

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE INFORMÁTICA
BACHARELADO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

FÁBIO DA FONTOURA BELTRÃO

**Balanceamento de Linhas de Produção com
Trabalhadores Deficientes Considerando
Aspectos Ergonômicos**

Trabalho de Conclusão apresentado como
requisito parcial para a obtenção do grau de
Bacharel em Ciência da Computação

Prof. Dr. Marcus Ritt
Orientador

Porto Alegre, Julho de 2013

CIP – CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO

Fábio da Fontoura Beltrão,

Balanceamento de Linhas de Produção com Trabalhadores Deficientes Considerando Aspectos Ergonômicos /

Fábio da Fontoura Beltrão. – Porto Alegre: UFRGS, 2013.

42 f.: il.

Trabalho de Conclusão – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. BACHARELADO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO, Porto Alegre, BR–RS, 2013. Orientador: Marcus Ritt.

1. SALBP. 2. ALWABP. 3. Ergonomia. I. Ritt, Marcus.
II. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Prof. Carlos Alexandre Netto

Pró-Reitor de Graduação: Prof. Sérgio Roberto Kieling Franco

Diretor do Instituto de Informática: Prof. Luís da Cunha Lamb

Coordenador da Ciência da Computação: Prof. Raul Fernando Weber

Bibliotecária-chefe do Instituto de Informática: Beatriz Regina Bastos Haro

“Time flies like an arrow; fruit flies like a banana.”

— GROUCHO MARX ¹

¹Citação possivelmente mal atribuída

AGRADECIMENTOS

Para a minha família que sempre me apoiou.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	6
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABELAS	8
LISTA DE ALGORITMOS	9
RESUMO	10
1 INTRODUÇÃO	11
2 BALANCEAMENTO DE LINHAS DE PRODUÇÃO HOMOGÊNEAS .	14
3 BALANCEAMENTO DE LINHAS DE PRODUÇÃO HETEROGÊNEAS	17
4 ESTIMATIVA DE RISCOS ERGONÔMICOS	21
4.1 Incorporando ergonomia ao SALBP	24
4.2 Heurística em duas etapas para resolver ErgoSALBP	25
4.3 Incorporando ergonomia ao ALWABP	26
5 SOLUÇÃO HEURÍSTICA PARA O ERGOALWABP	27
5.1 Reprodução da solução para ErgoSALBP	27
5.2 Expansão da solução para ErgoALWABP	29
6 TESTES COMPUTACIONAIS	31
6.1 ErgoSALBP	31
6.2 ErgoALWABP	33
6.2.1 Testes com relaxamento fixo em 8%	36
7 CONCLUSÃO	41
BIBLIOGRAFIA	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALBP	Assembly line balancing problem
SALBP	Simple assembly line balancing problem
ALWABP	Assembly line worker assignment and balancing problem
SA	Simulated annealing
OCRA	Occupational Repetitive Action

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1:	Grafo de precedências.	15
Figura 2.2:	Solução para SALBP-1 da instância representada pela Figura 2.1 com $c = 7$	16
Figura 3.1:	Grafo de Precedências para uma linha com 25 tarefas	19
Figura 6.1:	ErgoALWABP-A	34
Figura 6.2:	ErgoALWABP-S	35
Figura 6.3:	Relaxamento Efetivo x Relaxamento de Fato	37
Figura 6.4:	Relação entre a melhora na média dos índices (A) e a melhora na distribuição dos riscos (S) para o ErgoALWABP-A (A de <i>Average</i>) . .	38
Figura 6.5:	Relação entre a melhora na média dos índices (A) e a melhora na distribuição dos riscos (S) para o ErgoALWABP-S (S de <i>Smoothing</i>) .	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1:	Tempos de execução de cada tarefa, para cada trabalhador	18
Tabela 3.2:	Solução para o problema ALWABP-2 definido pela Figura 3.1 e pela Tabela 3.1	20
Tabela 4.1:	Valores para os multiplicadores PM e AdM	22
Tabela 4.2:	Valores para o multiplicador FoM	22
Tabela 4.3:	Exemplo de linha de montagem, levando em consideração aspectos ergonômicos. Tempo de ciclo $c = 7$	23
Tabela 6.1:	Resultados da otimização de ErgoSALBP para 7155 instâncias. Funções objetivo A (<i>Average</i>) e S (<i>Smoothing</i>)	32
Tabela 6.2:	Resultados da otimização de ErgoALWABP para 4320 instâncias. Funções objetivo A (<i>Average</i>) e S (<i>Smoothing</i>)	37

LISTA DE ALGORITMOS

1 Pseudo-código para *simulated annealing* 28

RESUMO

Balanceamento de linhas de produção é um problema que visa atribuir tarefas, que precisam satisfazer precedências, às estações de trabalho de modo a minimizar o número de estações de trabalho ou maximizar a taxa de produção. Em linhas de produção que incluem trabalhadores diferentes o problema é ainda mais difícil porque os trabalhadores têm competências variadas e conseqüentemente tempos de execução de tarefas diferentes. Recentemente foi proposto por Otto e Scholl (2011) a inclusão de aspectos de ergonomia no problema de balanceamento. A consideração de tais aspectos em linhas com trabalhadores deficientes é ainda mais importante, mas por enquanto não foi tratado na literatura, até onde sabemos. Este trabalho explora este problema combinado e propõe uma heurística *simulated annealing* para solucioná-lo, obtendo resultados satisfatórios de forma eficiente.

Palavras-chave: SALBP, ALWABP, ergonomia.

1 INTRODUÇÃO

Uma linha de produção é um sistema de fabricação em massa de produtos, ainda muito utilizado na indústria. Em uma linha de produção, o processo de manufatura de um determinado item é dividido em várias etapas, e o produto é produzido de forma incremental e sequencial, em que cada etapa agrega um pouco mais ao produto e passa ele adiante na linha para a próxima etapa. A linha de produção é composta por estações de trabalho, que serão chamadas simplesmente de *estações*, dispostas linearmente. Cada estação é responsável por uma etapa da fabricação do produto, e após completar esta etapa, passa o produto incompleto para a próxima estação. Da última estação irá resultar o produto final. O processo de fabricação de um determinado item é subdividido em diversas *tarefas*, que são as unidades básicas do processo. As tarefas obedecem restrições de precedência, em que algumas só podem ser executadas após uma ou mais outras tarefas terem sido executadas. Cada tarefa tem também um *tempo de execução*, que é o tempo necessário para realizá-la. A cada estação de trabalho são atribuídas uma ou mais tarefas, obviamente respeitando a ordem de precedência. Tarefas dependentes de outras não podem ser atribuídas a estações anteriores às das tarefas das quais dependem, no máximo podem ser atribuídas à mesma estação. A soma dos tempos de execução de todas as tarefas de uma estação determina a *carga* desta estação, e a estação com o maior tempo de carga determina o *tempo de ciclo* de toda a linha. O tempo de ciclo, por sua vez, significa a taxa de produção da linha, é o tempo que ela leva para gerar cada novo produto.

As vantagens de utilizar uma linha de produção para fabricação em massa são inúmeras. O uso deste sistema promove uma maior organização dos recursos, tanto materiais quanto humanos, além de uma padronização na confecção de subpeças de um produto maior e a especialização da mão de obra. A padronização das peças é particularmente importante. Em um modo de produção mais tradicional, onde cada trabalhador é responsável pela concepção de todo o produto, existe uma maior tendência de personalizações de certas etapas da produção. A linha de produção, com a mão de obra especializada, promove intrinsecamente uma padronização de confecção de subprodutos, pois a cada etapa é necessário que o resultado da etapa anterior seja consistente em todas as execuções, senão é possível que não se consiga executar a etapa seguinte.

O emprego de linhas de produção na indústria traz algumas questões interessantes de organização dessas linhas. Perguntas como quantas estações são necessárias ou quais tarefas devem ser atribuídas a quais estações surgem durante a instalação de uma linha de produção. Devido a este problema, existe uma área de estudo em algoritmos voltada a solução do mesmo. Balanceamento de linhas de produção, ou ALBP (*Assembly line balancing problem*), é o nome que se dá ao problema mais genérico de otimização do uso de linhas de produção. O que exatamente se quer otimizar varia, assim como variam as restrições que devem ser modeladas no problema. Dependendo do objetivo da otimização

e das restrições impostas pelo modelo, existem diferentes categorias do ALBP (Boysen, Fliedner e Scholl 2007). Mais notavelmente o SALBP (*Simple ALBP*), que é a abstração mais simples do problema, e a que mais foge da realidade, mas ao mesmo tempo é a melhor pesquisada e desenvolvida e a mais madura, servindo de base para as variantes mais complexas e mais próximas da realidade. Como por exemplo, o ALWABP (*Assembly line worker assignment and balancing problem*), em que os trabalhadores que operam cada estação tem competências distintas e executam a mesma tarefa em tempos diferentes, enquanto no SALBP os trabalhadores são homogêneos.

De um modo geral, os problemas de balanceamento visam maximizar a taxa de produção ou minimizar o número de estações de trabalho, ambos objetivos que tem por finalidade aumentar o lucro, ou através de uma produção mais rápida, ou através do emprego de menos recursos. Em linhas de produção não automatizadas, ou seja que envolvem trabalhadores humanos fazendo trabalho manual ou operando máquinas, esses modelos de otimização não se preocupam com a saúde dos trabalhadores. Existem na indústria métodos para estimar o risco ergonômico causado pelas condições de trabalho dos empregados, e esses métodos já são empregados para garantir a segurança de operários em linhas de produção mecanizadas, ou até mesmo para aqueles que executam trabalhos manuais que possam exigir um maior esforço muscular ou posições prejudiciais para articulações e outras estruturas corporais. Há também um avanço na legislação no que diz respeito à normas que regulamentem a situação destes trabalhadores, e empresas de grande porte já ficam na expectativa de, caso a estimativa de risco ergonômico seja desfavorável para seus empregados, reavaliar sua linha de produção e reatribuir tarefas para melhor acomodar a saúde dos operários. A melhoria nas condições de trabalho não é só de interesse, obviamente, dos próprios empregados da empresa, e das leis que os protegem, como também dos empresários. A longo prazo, condições ruins de trabalho acarretam em descontentamento dos trabalhadores, baixa na produção e licenças médicas mais frequentes por parte dos empregados. Por isso, organizar uma linha de montagem para ter a maior taxa de produção possível, ao mesmo tempo em que garante condições favoráveis a saúde dos trabalhadores é de extrema importância para todas as partes, empregados e empregadores. Contudo, existem muito poucos trabalhos na literatura que tentam aliar ambos os fatores. Recentemente Otto e Scholl (2011) publicaram um artigo que incorpora um método de estimativa de riscos ergonômicos ao SALBP, com resultados muito interessantes.

