavides et al. (2014)** A. J. Benavides, M. Ritt e C. Miralles. Flow shop scheduling with heterogeneous workers. *European Journal of Operational Research*, 237:713–720. Citado na(s) pág(s). [33](#)
- Bertsimas e Sim (2003)** D. Bertsimas e M. Sim. Robust discrete optimization and network flows. *Mathematical Programming*, Ser. B 98:49–71. Citado na(s) pág(s). [3](#), [27](#), [53](#), [55](#), [102](#)
- Bertsimas e Sim (2004)** D. Bertsimas e M. Sim. The price of robustness. *Operations Research*, 52:35–53. Citado na(s) pág(s). [3](#), [27](#), [53](#), [55](#), [60](#), [102](#)
- Bertsimas e Thiele (2006)** D. Bertsimas e A. Thiele. A robust optimization approach to inventory theory. *Operations Research*, 54:150–168. Citado na(s) pág(s). [53](#)
- Bhadury e Radovilska (2006)** J. Bhadury e Z. Radovilska. Job rotation using the multi-period assignment model. *International Journal of Production Research*, 44:4431–4444. Citado na(s) pág(s). [29](#)
- Blum e Miralles (2011)** C. Blum e C. Miralles. On solving the assembly line worker assignment and balancing problem via beam search. *Computers & Operations Research*, 38:328–339. Citado na(s) pág(s). [31](#), [33](#)
- Bock e Rosenberg (2000)** S. Bock e O. Rosenberg. A new parallel breadth first tabu search technique for solving production planning problems. *International Transactions in Operational Research*, 7:625–635. Citado na(s) pág(s). [26](#)
- Borba e Ritt (2014a)** L. Borba e M. Ritt. A heuristic and a branch-and-bound algorithm for the assembly line worker assignment and balancing problem. *Computers & Operations Research*, 45:87–96. Citado na(s) pág(s). [16](#), [32](#), [33](#), [53](#), [54](#)
- Borba e Ritt (2014b)** L. Borba e M. Ritt. A Parallel Branch-and-Bound for the Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem. Em *XLVI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, 2293–2303, Salvador, Brasil. Citado na(s) pág(s). [32](#), [33](#)
- Boucher (1987)** T. Boucher. Choice of assembly line design under task learning. *International Journal of Production Research*, 25:513–524. Citado na(s) pág(s). [27](#)
- Boysen e Fliedner (2008)** N. Boysen e M. Fliedner. A versatile algorithm for assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 184:39–56. Citado na(s) pág(s). [28](#)

- Boysen et al. (2007)** N. Boysen, M. Fliedner e A. Scholl. A classification of assembly line balancing problems. *European Journal of Operational Research*, 183:674–693. Citado na(s) pág(s). [23](#)
- Boysen et al. (2008)** N. Boysen, M. Fliedner e A. Scholl. Assembly line balancing: which model to use when? *International Journal of Production Economics*, 111:509–528. Citado na(s) pág(s). [23](#)
- Boysen et al. (2009)** N. Boysen, M. Fliedner e A. Scholl. Sequencing mixed-model assembly lines: Survey, classification and model critique. *European Journal of Operational Research*, 192: 349–373. Citado na(s) pág(s). [81](#)
- Cai e Li (2000)** X. Cai e K. N. Li. A genetic algorithm for scheduling staff of mixed skills under multi-criteria. *European Journal of Operational Research*, 125:359–369. Citado na(s) pág(s). [30](#)
- Carmo (1989)** A. A. Carmo. *Deficiência física: a sociedade brasileira cria, “recupera” e discrimina*. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas. Citado na(s) pág(s). [1](#)
- Carnahan et al. (2000)** B. J. Carnahan, M. S. Redfern e B. A. Norman. Designing safe job rotation schedules using optimization and heuristic search. *Ergonomics*, 43:543–560. Citado na(s) pág(s). [29](#)
- Champion et al. (1994)** M. Champion, L. Cheraskin e M. Stevens. Career-related antecedents and outcomes of job rotation. *Academy of Management Journal*, 37:1518–1542. Citado na(s) pág(s). [18](#)
- Chase (1974)** R. Chase. Survey of paced assembly lines. *Industrial Engineering*, 6:14–18. Citado na(s) pág(s). [23](#)
- Chaves (2009)** A. A. Chaves. *Uma metaheurística híbrida com busca por agrupamentos aplicada a problemas de otimização combinatória*. Tese de Doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Citado na(s) pág(s). [2](#)
- Chaves et al. (2009)** A. A. Chaves, L. A. N. Lorena e C. Miralles. Hybrid metaheuristic for the assembly line worker assignment and balancing problem. *Lecture Notes on Computer Science*, 5818:1–14. Citado na(s) pág(s). [31](#), [33](#)
- Chiang (1998)** W.-C. Chiang. The application of a tabu search metaheuristic to the assembly line balancing problem. *Annals of Operations Research*, 77:209–227. Citado na(s) pág(s). [25](#)
- Chiang e Urban (2006)** W.-C. Chiang e T. L. Urban. The stochastic U-line balancing problem: a heuristic procedure. *European Journal of Operational Research*, 175:1767–1781. Citado na(s) pág(s). [27](#)
- Coleridge (2007)** P. Coleridge. Economic empowerment. Em T. Barron e P. Amerena, editors, *Disability and inclusive development*. Leonard Cheshire International, London. Citado na(s) pág(s). [2](#)