Existem linhas de produção que empregam trabalhadores portadores de deficiências, e nessas linhas é ainda mais importante que se tenha preocupação com a saúde destes empregados. É preciso um modelo mais complexo que o SALBP para tratar destas linhas de produção, pois cada trabalhador lida com incapacidades diferentes, fazendo com que diferentes trabalhadores tenham diferentes competências na execução das mesmas tarefas. Como mencionado anteriormente, existe uma categoria de balanceamento de linhas, o ALWABP, que trata justamente destas discrepâncias. De fato, a utilização mais comum do ALWABP é para otimizar a redistribuição de tarefas em linhas de produção operadas por portadores de deficiência. Neste trabalho, é incorporado um cálculo de risco ergonômico, utilizando o índice OCRA (*Occupational Repetitive Action*), ao ALWABP e proposta uma solução utilizando *simulated annealing* para rebalancear uma linha de produção de modo a diminuir o risco à saúde dos trabalhadores comprometendo o mínimo possível a taxa de produção. Os resultados mostram que é possível diminuir em até 11% dos riscos, diminuindo a taxa de produção em no máximo 8% e em 5% na média.

Este trabalho é organizado da seguinte maneira. No Capítulo 2 é definido formalmente o problema clássico SALBP, além de serem sintetizadas as soluções mais conhecidas para

o problema. No Capítulo 3 o problema específico ALWABP é definido, assim como são abordadas algumas soluções para ele. No Capítulo 4 é explicado o conceito de ergonomia em linhas de produção, é definido um cálculo para estimativa de riscos ergonômicos, o OCRA. Além disto são definidos os problemas ErgoSALBP e ErgoALWABP, que introduzem ergonomia nos problemas explicados anteriormente. Uma breve explicação sobre a uma solução para o ErgoSALBP também é apresentada. No Capítulo 5 é explicada a solução proposta para resolver o ErgoALWABP e como ela foi desenvolvido. Após, no Capítulo 6 são apresentados os testes computacionais realizadas assim como os resultados obtidas. Os resultados são analisados e algumas conclusões são extraídas. Finalmente, no Capítulo 7 alguns pensamentos finais concluem a contribuição aqui dada.

2 BALANCEAMENTO DE LINHAS DE PRODUÇÃO HOMOGÊNEAS

Em balanceamento de linhas de produção, o problema mais pesquisado, desenvolvido e amadurecido é certamente o SALBP (Scholl e Becker 2003). Ele é a abstração mais simples e menos realista do problema. Mesmo assim, o grande foco empregado em encontrar soluções eficientes para o SALBP serve de base para o estudo de problemas reais que surgem na indústria. A partir do SALBP, é possível adicionar restrições e condições à resolução do problema e aproveitar todo conhecimento acumulado sobre o SALBP para formular soluções para estes problemas mais complexos. O SALBP também padroniza algumas definições e nomenclaturas que são utilizadas por outras variantes.

A confecção do produto na linha de montagem é dividido em um conjunto de tarefas $V = 1, \dots, n$. Para cada tarefa j existe um tempo t_j necessário para executá-la. Além do tempo da tarefa, as tarefas devem obedecer uma ordem de precedência, então podemos modelar o conjunto V como um grafo de precedências, como por exemplo o da Figura 2.1. A linha de montagem é composta por m estações de trabalho, com cada uma recebendo ao menos uma tarefa. O conjunto de tarefas atribuídos à uma estação k determina sua carga e é denotado por S_k , e o tempo da estação é a o acumulado dos tempos de todas as tarefas a ela atribuídas, que chamaremos de $t(S_k) = \sum_{j \in S_k} t_j$. A estação k com o maior tempo $t(S_k)$ determina o tempo de ciclo c de toda a linha de montagem. As notações mencionadas acima podem ser utilizadas por outros tipos de ALBP, mas existem algumas especificidades em relação a elas que definem exatamente o SALBP: tempo de ciclo c fixo; tempo t_j de cada tarefa é um inteiro fixo e conhecido; m estações dispostas de forma linear. Além disso, algumas outras considerações que o SALBP assume: a linha produz um único produto; o processo de produção é conhecido; não há nenhuma restrição na atribuição de tarefas além das precedências; todas as estações são idênticas, com trabalhadores e tecnologias homogêneas. Finalmente, o objetivo do problema é maximizar a eficiência $E = \frac{t_{sum}}{m \times c}$ da linha, com respeito ao tempo total das tarefas $t_{sum} = \sum_{j=1}^n t_j$.

Dentro do próprio SALBP existem quatro diferentes variantes do problema, dependendo de quais dados são fornecidos e de quais dados se quer otimizar. Abaixo são listados e explicados cada um destes tipos.

SALBP-F Tempo de ciclo c e número de estações m são fixos, e o problema se resume em determinar se existe alguma configuração da linha de montagem que satisfaça, além das precedências, estes dois parâmetros.

SALBP-1 Tempo de ciclo c fixo e o objetivo é encontrar uma configuração que minimize o número de estações m .

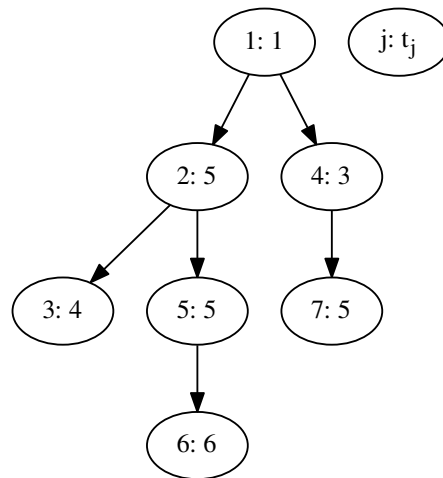


Figura 2.1: Grafo de precedências.

SALBP-2 O problema dual do SALBP-1, o número de estações m é fixo e o objetivo é minimizar o tempo de ciclo c .

SALBP-E A variante mais genérica não fornece nenhum dos parâmetros e o objetivo é minimizar simultaneamente o tempo de ciclo c e o número de estações m .

Entre os quatro tipos, o SALBP-1 é o mais desenvolvido em termos de pesquisa científica e elaboração de soluções. Até recentemente, o estado da arte contava com uma série de algoritmos exatos que utilizam *branch and bound* para encontrar soluções ótimas para quase todas as instâncias de um conjunto clássico de instâncias de SALBP. Além destes, existem outros algoritmos exatos que utilizam programação dinâmica, e também algumas soluções heurísticas, usando busca tabu ou algoritmos genéticos (Scholl e Becker 2003). Contudo, Sewell e Jacobson (2012) introduziram um algoritmo de *branch and bound* que usa memória para eliminar redundâncias. Este novo método é capaz de resolver todo o conjunto de instâncias clássicas de forma ótima, além de verificar a otimalidade, de forma eficiente. Atualmente, este algoritmo é o estado da arte para solução de SALBP-1. As soluções dos outros problemas basicamente utilizam a quantidade massiva de conhecimento que se tem sobre SALBP-1 aproveitando as melhores soluções deste problema. Qualquer solução exata de SALBP-1 pode ser modificada para solucionar SALBP-F, utilizando o tempo de ciclo c dado e restringindo as soluções para aceitar somente o número de estações m dado. A partir disto, soluções para SALBP-2 e SALBP-E são basicamente métodos de busca. SALBP-2 se transforma num problema de buscar entre vários possíveis c , o menor c que satisfaz SALBP-F para o dado m . Enquanto SALBP-E se resume a um problema de buscar entre várias combinações de c e m que satisfazem SALBP-F aquela que minimiza a eficiência $E = \frac{t_{sum}}{m \times c}$.

Nos capítulos que seguem será utilizado somente o SALBP-1. Portanto, utilizando o grafo de exemplo mostrado na Figura 2.1, e considerando desejável um tempo de ciclo $c = 7$, a Figura 2.2 mostra a única configuração ótima para esta instância do SALBP. É importante notar que tarefas podem estar na mesma estação de suas dependentes e não necessariamente em estações anteriores, mas que nunca podem estar em estações

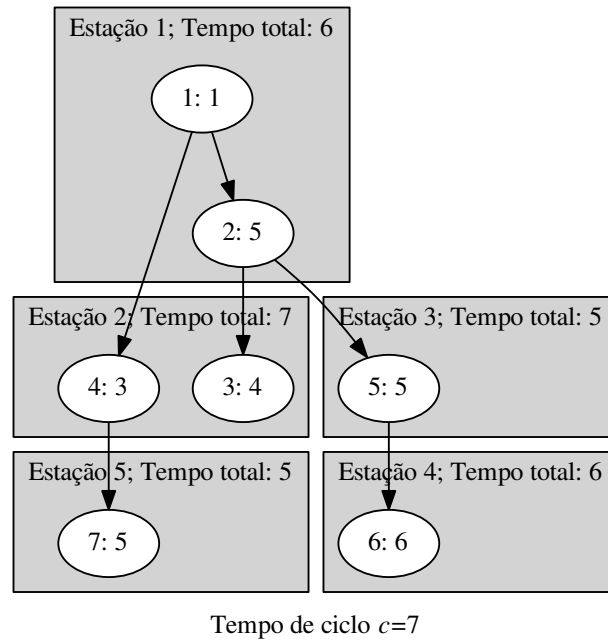


Figura 2.2: Solução para SALBP-1 da instância representada pela Figura 2.1 com $c = 7$

posteriores. Por esse motivo, e devido aos altos tempos das tarefas em relação ao tempo de ciclo, é impossível qualquer outra configuração com cinco ou até menos estações.

No que segue, o SALBP será importante para solução do problema que originou a motivação para o estudo aqui apresentado, além de servir como base para o entendimento do ALWABP, a ser definido no capítulo 3.

3 BALANCEAMENTO DE LINHAS DE PRODUÇÃO HETEROGÊNEAS

O SALBP é uma modelagem extremamente simplificada do problema de balanceamento de linhas de produção, e portanto muito pouco realista em relação aos requisitos que de fato aparecem na indústria. Conforme restrições, que retratam uma linha real, vão sendo introduzidas, o problema se torna mais complexo de ser resolvido. Uma destas restrições é a heterogeneidade dos trabalhadores que operam as estações da linha. No SALBP, é assumido que todos os trabalhadores tem as mesmas capacidades e, por isso, executam cada tarefa no mesmo tempo. Existem situações, porém, em que diferentes trabalhadores têm diferentes competências, e o tempo de execução t_j de uma tarefa j depende de qual trabalhador está executando esta tarefa. Geralmente isto ocorre em linhas de montagem que empregam trabalhadores portadores de deficiências, uma vez que as diferentes deficiências incapacitam as pessoas em diferentes tipos de atividades. Por isso, algumas atividades são muito mais difíceis, ou até mesmo impossíveis, para alguém com uma deficiência específica, enquanto podem ser executadas normalmente por outra pessoa que possui algum problema que não interfere nesta tarefa.

A diferença fundamental entre o SALPB e o ALWABP, em termos de definição, é que ao invés de cada tarefa j ter um tempo de execução t_j , agora cada tarefa terá um tempo de execução que depende do trabalhador w que a executa. Portanto, t_{wj} é o tempo que o trabalhador w leva para executar a tarefa j . Assim como no SALBP, o ALWABP também pode ser dividido em quatro problemas, variando os parâmetros e o objetivo. Utilizando a mesma nomenclatura, então, temos ALWABP-1, ALWABP-2, ALWABP-E e ALWABP-F. Mesmo que seja possível definir todas essas variantes, a que faz mais sentido é certamente o ALWABP-2, uma vez que a característica que define o problema é justamente a heterogeneidade dos trabalhadores. Se as capacidades dos trabalhadores é conhecida, isso significa que existe um número definido destes, e como cada trabalhador é alocado a uma estação de trabalho, conseqüentemente o número de estações também é conhecido. De fato, o problema que motivou a criação, definição e introdução do ALWABP à literatura era um problema desta natureza. Em um estudo feito por Miralles et al. (2007), sobre uma linha de produção em um local que empregava deficientes, na Espanha, onde cada trabalhador deveria operar uma estação de trabalho e o objetivo era maximizar a taxa de produção, foi definido o problema. Mais tarde foi proposta uma solução para este problema, utilizando um algoritmo *branch and bound*, que era capaz de resolver pequenas instâncias (Miralles et al. 2008). A partir daí, devido a complexidade em resolver instâncias maiores, começou a ser adotada uma abordagem utilizando heurísticas para tentar conseguir soluções próximas da ótima. Atualmente, o estado da arte é um algoritmo proposto por Blum e Miralles (2011). Eles utilizam uma heurística de *beam*

Tabela 3.1: Tempos de execução de cada tarefa, para cada trabalhador

Tarefa	Trabalhador 1	Trabalhador 2	Trabalhador 3	Trabalhador 4
1	4	3	1	4
2	3	1	2	1
3	9	8	1	3
4	5	3	2	2
5	9	1	5	7
6	4	-	-	4
7	8	1	5	6
8	7	4	3	7
9	5	1	3	-
10	1	-	1	1
11	3	1	-	1
12	1	1	1	1
13	5	3	2	5
14	3	1	3	2
15	5	1	1	-
16	3	1	3	2
17	13	9	-	6
18	5	1	1	5
19	2	2	-	1
20	3	1	3	1
21	7	5	2	1
22	5	2	-	5
23	3	-	3	-
24	8	6	7	-
25	4	4	1	3

search, e foram capazes de otimizar as melhores soluções encontradas por outros métodos anteriores.

Para ilustrar o problema, considere o grafo da Figura 3.1. Este grafo possui 25 nodos, logo, 25 tarefas, e é considerado uma instância pequena para ALBP. As precedências são simples e seguem uma certo fluxo bastante comportado conforme o índice da tarefa cresce.

Para montar este produto, serão empregados quatro trabalhadores, com diferentes deficiências e habilidades, que devem ser alocadas cada um à uma estação de trabalho. As estações estarão dispostas linearmente, então as tarefas atribuídas às estações independem de qual trabalhador estará operando aquela estação no que diz respeito às ordens de precedência, mas o conjunto de tarefas de uma estação contribui com um tempo de estação diferente dependendo de quem as está executando. Para identificar os diferentes tempos que cada trabalhador leva para terminar cada tarefa será utilizada a Tabela 3.1. Nesta tabela, um tempo de execução indicado por ‘-’ significa que aquele trabalhador não tem condições de executar aquela tarefa.

É necessário agora atribuir tarefas às estações e alocar os trabalhadores a estas estações de modo a minimizar o tempo de ciclo c . A solução ótima para esta instância é feita alocando o trabalhador 3 à primeira estação, e atribuir as tarefas $\{1, 2, 3, 4, 8, 9\}$ para ele, alocar o trabalhador 4 à segunda estação, e atribuir as tarefas $\{6, 7, 11, 13, 14, 20, 21\}$.

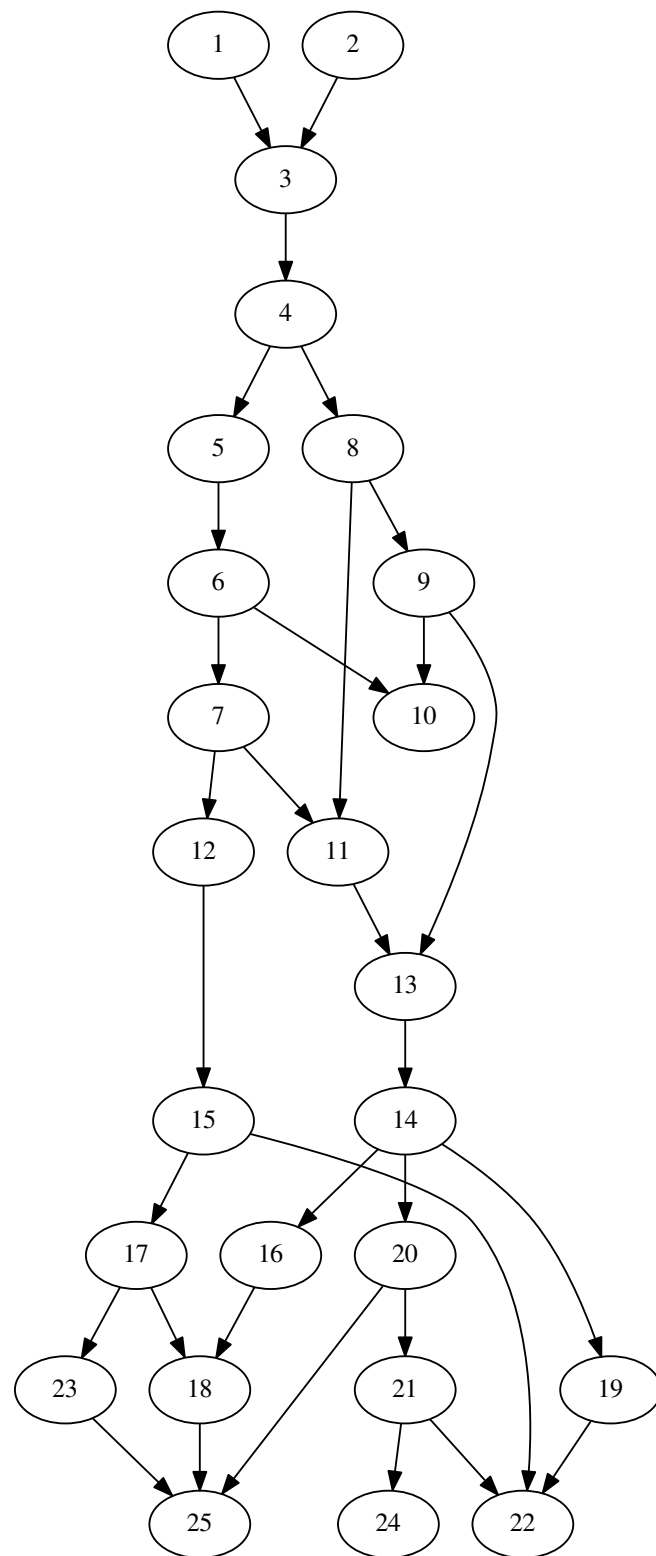


Figura 3.1: Grafo de Precedências para uma linha com 25 tarefas

Tabela 3.2: Solução para o problema ALWABP-2 definido pela Figura 3.1 e pela Tabela 3.1

Estação	Trabalhador alocado	Tarefas atribuídas	Tempo da estação
1	3	1, 2, 3, 4, 5, 8, 9	17
2	4	6, 7, 11, 13, 14, 20, 21	20
3	2	12, 15, 16, 17, 18, 19, 22	17
4	1	10, 23, 24, 25	16

O trabalhador 2 na terceira estação recebe as tarefas $\{12, 15, 16, 17, 18, 22\}$, enquanto o trabalhador 1 recebe as tarefas $\{10, 23, 24, 25\}$ na estação 4. Finalmente, a Tabela 3.2, mostra estas alocações e atribuições, assim como o tempo de estação para cada uma. Portanto o tempo de ciclo acaba sendo $c = 17$. É interessante que existe muito pouco tempo inutilizado nesta solução, uma estação ocupa o tempo máximo de ciclo $c = 20$. Duas das outras estações tem um tempo ocioso de apenas 3 unidades de tempo, e a última, mais ociosa, com 4. Isto é comum de acontecer em subproblemas do tipo 2, quando se quer minimizar o c , pois a tendência é fazer o balanceamento máximo entre todas as estações disponíveis, o que resulta em estações com tempos muito próximos entre si e muito próximos ou iguais ao maior tempo. Esta característica não é necessariamente comum em subproblemas do tipo 1. Com o tempo de ciclo definido e o objetivo de minimizar o número de estações, o que pode acontecer é de algumas estações ficarem saturadas, concentrando o máximo do tempo total das tarefas, enquanto as demais ficam com um tempo de sobra considerável, em alguns casos com até metade do tempo de ciclo ou mais ociosas. Esta é uma reflexão importante que será de grande valia nos problemas que seguem.

4 ESTIMATIVA DE RISCOS ERGONÔMICOS

Existem na indústria diversos modelos para estimar riscos ergonômicos aos trabalhadores. Há inclusive, nos Estados Unidos, um órgão que propõe e fiscaliza o uso destes modelos na indústria americana, além de alguns outros territórios sobre sua jurisdição. Este é o OSHA (*Occupational Safety and Health Administration*), que em 2000 publicou uma proposta de padronização dos cuidados a ergonomia nos locais de trabalho, recomendando alguns métodos para calcular os riscos, entre eles o OCRA (Occhipinti 1998), padrão recomendado pelo Comitê Europeu para Padronização (CEN). Além do nome do método, também é chamado de OCRA o índice que este método calcula. O índice avalia o uso repetitivo e em alta frequência dos membros superiores, como por exemplo o manuseio de máquinas, ou a manufatura manual de produtos. O índice é dado pela seguinte expressão:

$$OCRA_{index} = \frac{\text{Frequência exercida}}{\text{Frequência recomendada}} \quad (4.1)$$

As frequências utilizadas nesse cálculo são, por convenção, o número de repetições, de algum movimento, por minuto. A *Frequência exercida*, f_e , representa o esforço de fato que um trabalhador exerce para realizar um conjunto de tarefas, enquanto a *Frequência recomendada*, f_r , representa o esforço recomendado pelo método para o mesmo conjunto de tarefas. Logo, quanto maior o índice maior o risco ergonômico. No padrão proposto pelo CEN, é considerado aceitável um índice OCRA de até 2.2, rotulado de *verde*. Índices entre 2.3 e 3.5 são considerados aceitáveis em determinadas situações, e são rotulados de *amarelos*. Já índices maiores que 3.5 são inaceitáveis e rotulados *vermelhos*. O cálculo OCRA para frequência recomendada é o seguinte:

$$\text{Frequência recomendada} = OS \times PM \times FoM \times RM \times AdM \quad (4.2)$$

Cada um destes parâmetros é descrito a seguir.