- Cordeau et al. (2010)** J.-F. Cordeau, G. Laporte, F. Pasin e S. Ropke. Scheduling technicians and tasks in a telecommunications company. *Journal of Scheduling*, 13:393–409. Citado na(s) pág(s). [30](#)
- Corominas et al. (2008)** A. Corominas, R. Pastor e J. Plans. Balancing assembly line with skilled and unskilled workers. *Omega*, 36:1126–1132. Citado na(s) pág(s). [30](#)
- Corominas et al. (2010)** A. Corominas, J. Olivella e R. Pastor. A model for the assignment of a set of tasks when work performance depends on experience of all tasks involved. *International Journal of Production Economics*, 126:335–340. Citado na(s) pág(s). [30](#)

- Cortez e Costa (2014)** P. M. C. Cortez e A. M. Costa. Sequencing mixed-model assembly lines operating with a heterogeneous workforce (accepted for publication). *International Journal of Production Research*, 1–18. Citado na(s) pág(s). 32, 33
- Costa e Miralles (2009)** A. M. Costa e C. Miralles. Job rotation in assembly lines employing disabled workers. *International Journal of Production Economics*, 120:625–632. Citado na(s) pág(s). 1, 19, 32, 33, 91, 94
- Costa et al. (2009)** A. M. Costa, L. M. R. Santos, M. C. O. Moreira e C. Miralles. Análise da eficiência de linhas de produção com trabalhadores deficientes. Em *Anais do XLI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, 698–709, Porto Seguro, Brasil. Citado na(s) pág(s). 21, 32, 33
- Costa (2001)** V. A. Costa. *Formação na perspectiva da teoria crítica da sociedade: As experiências dos trabalhadores deficientes visuais do serviço federal de processamento de dados*. Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica de São Paulo. Citado na(s) pág(s). 2
- CVI Rio (1982)** Centro de Vida Independente do Rio de Janeiro - CVI Rio. <http://www.cvi-rio.org.br/mercado-de-trabalho/> (acessado em 15 de março de 2012), 1982. Citado na(s) pág(s). 2
- De Bruecker et al. (2015)** P. De Bruecker, J. V. Bergh, J. Beliën e E. Demeulemeester. Workforce planning incorporating skills: State of the art. *European Journal of Operational Research*, 243: 1–16. Citado na(s) pág(s). 30
- Digiesi et al. (2009)** S. Digiesi, A. Kock, G. Mummolo e J. Rooda. The effect of dynamic worker behavior on flow line performance. *Production Planning and Control*, 120:368–377. Citado na(s) pág(s). 27
- Dimitriadis (2006)** S. G. Dimitriadis. Assembly line balancing and group working: a heuristic procedure for workers' groups operating on the same product and workstation. *Computers & Operations Research*, 33:2757–2774. Citado na(s) pág(s). 91
- Dolgui e Kovalev (2012)** A. Dolgui e S. Kovalev. Scenario based robust line balancing: Computational complexity. *Discrete Applied Mathematics*, 160(13–14):1955–1963. Citado na(s) pág(s). 27
- Duplaga e Bragg (1998)** E.A. Duplaga e D.J. Bragg. Mixed-model assembly line sequencing heuristics for smoothing component parts usage: a comparative analysis. *International Journal of Production Research*, 36:2209–2224. Citado na(s) pág(s). 81
- Dutot et al. (2006)** P.-F. Dutot, A. Laugier e A.-M. Bustos. Technicians and interventions scheduling for telecommunications. Relatório técnico, France Telecom, Paris, France. Citado na(s) pág(s). 30
- Erel et al. (2001)** E. Erel, I. Sabuncuoglu e B. A. Aksu. Balancing of U-type assembly systems using simulated annealing. *International Journal of Production Research*, 39:3003–3015. Citado na(s) pág(s). 28
- Eriksson e Ortega (2006)** T. Eriksson e J. Ortega. The adoption of job rotation: testing the theories. *Industrial and Labor Relations Review*, 59:653–666. Citado na(s) pág(s). 18
- Estellon et al. (2009)** B. Estellon, F. Gardi e K. Nouioua. High-performance local search for task scheduling with human resource allocation. *Lecture Notes on Computer Science*, 5752:1–15. Citado na(s) pág(s). 30
- FADERS (1973)** Fundação de Articulação e Desenvolvimento de Políticas Públicas para Pessoas Portadoras de Deficiência e de Altas Habilidades do Rio Grande do Sul - FADERS. <http://www.faders.rs.gov.br/portal/index.php?id=servico&cat=2> (acessado em 15 de março de 2012), 1973. Citado na(s) pág(s). 2

- Fattahi e Turkay (2015)** A. Fattahi e M. Turkay. On the MILP model for the U-shaped assembly line balancing problems. *European Journal of Operational Research*, 242:343–346. Citado na(s) pág(s). 28
- Fattahi et al. (2014)** A. Fattahi, S. Elaoud, E. S. Azer e M. Turkay. A novel integer programming formulation with logic cuts for the u-shaped assembly line balancing problem. *International Journal of Production Research*, 52:1318–1333. Citado na(s) pág(s). 28, 65, 66, 67, 70, 71
- Fleszar e Hindi (2003)** K. Fleszar e K. S. Hindi. An enumerative heuristic and reduction methods for the assembly line balancing problem. *European Journal of Operational Research*, 145:606–620. Citado na(s) pág(s). 25
- Ford (1922)** H. Ford. *My life and work - An autobiography of Henry Ford*. Citado na(s) pág(s). 2
- Fırat e Hurkens (2012)** M. Fırat e C. A. J. Hurkens. An improved MIP-based approach for a multi-skill workforce scheduling problem. *Journal of Scheduling*, 15:363–380. Citado na(s) pág(s). 30, 91