OS Representa parâmetros específicos da empresa. Em condições ergonômicas ideais, para um turno de 8h, atinge um valor máximo de 18 (Otto e Scholl 2011). Este valor é reduzido conforme situações adversas vão sendo inseridas.

PM Este é um multiplicador para postura. As diferentes posturas são classificadas por partes do corpo e pela exigência do movimento. Partes do corpo tratadas são ombro, cotovelo, punho e mão. Para cada posição desfavorável é calculado um multiplicador que depende da parcela do tempo de ciclo em que se permanece nessa posição ou se repete um certo movimento. Finalmente, o menor destes valores, e portanto o que representa maior risco, é atribuído a PM.

Tabela 4.1: Valores para os multiplicadores PM e AdM

Parcela do tempo de ciclo	$\leq 1/4$	$1/3$	$1/2$	$2/3$	$3/3$
PM para posturas severas	1	0.7	0.65	0.6	0.5
PM para posturas moderadas	1	1	1	0.7	0.6
AdM	1	0.95	0.925	0.9	0.8

Tabela 4.2: Valores para o multiplicador FoM

Força média	5%	10%	20%	30%	40%	$\geq 50\%$
FoM	1	0.85	0.65	0.35	0.2	0.01

FoM É um multiplicador de força que depende da força média a ser exercida pelos músculos dos membros superiores.

RM Multiplicador de repetitividade que assume um de dois valores: 0.7 se o tempo de ciclo é menor do que quinze segundos ou se a mesma ação é repetida durante mais da metade do tempo de ciclo, senão o valor de RM é 1.

AdM Representa a influência de fatores adicionais. O valor atribuído a este multiplicador depende da parcela do tempo de ciclo em que o trabalhador está sujeito a estes fatores adicionais.

Ao longo do resto deste trabalho, serão assumidas condições ideais de operação, e OS será constante e assumira o valor 18. Quanto ao multiplicador PM , serão utilizados os valores mostrados na Tabela 4.1. Nesta tabela, a gravidade da postura é dividida entre severa e moderada, e atribui valores diferentes a PM dependendo da parcela do tempo de ciclo em que se permanece naquela posição. A mesma tabela também apresenta como se comporta o multiplicador AdM , também dependente da parcela do tempo de ciclo em que se expõe o trabalhador a estas condições adversas adicionais. Para o FoM , é preciso saber a força média aplicada durante a execução de cada tarefa, e este é um parâmetro dado, assim como são dadas quais as posições em que se deve ficar e ações que são repetidas em cada tarefa. A força média é fornecida como uma porcentagem da capacidade máxima de força, e a Tabela 4.2 mapeia este valor para os valores que o índice FoM deve assumir.

Expandindo o exemplo dado no Capítulo 2, utilizando o grafo de precedências da Figura 2.1 e a solução do SALBP-1, com tempo de ciclo $c = 7$, representada pela Figura 2.2, vamos adicionar alguns dados ergonômicos à instância original e então calcular o índice OCRA de cada uma das cinco estações, determinando o quão aceitável é, ergonomicamente, esta linha de montagem. A instância com os parâmetros ergonômicos adicionais para cada tarefa é representada pela Tabela 4.3.

Para a primeira estação, são alocadas as tarefas 1 e 2. A tarefa 1 exige 75% do seu tempo em uma posição severa, enquanto a tarefa 2 exige 56% do seu tempo, isso acumula em $0.75 \times 1 + 0.56 \times 5 = 3.55$ segundos, o que equivale a 51%, arredondado, do tempo de ciclo. As mesmas tarefas exigem 64% e 66%, respectivamente, em uma posição moderada, o que equivale à $0.64 \times 1 + 0.66 \times 5 = 3.94$ segundos e portando 56% do tempo de ciclo. Segundo a tabela 4.1, entre $1/2$ e $2/3$ do tempo de ciclo em uma posição severa traduz para $PM = 0.6$, enquanto o mesmo intervalo para posturas moderadas traduz para $PM = 0.7$. Escolhendo o menor entre os dois, PM assume o valor 0.6. Para decidir o valor de FoM , é preciso fazer a média, ponderada pelo tempo, da força aplicada durante a execução das tarefas. Ambas tarefas 1 e 2 exigem uma força de 10%, como essa força

Tabela 4.3: Exemplo de linha de montagem, levando em consideração aspectos ergonômicos. Tempo de ciclo $c = 7$

Tarefa	Tempo	Ações por min.	Força média	Postura severa*	Postura moderada*
				*parcela do tempo da tarefa na posição	
1	1	2	10%	75%	64%
2	5	22	10%	56%	66%
3	4	12	10%	0%	74%
4	3	9	20%	0%	0%
5	5	22	5%	58%	0%
6	6	9	5%	61%	75%
7	5	8	5%	54%	64%

é aplicada durante apenas 6 dos 7 segundos do tempo de ciclo, a força efetiva aplicada é 8.57%. Por interpolação na tabela 4.2, FoM deve assumir o valor 0.89. Como o tempo de ciclo é menor do que 15 segundos, o multiplicador de repetitividade, RM , será 0.7. Será considerado que não há presença de nenhum fator adicional, em nenhuma das 7 tarefas, portando $AdM = 1$. A tarefa 1 contribui com 2 ações por minuto, enquanto a tarefa 2 contribui com 22 ações por minuto, portanto, Frequência exercida = 24 e, aplicando a equação 4.2, Frequência recomendada = $18 \times 0.6 \times 0.89 \times 0.7 = 6.72$. Finalmente $\frac{24}{6.72} = 3.57$, fazendo com que a estação 1 seja uma estação vermelha, e por isso seja inaceitável com respeito ao risco ergonômico segundo a padrão OCRA.

A segunda estação também possui duas tarefas alocadas, a 3 e a 4. Nenhuma das duas exige posturas severas, a 4 inclusive não exige nem mesmo uma postura moderada. A 3, entretanto, precisa de 74% de seu tempo em uma postura moderada, que são $0.74 \times 4 = 2.96$ segundos ou 42% do tempo de ciclo. Pela tabela 4.1, uma postura moderada entre $1/3$ e $1/2$ equivale a um $PM = 1$. A tarefa 3 aplica 10% de força, enquanto a 4 aplica 20%. A média ponderada de força aplicada é, portanto, 10% durante 4 segundos e 20% durante 3 segundos dos 7 do tempo de ciclo, o que equivale à 14.28%. Pela tabela 4.2, $FoM = 0.76$. Mais uma vez $RM = 0.7$ e $AdM = 1$. A tarefa 3 contribui com 12 ações por minuto, e a 4 com 9 ações, logo Frequência exercida = 21. Já Frequência recomendada = $18 \times 0.76 \times 0.7 = 9.63$. Em fim, $\frac{21}{9.63} = 2.18$. A segunda estação é verde segundo o seu índice OCRA, e está em um nível de risco ergonômico aceitável.

Os cálculos para as outras três estações se faz da mesma forma. Na estação 3, 41% do tempo de ciclo em uma posição severa torna $PM = 0.65$. Força média no tempo de ciclo de 4.28% equivale a $FoM = 1$. Como em todas estações, devido ao curto tempo de ciclo, $RM = 0.7$ e finalmente $AdM = 1$. Com 22 ações por minuto e Frequência recomendada = $18 \times 0.65 \times 0.7 = 8.19$, temos $OCRAindex = \frac{22}{8.19} = 2.68$ e portanto uma estação amarela. A estação 4 tem 52% do tempo em postura severa e 64% em postura moderada, fazendo $PM = 0.6$. A força média aplicada é 4.28%, logo $FoM = 1$. Com a tarefa 6 exigindo 9 ações por minuto temos $\frac{9}{18 \times 0.6 \times 0.7} = \frac{9}{7.56} = 1.19$ e portanto outra estação verde. A quinta e última estação é mais uma vez verde, com $PM = 0.65$, $FoM = 1$ e 8 ações por minuto e por isso $OCRAindex = \frac{8}{18 \times 0.65 \times 0.7} = \frac{8}{8.19} = 0.97$.

Outros métodos, em geral, também calculam um índice para cada estação, e esse índice quantifica o risco ergonômico presente nesta estação. Portanto, é extremamente fácil, ao se incluir cálculos ergonômicos em modelos conhecidos, isolar este valor de risco independente do método utilizado. Para tanto, vamos definir uma notação única que

represente este risco. Para algum método de estimativa de riscos, por exemplo OCRA, $F = F(S_k)$ é o método que calcular o risco ergonômico para uma estação k , a qual foi atribuído um conjunto S_k de tarefas. Cada tarefa i está sujeita a diferentes fatores que contribuem para o risco, como por exemplo os utilizados pelo OCRA e vistos na Tabela 4.3.

4.1 Incorporando ergonomia ao SALBP

Em seu trabalho, Otto e Scholl (2011) sugere algumas maneiras de estender o SALBP-1 de modo a incorporar cálculo de risco ergonômico, utilizando OCRA ou outro método conhecido. A maneira mais simples é simplesmente adicionar restrições ao problema original, agora além de respeitar as precedências, o tempo de ciclo e outras restrições, cada estação deverá respeitar um nível máximo de risco ergonômico. Mais precisamente, para cada estação k , $F(S_k) \leq Erg$, onde Erg é o maior risco aceitável. O problema dessa alternativa é que ela é muito restritiva, e resulta em uma perda econômica muito grande. Se a alocação das tarefas obrigar que cada estação respeite este nível máximo de risco, e este nível for suficientemente baixo, serão precisas mais estações, cada uma com menos tarefas alocadas. Um aumento no número de estações não é de interesse dos administradores das linhas de produção, pois o custo para expandir a linha é elevado e depende de outros fatores como espaço físico e recursos, além de possivelmente necessitar de mais trabalhadores para operar estas estações, gerando mais gastos. Portanto, é preciso encontrar um balanço entre o custo de implantação e manutenção da linha, além da taxa de produção, para agradar os empresários, e a saúde dos trabalhadores, para agradar aos empregados.

Uma solução mais flexível é adicionar a ergonomia à função objetivo do SALBP-1 (minimizar o número de estações) de modo a encontrar o balanço necessário entre a economia e a saúde. Caso seja possível avaliar se o ganho econômico com o aumento na saúde dos trabalhadores compense a perda de eficiência da linha de produção, a função objetivo deve refletir isso e permitir uma alocação sub ótima de tarefas, no que diz respeito ao número de estações, em prol de um menor risco ergonômico, enquanto essa troca valer a pena. Como é muito difícil mensurar como esta troca entre eficiência e saúde afeta a economia, uma solução mais simples é tentar minimizar o risco ergonômico somente enquanto nenhuma estação adicional, em relação ao número mínimo de estações, for necessária. Independente de qual solução for utilizada, é necessário definir alguma função que determine o que exatamente se quer otimizar em relação a ergonomia. Existem diversas funções que podem ser interessantes, dependendo do objetivo a ser atingido. Por exemplo, se é possível fazer alguma rotação de trabalhadores na linha de produção, pode ser interessante minimizar a média, entre todas estações, do risco ergonômico, e realocar os trabalhadores, em certos intervalos, de forma que o estresse físico causado pelas estações de maior risco não se acumule em uma só pessoa. A esta versão se dá o nome ErgoSALBP-A (A de *average*), e a função que se quer minimizar é:

$$\frac{1}{K(x)} \times \sum_{k=1}^{K(x)} F(S_k) \quad (4.3)$$

onde $K(x)$ é a função objetivo do SALBP, ou seja, o número (mínimo) de estações de trabalho. Como esta versão do ErgoSALBP minimiza a média dos riscos ergonômicos entre todas estações, pode ocorrer que, para atingir este objetivo, algumas estações

sejam sacrificadas, tendo seus riscos ergonômicos aumentados, para que várias outras sejam aliviadas deste problema, diminuindo a média. Por este motivo a atenção especial à possibilidade de rotação de trabalhadores. Por isso, caso esta rotação não seja possível, pode ser mais interessante minimizar os riscos de forma distribuída entre todas estações, de forma que o índice ergonômico seja balanceado entre os trabalhadores, e nenhum sofra mais, ou muito mais, que os demais. A esta versão dá-se o nome ErgoSALBP-S (S de *smoothing*), e a função a minimizar é:

$$\sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{K(x)} (\max\{F(S_k - Erg, 0)\})^2}{K(x)}}, \quad (4.4)$$

onde Erg é um limite máximo aceitável de estimativa de risco ergonômico, tornando desnecessário otimizar estações que já estejam abaixo deste nível. Considerando o índice OCRA, por exemplo, o valor de Erg poderia ser 2.2, ou seja, o limite para considerar uma estação verde, e, portanto, aceitável segundo o padrão. Existem outras funções para otimizar a ergonomia de uma linha, como por exemplo minimizar o número de estações vermelhas ou amarelas, no OCRA, ou outras que possam ser criadas conforme necessário, mas o foco adiante será dado para ErgoSALBP-A e S.

4.2 Heurística em duas etapas para resolver ErgoSALBP

A solução proposta por Otto e Scholl (2011) para resolver o problema ErgoSALBP é uma heurística em duas etapas. Na primeira etapa, é usado um algoritmo exato conhecido para resolver o SALPB-1, encontrando o menor número de estações necessárias, e uma distribuição de tarefas nessas estações. Como este artigo foi publicado antes do algoritmo proposto por Sewell e Jacobson, ele utiliza a solução estado da arte anterior, o SALOME-1, que resolve de forma ótima quase todas as instâncias clássicas, como mencionado no Capítulo 2. O algoritmo usado nesta etapa, porém, é irrelevante, pois ela independe da segunda etapa, ou melhor, independe da ergonomia em si. O único objetivo da primeira etapa é a resolução do SALPB-1. Sabendo o número de estações necessários e tendo uma configuração inicial válida, a segunda etapa utiliza a heurística *simulated annealing* para redistribuir as tarefas entre as estações de modo a minimizar os riscos ergonômicos, segundo alguma função objetivo como as mencionadas anteriormente.

Simulated annealing é uma heurística que busca o ótimo global no espaço de busca de um problema de otimização, evitando ficar preso em ótimos locais. Ela é inspirada por uma técnica de mesmo nome (*annealing*) utilizada na metalurgia (Kirkpatrick, Gelatt e Vecchi 1983). Esta é uma técnica que envolve aquecer um sólido e depois resfriá-lo controladamente, com os objetivos de aumentar o tamanho de seus cristais e diminuir os defeitos dos mesmos. A taxa de resfriamento da técnica tem uma determinada relação com a maneira com que ela modifica o material. Mais precisamente, o aquecimento e resfriamento do objeto afeta a energia termodinâmica dele, e a maneira como esta energia é afetada varia conforme varia a taxa de resfriamento, proporcionando resultados diferentes para a técnica. O *simulated annealing*, por sua vez, utiliza essa ideia do resfriamento controlado, com a diminuição da temperatura sendo implementada como uma diminuição na probabilidade de aceitar uma solução pior enquanto ele caminha pelo espaço de busca. Em meta-heurísticas, de um modo geral, a ideia de aceitar soluções piores ocorre para evitar de ficar preso em um mínimo local, expandindo o espaço de busca e possibilitando achar soluções mais próximas da otimalidade. Como o *simulated annealing* começa com uma probabilidade alta de aceitar soluções piores (aquecimento) e, de forma controlada,

diminui esta probabilidade com o tempo (resfriamento controlado), ele começa com um espaço de busca grande e aos poucos vai limitando este espaço até chegar em um ótimo local que, com sorte, é também o ótimo global.

Como mencionado no Capítulo 2 existe um conjunto clássico de instâncias para o SALBP¹, que na literatura é utilizado como *benchmark* para novas propostas de soluções. Otto e Scholl (2011) utilizam este conjunto para conduzir testes sobre o ErgoSALBP, exceto uma das instâncias que é muito pequena. Este conjunto possui, portanto, 268 instâncias de SALBP-1, a maior delas com 297 tarefas. Como dito anteriormente, o método ergonômico utilizado é o índice OCRA, e a autora gerou, para cada instância, dados ergonômicos com uma certa similaridade aqueles encontrados na indústria automobilística. Parâmetros como frequência das ações (ações por minuto), força, repetitividade, posturas e fatores adicionais foram gerados. Para cada instância foram gerados 27 conjuntos de parâmetros ergonômicos diferentes, disponíveis no mesmo endereço das instâncias do SALBP. Portanto, a análise foi feita sobre $27 \times 268 = 7236$ instâncias. Os resultados obtidos por Otto e Scholl (2011) mostram que é possível, sem adicionar estações de trabalho extras, diminuir substancialmente riscos ergonômicos na maioria das instâncias.

4.3 Incorporando ergonomia ao ALWABP

Mais interessante ainda é garantir um baixo nível de risco ergonômico para linhas de montagem que empregam trabalhadores portadores de deficiências. Para tanto, é necessário introduzir algum cálculo de risco ergonômico ao ALWABP, que o problema capaz de modelar as diferentes capacidades dos trabalhadores. Para manter a nomenclatura, o novo problema será chamado de ErgoALWABP, e no capítulo que segue será definida uma solução semelhante a proposta por Otto e Scholl (2011) para resolver o ErgoSALBP. Uma heurística também em duas etapas, em que a primeira resolve o problema original do ALWABP, e a segunda utiliza um algoritmo de *simulated annealing* para rearranjar as tarefas entre os trabalhadores a fim de minimizar o risco ergonômico.

¹Instâncias estão disponíveis para download em www.assembly-line-balancing.de

5 SOLUÇÃO HEURÍSTICA PARA O ERGOALWABP

5.1 Reprodução da solução para ErgoSALBP

O primeiro passo para solucionar o ErgoALWABP foi reproduzir os resultados de Otto e Scholl (2011) para o ErgoSALBP. Esta abordagem garante um entendimento completo dos cálculos ergonômicos envolvidos, além destes cálculos transicionarem perfeitamente para qualquer outro problema, pois são independentes. A solução é feita também em duas etapas, com a primeira resolvendo de forma ótima o SALBP-1, gerando uma configuração válida de estações, e a segunda etapa minimizando os níveis de risco ergonômico através de uma heurística *simulated annealing*. As soluções ótimas iniciais foram obtidas utilizando um modelo matemático para o SALBP-1, portanto, esta etapa não faz parte do algoritmo, e os conjuntos de soluções são simplesmente um parâmetro para a segunda etapa.

No *simulated annealing* (SA) um estado s representa alguma solução válida para o problema a ser otimizado. Cada estado possui uma quantidade $e = E(s)$ de energia, onde $E(s)$ é uma função relacionada ao objetivo da otimização e a heurística irá procurar o estado com a menor energia possível. O SA começa em um estado inicial s_0 qualquer e iterativamente transiciona para estados vizinhos. A vizinhança de qualquer estado s tem que ser bem definida e em geral é definida por alguma pequena alteração na configuração do estado. A transição de um estado para o outro é dado o nome de movimento. A cada iteração é escolhido um vizinho aleatório s' , e este estado assume a posição de estado atual com uma probabilidade $P(e, e', T)$, onde T é um parâmetro global do SA, que indica a temperatura do sistema. Analogamente à técnica real de *annealing*, esta temperatura é "esfriada" conforme o algoritmo avança, tendendo à 0. Estados com menor energia são melhores, e geralmente transições em que $e' < e$ são aceitas incondicionalmente, e isso é refletido na função P . Já nos casos em que $e' \geq e$, a probabilidade de aceitação depende de T (e pode depender também da diferença $e' - e$), quanto maior T maior a probabilidade (e quanto maior $e' - e$ menor a probabilidade) de aceitação. O parâmetro T é extremamente importante para o SA, ele deve começar em algum valor inicial, que deve ser definido, alto e o "resfriamento" também deve ocorrer de forma bem definida. A simulação itera até encontrar um estado considerado bom o suficiente ou até um limite computacional a ser respeitado. O SA implementado é melhor representado pelo pseudo-código mostrado no Algoritmo 1.

Para o ErgoSALBP, um estado é uma configuração da linha de montagem, com tarefas alocadas às estações. A função de energia, $E(s)$, é uma função objetivo para ergonomia como as mencionadas no Capítulo 4, ErgoSALBP-A ou ErgoSALBP-S, por exemplo.

Um vizinho para um estado é gerado fazendo um de dois movimentos: mover uma tarefa de uma estação para outra; ou trocar entre si duas tarefas de suas estações. Estes

Algoritmo 1 Pseudo-código para *simulated annealing*

Require: estado inicial s_0 , temperatura inicial T
melhor estado \leftarrow estado atual $\leftarrow s_0$
menor energia \leftarrow energia atual $\leftarrow E(s_0)$
while energia > mínimo aceitável **and** temperatura > temperatura mínima **and** não chegou em um mínimo local **do**
 $s' \leftarrow$ movimento_aleatório(estado atual)
 $e' \leftarrow E(s')$
 probabilidade de aceitar $\leftarrow P(\text{energia atual}, e', T)$
 if aceita **then**
 estado atual $\leftarrow s'$
 energia atual $\leftarrow e'$
 end if
 if energia < menor energia **then**
 melhor estado \leftarrow estado atual
 menor energia \leftarrow energia atual
 end if
 $T \leftarrow$ diminui_temperatura(T)
end while

movimentos são chamados de *shift* e *swap*, respectivamente. Um movimento, tanto de *shift* quanto de *swap* só é considerado válido, e portanto faz parte da vizinhança de um estado, se a configuração de linha resultante deste movimento respeita a ordem de precedência das tarefas, além de ser necessário manter o tempo de ciclo c dentro do limite original.