- Gabrel et al. (2014)** V. Gabrel, C. Murat e A. Thiele. Recent advances in robust optimization: An overview. *European Journal of Operational Research*, 235:471–483. Citado na(s) pág(s). 53
- Garcia (2014)** V.G. Garcia. *Revista Trabalho, Educação e Saúde*, 12:165–187. Citado na(s) pág(s). 1
- García-Villoria e Pastor (2013)** A. García-Villoria e R. Pastor. Erratum to “a solution procedure for type e simple assembly line balancing problem”. *Computers and Industrial Engineering*, 66:201–202. Citado na(s) pág(s). 26
- Gel et al. (2002)** E. S. Gel, W. J. Hopp e M. P. Van Oyen. Factors affecting opportunity of worksharing as a dynamic line balancing mechanism. *IIE Transactions*, 34:847–863. Citado na(s) pág(s). 30
- Gendreau et al. (1994)** M. Gendreau, A. Hertz e G. Laporte. A tabu search heuristic for the vehicle routing problem. *Management Science*, 40:1276–1290. Citado na(s) pág(s). 31
- Giordano (2000)** B. W. Giordano. *(d)eficiência e trabalho: analisando suas representações*. Anablume: FAPESP, São Paulo. Citado na(s) pág(s). 2
- Gökçen e Agpak (2006)** H. Gökçen e K. Agpak. A goal programming approach to simple U-line balancing problem. *European Journal of Operational Research*, 171:577–585. Citado na(s) pág(s). 28
- Gökçen et al. (2005)** H. Gökçen, A. Kürsat, C. Gencer e E. Kizilkaya. A shortest route formulation of simple U-type assembly line balancing problem. *Applied Mathematical Modelling*, 29:373–380. Citado na(s) pág(s). 28
- Gonçalves e Almeida (2002)** J. F. Gonçalves e J. R. Almeida. A hybrid genetic algorithm for assembly line balancing. *Journal of Heuristics*, 8:629–642. Citado na(s) pág(s). 25
- Gurevsky et al. (2013)** E. Gurevsky, Ö. Hazır, O. Battaia e A. Dolgui. Robust balancing of straight assembly lines. *Journal of the Operational Research Society*, 64:1607–1613. Citado na(s) pág(s). 27, 53
- Gutjahr e Nemhauser (1964)** A. L. Gutjahr e G. L. Nemhauser. An algorithm for the line balancing problem. *Management Science*, 11:308–315. Citado na(s) pág(s). 24
- Hackman et al. (1989)** S. T. Hackman, M. J. Magazine e T. S. Wee. Fast, effective algorithms for the simple assembly line balancing problems. *Operations Research*, 37:916–924. Citado na(s) pág(s). 26

- Hazır e Dolgui (2013)** Ö. Hazır e A. Dolgui. Assembly line balancing under uncertainty: Robust optimization models and exact solution method. *Computers & Industrial Engineering*, 65:261–267. Citado na(s) pág(s). 27, 53
- Hazır e Dolgui (2015)** Ö. Hazır e A. Dolgui. A decomposition based solution algorithm for U-type assembly line balancing with interval data (accepted for publication). *Computers & Operations Research*, 1–20. Citado na(s) pág(s). 27
- Hazır et al. (2011)** Ö. Hazır, E. Erel e Y. Günalay. Robust optimization models for the discrete time/cost trade-off problem. *International Journal of Production Economics*, 130:87–95. Citado na(s) pág(s). 53
- Heinrici (1994)** A. Heinrici. Comparison between simulated annealing and tabu search with an example from the production planning. Em H. Dyckhoff, editor, *Operations Research Proceedings*, 498–503, Berlin. Springer. Citado na(s) pág(s). 25, 26
- Held et al. (1963)** M. Held, R. M. Karp e R. Shareshian. Assembly line balancing - dynamic programming with precedence constraints. *Operations Research*, 11:442–459. Citado na(s) pág(s). 24
- Hoffmann (1963)** T. R. Hoffmann. Assembly line balancing with a precedence matrix. *Management Science*, 9:551–562. Citado na(s) pág(s). 25
- Hoffmann (1990)** T. R. Hoffmann. Assembly line balancing: a set of challenging problems. *International Journal of Production Research*, 28:1807–1815. Citado na(s) pág(s). 25
- Hoffmann (1992)** T. R. Hoffmann. Eureka: a hybrid system for assembly line balancing. *Management Science*, 38:39–47. Citado na(s) pág(s). 24, 25
- Hop (2006)** N.V. Hop. A heuristic solution for fuzzy mixed-model line balancing problem. *European Journal of Operational Research*, 168:798–810. Citado na(s) pág(s). 27
- Hopp et al. (2004)** W. J. Hopp, E. Tekin e M. P. Van Oyen. Benefits of skill chaining in serial production lines with cross-trained workers. *Management Science*, 50:83–98. Citado na(s) pág(s). 30
- Hurkens (2009)** C. A. J. Hurkens. Incorporating the strength of MIP modeling in schedule construction. *RAIRO - Operations Research*, 43:409–420. Citado na(s) pág(s). 30
- Hwang et al. (2008)** R. K. Hwang, H. Katayama e M. Gen. U-shaped assembly line balancing problem with genetic algorithm. *International Journal of Production Research*, 46:4637–4649. Citado na(s) pág(s). 28
- ILO (2007a)** International Labour Organization - ILO. *The employment situation of people with disabilities: towards improved statistical information*. International Labour Organization. Citado na(s) pág(s). 1
- ILO (2007b)** International Labour Organization - ILO. Replicating success: a handbook and manual on alleviating poverty through peer training. Relatório técnico, International Labour Organization, Geneva, Switzerland. Citado na(s) pág(s). 2
- Jackson (1956)** J. R. Jackson. A computing procedure for a line balancing problem. *Management Science*, 2:261–271. Citado na(s) pág(s). 24
- Johnson (1988)** R. V. Johnson. Optimally balancing large assembly lines with 'FABLE'. *Management Science*, 34:240–253. Citado na(s) pág(s). 24
- Kalimullah e de Klerk (2008)** N. A. Kalimullah e T. de Klerk. Encompassing all: impact study of the PSID program of BPKS. Relatório técnico, Protibandhi Kallyan Somity, Dhaka, Bangladesh. Citado na(s) pág(s). 2

- Kilincei (2010)** O. Kilincei. A Petri net-based heuristic for simple assembly line balancing problem of type 2. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 46:329–338. Citado na(s) pág(s). 26
- Kilincei e Bayhan (2006)** O. Kilincei e G. M. Bayhan. A Petri net approach for simple assembly line balancing problems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 30:1165–1173. Citado na(s) pág(s). 26
- Kilincei e Bayhan (2008)** O. Kilincei e G. M. Bayhan. A P-invariant-based algorithm for simple assembly line balancing problem of type-1. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 37:400–409. Citado na(s) pág(s). 26
- Kim et al. (1996)** Y. K. Kim, Y. J. Kim e Y. Kim. Genetic algorithms for assembly line balancing with various objectives. *Computers & Industrial Engineering*, 30:397–409. Citado na(s) pág(s). 26
- Kim et al. (2000)** Y. K. Kim, Y. Kim e Y. J. Kim. Two-sided assembly line balancing: a genetic algorithm approach. *Production Planning and Control*, 11:44–53. Citado na(s) pág(s). 25
- Klein e Scholl (1996)** R. Klein e A. Scholl. Maximizing the production rate in simple assembly line balancing - a branch and bound procedure. *European Journal of Operational Research*, 2217:367–385. Citado na(s) pág(s). 26
- Koltai et al. (2014)** T. Koltai, V. Tatay e N. Kalló. Application of the results of simple assembly line balancing models in practice: the case of a bicycle manufacturer. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 27:887–898. Citado na(s) pág(s). 30
- Kubiak (1993)** W. Kubiak. Minimizing variations of production rates in just-in-time systems: a survey. *European Journal of Operational Research*, 66:259–271. Citado na(s) pág(s). 81
- Kubiak e Sethi (1991)** W. Kubiak e S. Sethi. A note on level schedules for mixed-model assembly lines in just-in-time production systems. *Management Science*, 37:121–122. Citado na(s) pág(s). 81
- Kuijjer et al. (1999)** P. P. Kuijjer, B. Visser e H. C. Kemper. Job rotation as a factor in reducing physical workload at a refuse collecting department. *Ergonomics*, 42:1167–1178. Citado na(s) pág(s). 18
- Lapierre et al. (2006)** S. D. Lapierre, A. Ruiz e P. Soriano. Balancing assembly lines with tabu search. *European Journal of Operational Research*, 168:826–837. Citado na(s) pág(s). 25
- Lebacque et al. (2007)** V. Lebacque, V. Jost e N. Brauner. Simultaneous optimization of classical objectives in JIT sequencing. *European Journal of Operational Research*, 182:29–39. Citado na(s) pág(s). 81
- Lemos e Fogliato (2003)** F. Lemos e F. Fogliato. Implantação de layout tipo “U” na linha de produção de uma empresa de pequeno porte. Em *Anais do XXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, Ouro Preto, Brasil. Citado na(s) pág(s). 65
- Li e Womer (2009)** H. Li e K. Womer. Scheduling projects with multi-skilled personnel by a hybrid MILP/CP benders decomposition algorithm. *Journal of Scheduling*, 12:281–298. Citado na(s) pág(s). 30
- Liu et al. (2005)** S. B. Liu, H. L. Ong e H. C. Huang. A bidirectional heuristic for stochastic assembly line balancing Type II problem. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 25:71–77. Citado na(s) pág(s). 27
- Lobato (2009)** B. C. Lobato. *Pessoas com deficiência no mercado de trabalho: implicações da lei de cotas*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de São Carlos. Citado na(s) pág(s). 1, 2, 3

- Lu et al. (2014)** C.-C. Lu, K.-C. Ying e S.-W. Lin. Robust single machine scheduling for minimizing total flow time in the presence of uncertain processing times. *Computers & Industrial Engineering*, 74:102–110. Citado na(s) pág(s). [53](#)
- Mansoor (1968)** E. M. Mansoor. Assembly line balancing: a heuristic algorithm for variable operator performance levels. *Journal of Industrial Engineering*, 19:618–629. Citado na(s) pág(s). [30](#)
- Michalos et al. (2010)** G. Michalos, S. Makris, L. Rentzos e G. Chrysosolouris. Dynamic job rotation for workload balancing in human based assembly systems. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2:153–160. Citado na(s) pág(s). [18](#)
- Miltenburg (1989)** J. Miltenburg. Level schedules for mixed-model assembly lines in Just-in-Time production systems. *Management Science*, 35:192–207. Citado na(s) pág(s). [79](#), [80](#)
- Miltenburg (1998)** J. Miltenburg. Balancing U-lines in a multiple U-line facility. *European Journal of Operational Research*, 109:1–23. Citado na(s) pág(s). [28](#)