Escolhido um vizinho aleatório, ele será candidato para assumir a posição de estado atual. Caso a energia do candidato seja menor que a do estado atual, ou seja, a função objetivo melhora, então o estado atual é assumido pelo candidato. Caso contrário, a solução candidata é pior do que a atual, então ela é aceita com uma probabilidade p que diminui conforme aumenta esta piora e aumenta conforme diminui a temperatura T da simulação, conforme a formula:

$$p = e^{\frac{-(e'-e)}{T}}$$

Quanto aos critérios de parada, a energia mínima que é permitido ao melhor estado é e^{-5} , porque é um valor suficientemente próximo de 0, e geralmente não se consegue otimizar mais do que isso. A temperatura T pode ser "resfriada" até 0.0002, valor que foi calibrado após algumas observações que indicavam que valores acima disso ainda conseguiam, provavelmente, encontrar soluções melhores no espaço de busca, mas este valor já restringiria muito este espaço e resultaria em iterações inúteis. O último critério de parada, na realidade, não tem certeza exata se foi encontrado um mínimo local. O que ele faz, na realidade, é garantir que existe um espaço de busca suficientemente grande e que balhe a pena percorre-lo. Para entender como isto é feito, é preciso detalhar um pouco mais o funcionamento do algoritmo. Dentro do *loop* principal são feitas L iterações, cada uma gera um vizinho, transita para ele com probabilidade p e atualiza os estados e energias. Apenas depois das L iterações, que são garantidamente feitas, o algoritmo analisa os critérios de parada. L é outro parâmetro do SA, fixado para 100 nesta implementação. Para determinar se o espaço de busca é suficiente, existe um outro parâmetro do SA, que

será chamado de a , que significa qual a porcentagem das L iterações deve ter um vizinho aceito. Este parâmetro recebe o valor $a = 5\%$, ou seja, se ao final das 100 iterações, ao menos 5 delas trocarem o estado, então é considerado que o espaço de busca ainda pode resultar em alguma melhora.

A temperatura T , um dos parâmetros mais importantes, é na realidade calibrado antes do SA rodar. Esta calibração é feita utilizando o próprio SA, com uma pequena modificação. A temperatura inicial é fixada em um valor relativamente baixo, 0.01, e $L = 10$, também baixo para a etapa de calibragem não ser muito demorada. O SA então roda com estes valores, mas ao invés de "resfriar" o T , ele é "esquentado" até um valor que proporcione um espaço de busca grande. A cada $L = 10$ iterações, T é dobrado, até que pelo menos 70%, ou seja 7, das iterações sejam aceitas. Durante a execução do SA em si, a cada L iterações, a temperatura é diminuída em 5%. Resumindo, a temperatura começa em um valor que permite um amplo espaço de busca, aceitando até 70% dos vizinhos, mesmo os piores, e é "resfriada" até aceitar apenas 5% ou até estar em um valor muito baixo (0.0002) que provavelmente não trará nenhuma melhora, mas que devido a alguma característica do mínimo local em que ficou presa, ainda aceita mais de 5% dos vizinhos.

5.2 Expansão da solução para ErgoALWABP

A solução para o ErgoALWABP usa a mesma ideia em duas etapas. A primeira etapa é gerar uma solução ótima para o ALWABP-2, e em seguida utiliza o SA para minimizar os riscos ergonômicos. Assim como no ErgoSALBP, as soluções iniciais para as instâncias do ALWABP foram encontradas utilizando uma modelagem matemática, logo, são garantidamente ótimos, com o menor tempo de ciclo possível.

O algoritmo de SA utilizado é o mesmo, com uma pequena modificação na geração dos vizinhos. Como no ALWABP trocar tarefas de estações, tanto através de *shifts* como de *swaps*, muda também qual trabalhador executará aquela tarefa, o recálculo do tempo da estação deve levar isso em conta. Assim como no ErgoSALBP, um movimento qualquer não pode desrespeitar a ordem de precedência das tarefas, e nem o tempo de ciclo, e o fato de o tempo da tarefa mudar, potencialmente aumentar, quando se troca de estação tem grande influência nisso. Este fato, somado à observação feita no Capítulo 3, que todas as estações tem tempos ociosos extremamente pequenos ou inexistentes, o espaço de busca para o SA é muito pequeno. Por esse motivo, muitas das instâncias do ALWABP tem um espaço de busca vazio. Já as estações que tem algum movimento válido, tem muito poucos, então ou o SA não consegue melhorar a ergonomia, ou ela melhora muito pouco. O exemplo mostrado no Capítulo 3, com 4 trabalhadores e tempo de ciclo $c = 20$, tem uma estação ocupando todo o tempo de ciclo, duas com tempos de estação 17 e a quarta com um tempo 16. Sem quebrar a precedência ou ultrapassar o tempo de ciclo é possível apenas um único movimento de *swap*, que quando feito abre a possibilidade de fazer outro *swap* entre duas outras tarefas. Feitas estas trocas, a média do índice OCRA entre as quatro estações baixa de 3.18 para 3.13. A melhora existe, mas é ínfima devido ao espaço de busca extremamente limitado, com apenas dois movimentos possíveis.

Devido às peculiaridades do ALWABP-2, a solução implementada permite um relaxamento do tempo de ciclo c . Este relaxamento é mais um parâmetro do algoritmo e da muito mais liberdade para o SA, que percorre um espaço de busca muito maior devido aos movimentos que se tornam válidos devido à um tempo de ciclo maior e, consequentemente, há mais opções para diminuir os riscos ergonômicos. Obviamente, o *trade off* de possibilitar uma melhor saúde aos trabalhadores com esse relaxamento é a diminuição

da taxa de produção. Obviamente no problema proposto não existe a possibilidade de adicionar estações para distribuir melhor as tarefas, uma vez que o número de trabalhadores é fixo, então a única maneira de prejudicar a economia da linha em prol da saúde é aumentando o tempo de ciclo.

6 TESTES COMPUTACIONAIS

Foram conduzidos três conjuntos de testes principais. Primeiramente foi testado o funcionamento da solução para o ErgoSALBP, e comparado com os resultados obtidos por Otto e Scholl (2011). Após verificados os resultados para o ErgoSALBP, foram rodados dois grupos de testes para o ErgoALWABP. O primeiro grupo de testes tinha o objetivo de analisar como variava o comportamento do algoritmo conforme variava o relaxamento do tempo de ciclo, e servir como uma calibração para o segundo conjunto de testes, que tinha como objetivo rodar mais instâncias, com mais variações na aleatoriedade, mas com um relaxamento fixo pré-determinado a partir dos resultados obtidos nos primeiros testes.

6.1 ErgoSALBP

O primeiro conjunto de testes tinha por objetivo verificar a correta reprodução da solução para ErgoSALBP proposta por Otto e Scholl (2011). Esta solução será chamada de EOS (ErgoSALPB Otto e Scholl), enquanto a solução implementada para este trabalho será chamada EFR (ErgoSALBP Fontoura e Ritt). Para realização deste teste foram usadas as mesmas 268 instâncias clássicas com as mesmas 27 replicações de dados ergonômicos utilizadas pelos autores do EOS e mencionadas no Capítulo 4. É utilizado o índice OCRA para cálculo de risco ergonômico, e considerando aspectos organizacionais dentro da normalidade, o valor de OS na fórmula de cálculo da frequência recomendada é constante e fixo no valor 18. Relembrando, uma estação é considerada verde com índice até 2.25, amarela até 3.5 e vermelha acima disso. As funções de otimização são a média do índice OCRA e o balanceamento dele, ErgoSALBP-A e S, respectivamente.

Das 7236 instâncias, 81 delas já possuíam todas as estações verdes, e por isso não tinham como serem otimizadas. Das 7155 restantes, alguns dados são analisados, conforme a Tabela 6.1, e comparados com os resultados obtidos pelo EOS. A parcela de instâncias com melhora, assim como a de soluções com todas estações verdes, são uma porcentagem do número total de instâncias. A melhora do índice OCRA é dada como uma porcentagem da redução do índice em relação à solução inicial do SALBP-1. Todos os dados são apresentados como a média dos resultados de todas as instâncias.

A quantidade de instâncias com melhora se mostra na mesma proporção dos resultados originais do EOS. Isto é facilmente explicado pelo fato de que a possibilidade de otimizar a ergonomia de uma instância independe da implementação da solução em si (desde que esta solução respeita todas as restrições, por exemplo, não adicione estações extras), mas depende de características intrínsecas da instância. Número de tarefas, relações de precedência entre as tarefas, tempos das tarefas e tempo de ciclo exigido todos influenciam na eventual chance de existirem mais do que uma soluções ótimas a serem exploradas pelo SA a partir de uma inicial qualquer. Instâncias com apenas uma configu-

Tabela 6.1: Resultados da otimização de ErgoSALBP para 7155 instâncias. Funções objetivo A (*Average*) e S (*Smoothing*)

	Resultados do EFR			Resultados do EOS		
	A	S	Média	A	S	Média
Parcela de instâncias com melhora	95%	93%	94%	93%	93%	93%
Soluções com todas estações "verdes"	13%	26%	19.5%	46%	47%	46.5%
Melhora da média dos índices OCRA	11%	5.4%	8.2%	5%	4%	4.5%

ração ótima obviamente tem um espaço de busca vazio, enquanto instâncias com poucas configurações ótimas tem menos opções para explorar, criando casos em que ou é impossível melhorar a ergonomia, quando há apenas uma solução ótima, ou é muito pouco provável melhorar a ergonomia, quando existem poucas soluções ótimas. Sem a possibilidade de adicionar estações extras, isto resulta na pouca parcela das instâncias que não tem nenhuma melhora.

Existe uma discrepância no número de soluções ótimas para ergonomia, ou seja, soluções que conseguiram reduzir o número de estações tanto amarelas quanto vermelhas para zero. O EOS, quando faz a escolha do movimento para o SA, dá preferência para mover tarefas em estações mais sobrecarregadas. Movimentos de tarefas em estações vermelhas são escolhidos com uma probabilidade maior que aqueles em estações amarelas, com as verdes tendo a menor probabilidade. Já o EFR simplesmente escolhe um movimento qualquer entre todos os possíveis. Este fato pode explicar a diferenças, mesmo que expressiva, entre os resultados obtidos. O EOS que dá mais atenção às estações menos favorecidas acaba tendo uma otimização local mais expressiva para estas estações, enquanto o EFR faz movimentos mais abrangentes e pode acabar "otimizando" uma estação já verde de forma demasiada. Outra particularidade importante de notar é a diferença entre A e S nos resultados obtidos pelo EFR. No S existe uma melhor distribuição dos riscos entre todas as estações, potencialmente resultando em todas ficarem em um estado verde com índices altos. Já o A, como se preocupa apenas em minimizar a média, pode acabar com uma estação sobrecarregada enquanto estações já verdes são mais otimizadas do que necessário.

Possivelmente o dado mais interessante, a porcentagem de melhora, para o S, fica numa faixa parecida com o resultado original do EOS, mas o A do EFR tem uma melhora alta com 11% contra os 5% do EOS. A única possível explicação para isso seria a diferença entre soluções iniciais. Muitas instâncias possuem diversas configurações que satisfazem o resultado ótimo. Como não se tem acesso às soluções iniciais utilizadas pelo EOS, é impossível reproduzir exatamente todos os passos de otimização de ergonomia. Adicionalmente, como o dado que avalia a otimização da ergonomia é uma porcentagem da redução na média dos índices OCRA entre as estações, uma solução inicial diferente pode ter uma média dos índices pior que outra solução inicial (inclusive uma solução inicial pode ser já a melhor quanto a ergonomia). Devido a isso, duas implementações do ErgoSALBP podem partir de soluções iniciais diferentes e chegar na mesma solução final, com valores de média dos índices aproximados, mas ao analisar a melhora, uma vai ser maior que a outra. A diferença substancial entre o A e o S, nos resultados do EFR, faz sentido, uma vez que o A objetiva minimizar justamente a média do OCRA entre todas estações. Enquanto o S simplesmente distribui mais balanceadamente os riscos entre as estações, não seria impossível de alguma instância ter a média dos índices OCRA pioradas para que este balanço fosse alcançado.

6.2 ErgoALWABP

Foram conduzidos dois conjuntos de testes para o ErgoALWABP. O primeiro em um conjunto mais restrito de instâncias, mas com diversas variações no relaxamento do tempo de ciclo, serviria para escolher um relaxamento fixo e utilizá-lo em um teste mais abrangente. Para realização dos testes do ErgoALWABP, foram utilizadas duas instâncias do conjunto de instâncias da literatura adaptadas para o ALWABP. O número de tarefas e as relações de precedência entre elas são mantidas e para cada instância existem 80 variações, com diferentes números de trabalhadores e tempos de tarefa para cada trabalhador. São, portanto, 160 instâncias do ALWABP. Quanto a ergonomia, foram aproveitadas as 27 replicações de dados ergonômicos das instâncias equivalentes do ErgoSALBP. Resultam no total, então, $160 \times 27 = 4320$ instâncias distintas. O nome das instâncias são *heskia* e *roszieg*. Neste ponto foi decidido utilizar os mesmos dados ergonômicos, únicos por tarefas, apesar dos trabalhadores serem heterogêneos. Isto porque, na prática, seria muito difícil, talvez até inviável, conseguir dados ergonômicos individuais, ao contrário do tempo de execução da tarefa, que é muito mais simples. Outro fator que contribui para esta decisão é o fato de o cálculo dos riscos ergonômicos já depender do tempo da tarefa, então a heterogeneidade do ALWABP entra de forma indireta nestes cálculos.

O primeiro experimento foi aplicado às 160 instâncias do ALWABP, mas com apenas uma das replicações de ergonomia. Para cada instância, onze diferentes taxas de relaxamento foram aplicadas, de 0% a 10% do tempo de ciclo original. O valor máximo de 10% foi escolhido por ter sido considerado um limite econômico aceitável, já que um aumento do tempo de ciclo significa diminuição na taxa de produção, não é desejado um relaxamento muito expressivo. Os gráficos das Figuras 6.1 e 6.2 mostram como se comporta a melhora na média dos índices OCRA entre as estações conforme cresce o relaxamento, para os problemas do tipo A e S, respectivamente.

A conclusão mais notável é que o relaxamento funciona e implica em uma maior diminuição dos riscos ergonômicos. Outra característica interessante é que a melhora cresce de forma aproximadamente linear com o relaxamento, ao menos nos relaxamentos menos expressivos. Outros testes conduzidos indicam que para valores muito altos de relaxamento a melhora tende a convergir para um valor máximo, possivelmente o ótimo para aquela instância. Para atingir esta convergência, porém, é necessário um relaxamento impraticável, de mais de 100%. Outro fato que se destaca é a função objetivo A ter uma porcentagem de melhora, de até 11%, maior do que a S, no máximo 7%, assim como no ErgoSALBP, mantendo a consistência com o que cada uma representa.

Foi mencionado anteriormente a dificuldade em otimizar a ergonomia sem aplicar um relaxamento, devido ao restrito espaço de busca para o SA. Como mostram os resultados, existem instâncias que permitem melhoras, mas essa melhora é bastante baixa, de aproximadamente 2.5% para o A e 1.5% para o S. Além disto, foi constatado que, para 0% de relaxamento, 40% das instâncias não tem nenhuma melhora.

Finalmente, outra característica do gráfico que chama a atenção é a progressão do *roszieg* conforme aumenta o relaxamento. De 0 a 3% de relaxamento, tanto S quanto A tem uma melhora constante, mas no 4% há um salto na melhora que começa a crescer linearmente como o *heskia*. No 8% de relaxamento existe outro salto. Isto acontece devido a uma característica intrínseca da instância. Devido aos baixos tempos de ciclo de várias das 80 variantes do *roszieg*, um relaxamento de 1%, por exemplo, não significa nada, pois o tempo de ciclo é um número inteiro. Então os saltos na melhora ocorrem quando é alcançado um relaxamento que irá de fato afetar o tempo de ciclo.

A reflexão anterior está relacionada a outro fato importante, a ideia de *relaxamento*