- Miltenburg (2000)** J. Miltenburg. The effect of breakdowns on U-shaped production lines. *International Journal of Production Research*, 38:353–364. Citado na(s) pág(s). [27](#)
- Miltenburg (2001a)** J. Miltenburg. One-piece flow manufacturing on U-shaped production lines: a tutorial. *IIE Transactions*, 33:303–321. Citado na(s) pág(s). [29](#), [65](#)
- Miltenburg (2001b)** J. Miltenburg. U-shaped production lines: A review of theory and practice. *International Journal of Production Economics*, 70:201–214. Citado na(s) pág(s). [17](#), [27](#)
- Miltenburg e Sparling (1995)** J. Miltenburg e D. Sparling. Optimal solution algorithms for the U-line balancing problem. Relatório técnico, McMaster University, Hamilton, Canada. Citado na(s) pág(s). [27](#)
- Miltenburg e Wijngaard (1994)** J. Miltenburg e J. Wijngaard. The U-line balancing problem. *Management Science*, 40:1378–1388. Citado na(s) pág(s). [17](#), [27](#)
- Miralles et al. (2005)** C. Miralles, J. P. Garcia e C. Andres. Application of U-lines principles to the assembly line worker assignment and balancing problem (UALWABP). A model and a solving procedure. Em *Proceedings of the Operational Research Peripatetic Postgraduate Programme International Conference ORP3*, Valência, Espanha. Citado na(s) pág(s). [17](#), [32](#), [33](#), [65](#)
- Miralles et al. (2007)** C. Miralles, J. P. García-Sabater, C. Andrés e M. Cardos. Advantages of assembly lines in sheltered workcentres for disabled. A case study. *International Journal of Production Economics*, 110:187–197. Citado na(s) pág(s). [13](#), [14](#), [18](#), [31](#), [33](#), [35](#), [53](#)
- Miralles et al. (2008)** C. Miralles, J. P. García-Sabater, C. Andrés e M. Cardos. 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. Citado na(s) pág(s). [31](#), [33](#)
- Miralles et al. (2010)** C. Miralles, J. A. Marin-Garcia, G. Ferrus e A. M. Costa. Operations research/management science tools for integrating people with disabilities into employment. A study on Valencia's sheltered work centres for disabled. *International Transactions in Operational Research*, 17:457–473. Citado na(s) pág(s). [31](#)
- Mitra (2008)** S. Mitra. The recent decline in the employment of persons with disabilities in South Africa. *South African Journal of Economics*, 76:480–492. Citado na(s) pág(s). [1](#)
- Monden (1983)** Y. Monden. *Toyota production system: practical approach to production management*. Industrial Engineering and Management Press, Boca Ratón, 1st ed. Citado na(s) pág(s). [81](#)

- Monden (1998)** Y. Monden. *Toyota production system - An integrated approach to just-in-time*. Kluwer, Dordrecht, 3rd ed. Citado na(s) pág(s). [17](#)
- Moon e Yao (2011)** Y. Moon e T. Yao. A robust mean absolute deviation model for portfolio optimization. *Computers & Operations Research*, 38:1251–1258. Citado na(s) pág(s). [53](#)
- Moreira e Costa (2009)** M. C. O. Moreira e A. M. Costa. A minimalist yet efficient tabu search algorithm for balancing assembly lines with disabled workers. Em *Anais do XLI SBPO*, 660–671, Porto Seguro, Brasil. Citado na(s) pág(s). [14](#), [31](#), [33](#)
- Moreira e Costa (2013)** M. C. O. Moreira e A. M. Costa. Hybrid heuristics for planning job rotation schedules in assembly lines with heterogeneous workers. *International Journal of Production Economics*, 141:552–560. Citado na(s) pág(s). [32](#), [33](#), [91](#)
- Moreira et al. (2009)** M. C. O. Moreira, L. M. R. Santos e A. M. Costa. Trabalhadores com deficiência em linhas de produção: modelo, resultados e discussões. Em *Anais da XIV Escuela Latinoamericana de Investigacion Operativa*, El Fuerte, México. Citado na(s) pág(s). [21](#), [32](#), [35](#)
- Moreira et al. (2012)** M. C. O. Moreira, M. Ritt, A. M. Costa e A. A. Chaves. Simple heuristics for the assembly line worker assignment and balancing problem. *Journal of Heuristics*, 18:505–524. Citado na(s) pág(s). [31](#), [33](#), [84](#), [85](#)
- Morrison et al. (2014)** D. R. Morrison, E. C. Sewell e S. H. Jacobson. An application of the branch, bound, and remember algorithm to a new simple assembly line balancing dataset. *European Journal of Operational Research*, 236:403–409. Citado na(s) pág(s). [25](#)
- Mutlu et al. (2013)** Ö. Mutlu, O. Polat e A. A. Supciller. An iterative genetic algorithm for the assembly line worker assignment and balancing problem of type-II. *Computers & Operations Research*, 40:418–426. Citado na(s) pág(s). [31](#), [33](#)
- Nakade e Nishiwaki (2008)** K. Nakade e R. Nishiwaki. Optimal allocation of heterogeneous workers in a U-shaped production line. *Computers & Industrial Engineering*, 54:432–440. Citado na(s) pág(s). [68](#)
- Nakade e Ohno (1999)** K. Nakade e K. Ohno. An optimal worker allocation problem for a U-shaped production line. *International Journal of Production Economics*, 60-61:353–358. Citado na(s) pág(s). [29](#), [68](#)
- Nakade e Ohno (2003)** K. Nakade e K. Ohno. Separate and carousel type allocations of workers in a U-shaped production line. *European Journal of Operational Research*, 145:403–424. Citado na(s) pág(s). [29](#), [91](#), [92](#)
- Nearchou (2007)** A. C. Nearchou. Balancing large assembly lines by a new heuristic based on differential evolution method. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 34: 1016–1029. Citado na(s) pág(s). [26](#)
- Nembhard e Norman (2006)** D. A. Nembhard e B. A. Norman. Cross-training in production systems with human learning and forgetting. Em Adedeji B. . Badiru, editor, *Handbook of industrial and systems engineering*, 1–13. CRC Press, New York. Citado na(s) pág(s). [29](#)
- Nkasu e Leung (1995)** M.M. Nkasu e K.H. Leung. A stochastic approach to assembly line balancing. *International Journal of Production Research*, 33:975–991. Citado na(s) pág(s). [27](#)
- Nourie e Venta (1991)** F. J. Nourie e E. R. Venta. Finding optimal line balances with OptPack. *Operations Research Letters*, 10:165–171. Citado na(s) pág(s). [24](#)
- OECD (2003)** Organisation for Economic Co-operation and Development - OECD. *Transforming disability into ability policies to promote work and income security for disabled people*. OECD Publishing. Citado na(s) pág(s). [1](#)

- Otto e Otto (2014)** A. Otto e C. Otto. How to design effective priority rules: example of simple assembly line balancing. *Computers & Industrial Engineering*, 69:43–52. Citado na(s) pág(s). 25, 59, 60
- Otto e Scholl (2013)** A. Otto e A. Scholl. Reducing ergonomic risks by job rotation scheduling. *OR Spectrum*, 35:711–733. Citado na(s) pág(s). 29
- Otto et al. (2013)** A. Otto, C. Otto e A. Scholl. Systematic data generation and test design for solution algorithms on the example of salbpge for assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 228:33–45. Citado na(s) pág(s). 25, 42, 43, 48, 57
- Ouchi (1981)** W. G. Ouchi. *Theory Z: how american business can meet the japanese challenge*. Addison-Wesley. Citado na(s) pág(s). 18
- Özcan e Toklu (2009)** U. Özcan e B. Toklu. Multiple-criteria decision-making in two-sided assembly line balancing: a goal programming and a fuzzy goal programming models. *Computers & Operations Research*, 36:1955–1965. Citado na(s) pág(s). 28
- Özcan et al. (2011)** U. Özcan, T. Kellegöz e B. Toklu. A genetic algorithm for the stochastic mixed-model u-line balancing and sequencing problem. *International Journal of Production Research*, 49:1605–1626. Citado na(s) pág(s). 27
- Paim (2006)** P. Paim. Estatuto da pessoa com deficiência, 2006. Citado na(s) pág(s). 1, 2
- Pape (2015)** T. Pape. Heuristics and lower bounds for the simple assembly line balancing problem type 1: Overview, computational tests and improvements. *European Journal of Operational Research*, 240:32–42. Citado na(s) pág(s). 23
- Pastor e Ferrer (2009)** R. Pastor e L. Ferrer. An improved mathematical program to solve the simple assembly line balancing problem. *International Journal of Production Research*, 47: 2943–2959. Citado na(s) pág(s). 25
- Patterson e Albracht (1975)** J. H. Patterson e J. J. Albracht. Assembly-line balancing: zero-one programming with fibonacci search. *Operations Research*, 23:166–172. Citado na(s) pág(s). 8, 9, 35, 55
- Peeters e Degraeve (2006)** M. Peeters e Z. Degraeve. An linear programming based lower bound for the simple assembly line balancing problem. *European Journal of Operational Research*, 168: 716–731. Citado na(s) pág(s). 24
- Pereira (2015)** J. Pereira. Empirical evaluation of lower bounding methods for the simple assembly line balancing problem. *International Journal of Production Research*, 53:3327–3340. Citado na(s) pág(s). 23
- Plans e Corominas (1999)** J. Plans e A. Corominas. Modelling and solving the SALBP-E problem. Em *Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning*, 356–360, Porto, Portugal. Citado na(s) pág(s). 26
- Ponnambalam et al. (1999)** S. G. Ponnambalam, P. Aravindan e G. M. Naidu. A comparative evaluation of assembly line balancing heuristics. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 15:577–586. Citado na(s) pág(s). 25
- Ponnambalam et al. (2000)** S. G. Ponnambalam, P. Aravindan e G. M. Naidu. A Multi-Objective Genetic Algorithm for Solving Assembly Line Balancing Problem. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 16:341–352. Citado na(s) pág(s). 58
- Porter e Kramer (2002)** M. E. Porter e M. R. Kramer. The competitive advantage of corporate philanthropy. *Harvard Business Review*, 80:56–68. Citado na(s) pág(s). 31

- Porter e Kramer (2006)** M. E. Porter e M. R. Kramer. Strategy and society: the link between competitive advantage and corporate social responsibility. *Harvard Business Review*, 84:78–92. Citado na(s) pág(s). 31
- Ritt e Costa (2013)** M. Ritt e A. M. Costa. A comparison of formulations for the simple assembly line balancing problem arxiv:1111.0934 [cs.dm]. 2013. Citado na(s) pág(s). 14, 16, 23
- Sabuncuoglu et al. (2000)** I. Sabuncuoglu, E. Erel e M. Tanyer. Assembly line balancing using genetic algorithm. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 11:295–310. Citado na(s) pág(s). 25
- Sabuncuoglu et al. (2009)** I. Sabuncuoglu, E. Erel e A. Alp. Ant colony optimization for the single model U-type assembly line balancing problem. *International Journal of Production Economics*, 120:287–300. Citado na(s) pág(s). 28
- Salveson (1955)** M. E. Salveson. The assembly line balancing problem. *Journal of Industrial Engineering*, 6:18–25. Citado na(s) pág(s). 23
- Scholl (1994)** A. Scholl. Ein B&B-Verfahren zu Abstimmung von Einprodukt-Fließbändern bei gegebener Stationsanzahl. Em H. Dyckhoff, editor, *Operations Research Proceedings*, 175–181, Berlin. Springer. Citado na(s) pág(s). 26
- Scholl (1999)** A. Scholl. *Balancing and sequencing of assembly lines*. Physica-Verlag. Citado na(s) pág(s). 5, 7, 8, 9, 11
- Scholl e Becker (2006)** A. Scholl e C. Becker. State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 168: 666–693. Citado na(s) pág(s). 7, 10, 11, 23, 24
- Scholl e Klein (1997)** A. Scholl e R. Klein. SALOME: a bidirectional branch-and-bound procedure for assembly line balancing. *INFORMS Journal on Computing*, 9:319–334. Citado na(s) pág(s). 24, 25, 28
- Scholl e Klein (1999a)** A. Scholl e R. Klein. Balancing assembly lines effectively - a computational comparison. *European Journal of Operational Research*, 114:50–58. Citado na(s) pág(s). 24, 26
- Scholl e Klein (1999b)** A. Scholl e R. Klein. ULINO: optimally balancing U-shaped JIT assembly lines. *International Journal of Production Research*, 37:721–736. Citado na(s) pág(s). 28
- Scholl e Voss (1996)** A. Scholl e S. Voss. Simple assembly line balancing—heuristic approaches. *Journal of Heuristics*, 2:217–244. Citado na(s) pág(s). xi, 4, 25, 26, 31, 38, 48, 57, 59, 69, 71, 74, 84, 105
- Schöniger e Spingler (1989)** J. Schöniger e J. Spingler. Planung der Montageanlage. *Technica*, 14:27–32. Citado na(s) pág(s). 23
- Seçkiner e Kurt (2007)** S. U. Seçkiner e M. Kurt. A simulated annealing approach to the solution of job rotation scheduling problems. *Applied Mathematics and Computation*, 188:31–45. Citado na(s) pág(s). 29
- Seçkiner e Kurt (2008)** S. U. Seçkiner e M. Kurt. Ant colony optimization for the job rotation scheduling problem. *Applied Mathematics and Computation*, 201:149–160. Citado na(s) pág(s). 29
- SERPRO (2004)** Serviço Federal de Processamento de Dados - SERPRO. <http://www.serpro.gov.br/noticias-antigas/noticias-2004/20041221> (acessado em 07 de abril de 2009), 2004. Citado na(s) pág(s). 1
- Sewell e Jacobson (2012)** E. C. Sewell e S. H. Jacobson. A branch, bound, and remember algorithm for the simple assembly line balancing problem. *INFORMS Journal on Computing*, 24:433–442. Citado na(s) pág(s). 24, 32

- Sheridan (1990)** J. Sheridan. World class manufacturing – Part I. *Industry Week*, 239:36–46. Citado na(s) pág(s). [27](#)
- Shewchuk (2008)** J. P. Shewchuk. Worker allocation in lean U-shaped production lines. *International Journal of Production Research*, 46:3485–3502. Citado na(s) pág(s). [29](#)
- Simonelli (2005)** A. P. Simonelli. *Desenvolvimento e sistematização de modelo de análise de tarefas industriais para inclusão de portadores de necessidades especiais no trabalho*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de São Carlos. Citado na(s) pág(s). [2](#)
- Simonelli (2009)** A. P. Simonelli. *Contribuições da análise da atividade e do modelo social para a inclusão no trabalho de pessoas com deficiência*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de São Carlos. Citado na(s) pág(s). [2](#)
- Simonelli et al. (2006)** A. P. Simonelli, D. S. Rodrigues e L. B. T. Soares. Caracterização do perfil de trabalhadores afastados e de pessoas com deficiência no mercado de trabalho do município de São Carlos. Em *Anais das XIV Jornadas de Jovens Pesquisadores da Associação de Universidades do Grupo Montevidéu*, Campinas, Brasil. Citado na(s) pág(s). [3](#)
- Sirovetnukul e Chutima (2010)** R. Sirovetnukul e P. Chutima. The impact of walking time on U-shaped assembly line worker allocation problems. *Engineering Journal*, 14. Citado na(s) pág(s). [29](#)
- Sivasankaran e Shahabudeen (2014)** P. Sivasankaran e P. Shahabudeen. Literature review of assembly line balancing problems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 73:1665–1694. Citado na(s) pág(s). [23](#)
- Solyalı et al. (2012)** O. Solyalı, J.-F. Cordeau e G. Laporte. Robust inventory routing under demand uncertainty. *Transportation Science*, 46:327–340. Citado na(s) pág(s). [53](#)
- Sparling (1998)** D. Sparling. Balancing JIT production units: the N U-line balancing problem. *Information Systems and Operational Research*, 36:215–237. Citado na(s) pág(s). [28](#)
- Sparling e Miltenburg (1998)** D. Sparling e J. Miltenburg. The mixed-model U-line balancing problem. *International Journal of Production Research*, 36:485–501. Citado na(s) pág(s). [28](#)
- Sprecher (1999)** A. Sprecher. A competitive branch-and-bound algorithm for the simple assembly line balancing problem. *International Journal of Production Research*, 37:1787–1816. Citado na(s) pág(s). [24](#)
- Sternatz (2014)** J. Sternatz. Enhanced multi-Hoffmann heuristic for efficiently solving real-world assembly line balancing problems in automotive industry. *European Journal of Operational Research*, 235:740–754. Citado na(s) pág(s). [25](#)
- Sungur e Yavuz (2014)** B. Sungur e Y. Yavuz. Assembly line balancing with hierarchical worker assignment (in press). *Journal of Manufacturing Systems*, 1–9. Citado na(s) pág(s). [33](#)
- Talbot et al. (1986)** F. B. Talbot, J. H. Patterson e W. V. Gehrlein. A comparative evaluation of heuristic line balancing techniques. *Management Science*, 32:430–454. Citado na(s) pág(s). [25](#)
- Tharmmaphornphilas e Norman (2004)** W. Tharmmaphornphilas e B. A. Norman. A quantitative method for determining proper job rotation intervals. *Annals of Operations Research*, 128:251–266. Citado na(s) pág(s). [29](#)
- Tharmmaphornphilas e Norman (2007)** W. Tharmmaphornphilas e B. A. Norman. A methodology to create robust job rotation schedules. *Annals of Operations Research*, 155:339–360. Citado na(s) pág(s). [29](#)

- Timmons et al. (2006)** J. Timmons, M. Mack, A. Sims, R. Hare e J. Wills. Paving the way to work: a guide to career-focused mentoring for youth with disabilities. Relatório técnico, National Collaborative on Workforce and Disability for Youth, Institute for Educational Leadership, Washington, USA. Citado na(s) pág(s). [2](#)
- Toksarı et al. (2010)** M. Toksarı, S. İşleyen, E. Güner e Ö. Baykoç. Assembly line balancing problem with deterioration tasks and learning effect. *Expert Systems with Applications*, 37: 1223–1228. Citado na(s) pág(s). [27](#)
- Toldrá (2009)** R.C. Toldrá. Políticas afirmativas: opinião das pessoas com deficiência acerca da legislação de reserva de vagas no mercado trabalho. *Revista Terapia Ocupacional da Universidade de São Paulo*, 20:110–117. Citado na(s) pág(s). [2](#)
- Tsujimura et al. (1995)** Y. Tsujimura, M. Gen e E. Kubota. Solving fuzzy assembly-line balancing problem with genetic algorithms. *Computers & Industrial Engineering*, 29:543–547. Citado na(s) pág(s). [27](#)
- Ugurdag et al. (1997)** H. F. Ugurdag, R. Rachamadugu e C. A. Papachristou. Designing paced assembly lines with fixed number of stations. *European Journal of Operational Research*, 102: 488–501. Citado na(s) pág(s). [26](#)
- UN (2006)** United Nations - UN. Convention on the rights of persons with disabilities. Relatório técnico, United Nations, New York, USA. Citado na(s) pág(s). [2](#)
- Urban (1998)** T. L. Urban. Optimal balancing of U-shaped assembly lines. *Management Science*, 44:738–741. Citado na(s) pág(s). [17](#), [27](#), [28](#), [65](#), [66](#), [67](#), [70](#)
- Urban e Chiang (2006)** T. L. Urban e W.-C. Chiang. An optimal piecewise-linear program for the U-line balancing problem with stochastic task times. *European Journal of Operational Research*, 168:771–782. Citado na(s) pág(s). [27](#)
- Vilà e Pereira (2014)** M. Vilà e J. Pereira. A branch-and-bound algorithm for assembly line worker assignment and balancing problems. *Computers & Operations Research*, 44:105–114. Citado na(s) pág(s). [32](#), [33](#)
- Watanabe et al. (1995)** T. Watanabe, Y. Hashimoto, I. Nishikawa e H. Tokumaru. Line balancing using a genetic evolution model. *Control Engineering Practice*, 3:69–76. Citado na(s) pág(s). [26](#)
- Wee e Magazine (1982)** T. S. Wee e M. J. Magazine. Assembly line balancing as generalized bin packing. *Operations Research Letters*, 1:56–58. Citado na(s) pág(s). [7](#), [9](#), [25](#)
- Wei e Chao (2011)** N. C. Wei e I.-M. Chao. A solution procedure for type E simple assembly line balancing problem. *Journal Computers & Industrial Engineering*, 61:824–830. Citado na(s) pág(s). [26](#)
- WHO e WBG (2011)** World Health Organization e World Bank Group - WHO e WBG. World report on disability. Relatório Técnico 17-18, World Health Organization and The World Bank, Geneva, Switzerland. Citado na(s) pág(s). [1](#), [2](#)
- Yeh e Kao (2009)** D. H. Yeh e H. H. Kao. Computers & Industrial Engineering. *A new bidirectional heuristic for the assembly line balancing problem*, 57:1155–1160. Citado na(s) pág(s). [26](#), [28](#)
- Zacharia e Nearchou (2012)** P. Zacharia e A. Nearchou. Multi-objective fuzzy assembly line balancing using genetic algorithms. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23:615–627. Citado na(s) pág(s). [27](#)

- Zacharia e Nearchou (2013)** P. Zacharia e A. Nearchou. A meta-heuristic algorithm for the fuzzy assembly line balancing type-E problem. *Computers & Operations Research*, 40:3033–3044. Citado na(s) pág(s). 27
- Zäpfel (1975)** G. Zäpfel. *Ausgewählte fertigungswirtschaftliche Optimierungsprobleme von Fließfertigungssystemen*. Beuth, Berlin. Citado na(s) pág(s). 26
- Zheng et al. (2012)** Q. X. Zheng, Y. X. Li, M. Li e Q. H. Tang. An improved ant colony optimization for large-scale simple assembly line balancing problem of type-1. *Applied Mechanics and Materials*, 159:51–55. Citado na(s) pág(s). 25