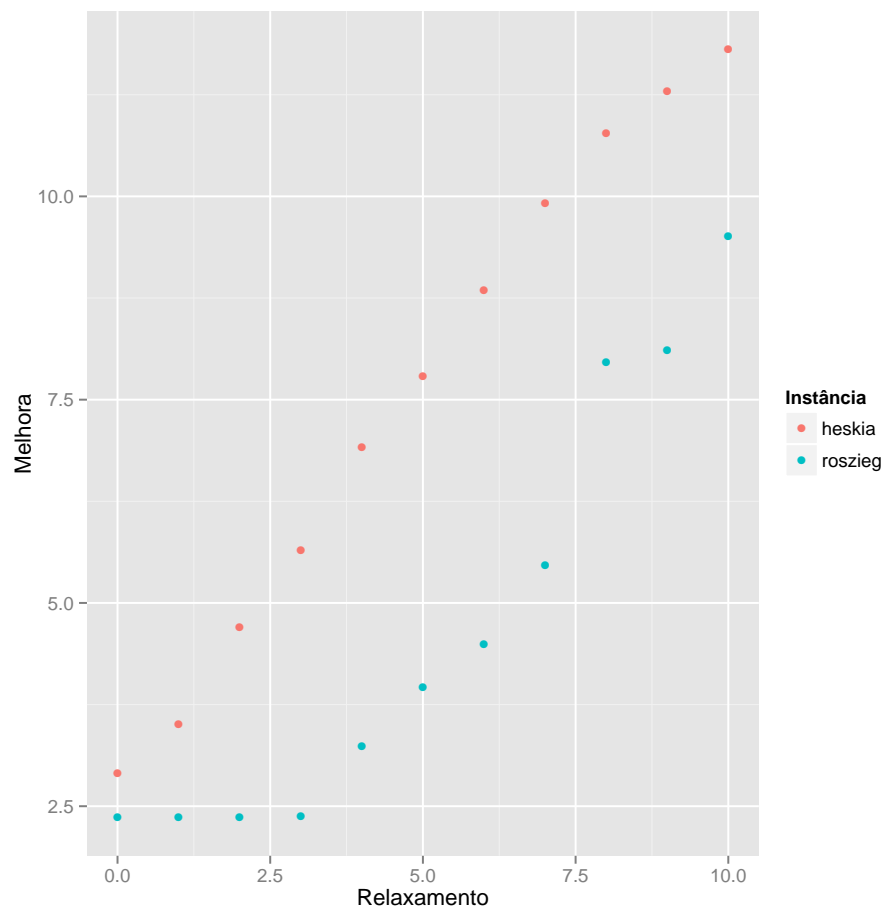


Figura 6.1: ErgoALWABP-A

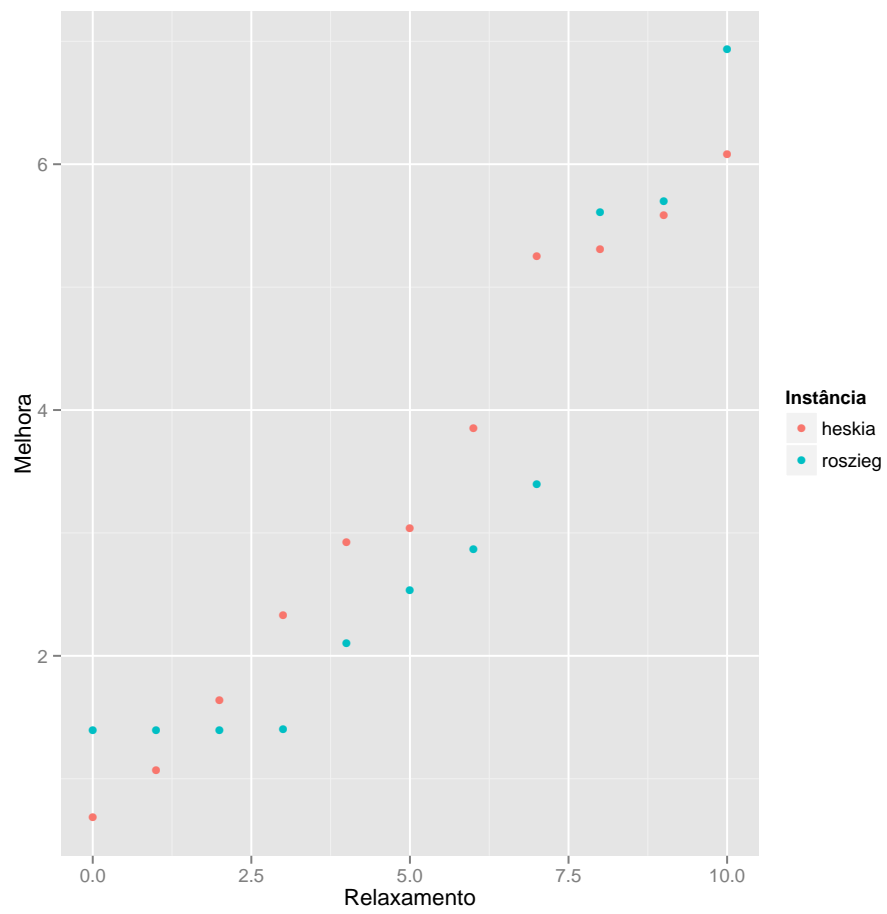


Figura 6.2: ErgoALWABP-S

efetivo. O relaxamento passado por parâmetro não é necessariamente aplicado, mas simplesmente permitido. Isso significa que, se o relaxamento for 50%, por exemplo, não necessariamente ao final do SA ele irá gerar uma solução que tem um tempo de ciclo 50% maior. O algoritmo vai tentar minimizar os riscos ergonômicos, e se ele precisar utilizar todo o relaxamento, ele irá, mas as vezes é possível que uma configuração com um tempo de ciclo não tão maior seja muito boa ergonomicamente, então o relaxamento efetivo vai ser o relaxamento da solução final em relação à original. O mais interessante é que isto não invalida o crescimento linear da melhora pelo relaxamento. Poderia se ter a dúvida de, se um relaxamento de 10% gera soluções com relaxamento efetivo de 8%, por que resultados são melhores que utilizando diretamente um relaxamento de 8%? Isto acontece pelo fato de um relaxamento de 10% não só permitir que a solução final seja 10% mais lenta que a inicial, mas que durante o SA as vizinhanças sejam maiores, permitindo vizinhos que relaxem 10% do tempo de ciclo. Isto resulta em um espaço de busca maior não só pelas configurações 10% mais lentas, mas por outras configurações, de menor tempo de ciclo, que são alcançáveis a partir destas. Então o SA consegue chegar em alguma solução com relaxamento efetivo de 8% apenas através de uma com relaxamento efetivo de 10%, e o relaxamento direto em 8% não conseguiria o mesmo.

A partir disto, poderia ser uma ideia interessante de implementação fazer a heurística ter múltiplos objetivos, onde o objetivo principal é minimizar os riscos ergonômicos, mas o espaço de busca é estendido por algum relaxamento, apenas para a busca, mas é requisito que a solução final tenha um tempo de ciclo menor que o permitido pela busca, ou seja, o relaxamento efetivo. Mesmo sem este adicional, na média, o relaxamento efetivo sempre foi menor que o relaxamento de fato, nos testes realizados. Isto pode ser observado no gráfico da Figura 6.3, que mostra para cada relaxamento utilizado, qual foi o relaxamento efetivo em média entre todas instâncias, tanto para S quanto para A.

O que se pode observar é que, tirando o 0% obviamente, o relaxamento efetivo é em media aproximadamente metade do relaxamento permitido. Isto é muito bom, pois com isso é possível permitir relaxamentos um pouco maiores, e conseqüentemente ter um ganho melhor no fator ergonômico, sem comprometer tanto o fator econômico.

6.2.1 Testes com relaxamento fixo em 8%

A partir das informações obtidas com os testes anteriores, foi decidido realizar um teste mais abrangente, fixando o relaxamento em 8%. Este valor foi escolhido com o objetivo de obter resultados semelhantes aos do ErgoSALBP. Neste, o A tem um valor de melhora de 11% e o S de 5.4%. Observando os resultados de calibragem, o relaxamento de 8% é bem próximo destes valores para A e S. Além disto, o 8% é um dos pontos de salto para o *roszieg*, tornando a escolha mais interessante ainda. Finalmente, como foi observado anteriormente que em média o relaxamento efetivo para 8% é aproximadamente 5%, a perda não é tão grande.

O conjunto de instâncias utilizados neste teste foram as mesmas 160, 80 do *heskia* mais 80 do *roszieg*, mas desta vez utilizando todas 27 variações de dados ergonômicos, para um total de 4320 instâncias. Além disso, para cada uma destas o teste é repetido 5 vezes, com sementes aleatórias distintas, para evitar que discrepâncias decorrentes da aleatoriedade não influenciem tanto a média. A Tabela 6.2 mostra os resultados obtidos. A separação entre *heskia* e *roszieg* mostra bem a influência que as características da instância exercem sobre as possibilidades de otimização.

Estes resultados são bastante satisfatórios, com uma grande quantidade de instâncias diminuindo os riscos, embora poucas tenham atingido um estado ótimo (todas verdes).

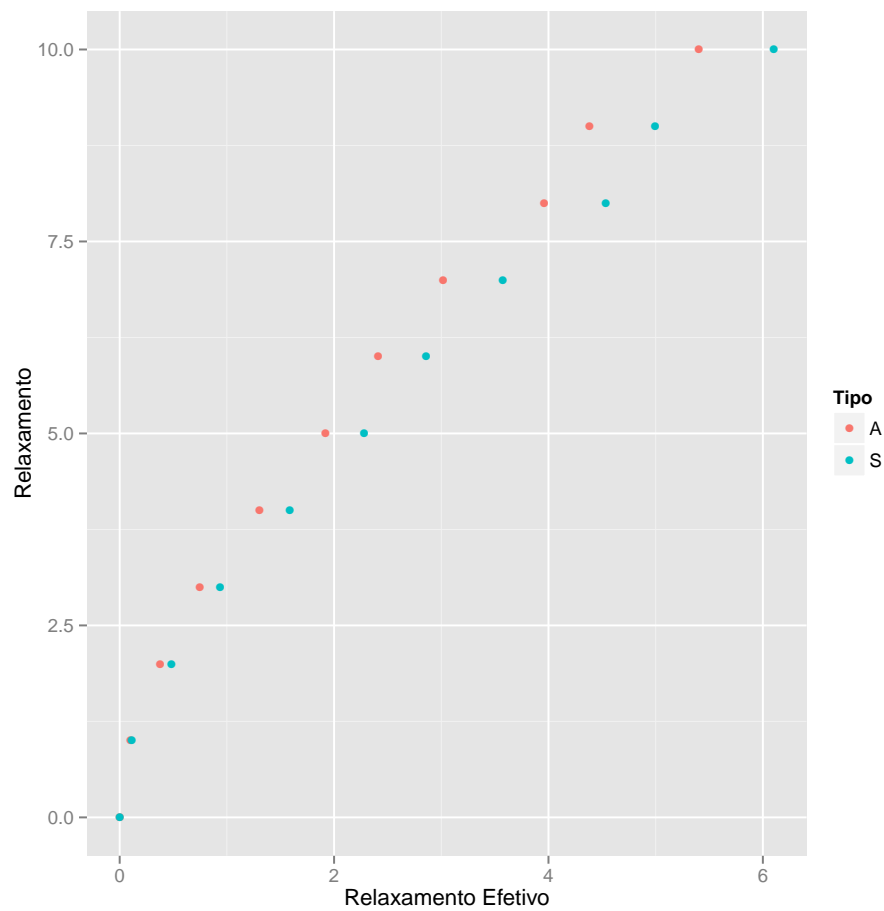


Figura 6.3: Relaxamento Efetivo x Relaxamento de Fato

Tabela 6.2: Resultados da otimização de ErgoALWABP para 4320 instâncias. Funções objetivo A (*Average*) e S (*Smoothing*)

	<i>heskia</i>		<i>roszieg</i>		Média(%)
	A(%)	S(%)	A(%)	S(%)	
Parcela de instâncias com melhora	85.5	78.4	94.7	81.6	85.0
Soluções com todas estações verdes	11.6	44.1	3.0	5.0	20.9
Soluções sem estações vermelhas	84.7	90.3	38.9	48.3	65.6
Melhora da média dos índices OCRA	11.6	7.0	8.6	6.5	8.4

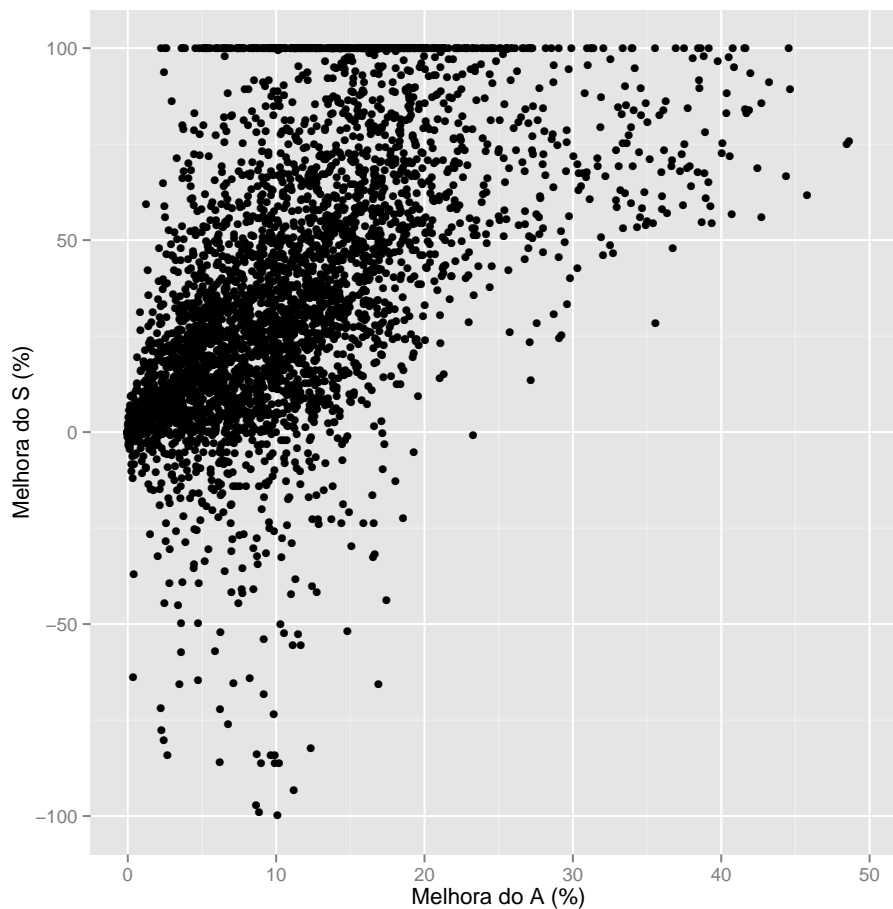


Figura 6.4: Relação entre a melhora na média dos índices (A) e a melhora na distribuição dos riscos (S) para o ErgoALWABP-A (A de *Average*)

Além disso, a diminuição do risco é bastante expressiva com uma média de 8.4% entre todas instâncias. Finalmente, o tempo de computação do algoritmo é apenas 2 segundos por instância, em média. Este é um valor interessante se comparando com a eficiência do algoritmo para o ErgoSALBP, que conseguiu uma média de 6 segundos por instância. Apesar do problema ErgoALWABP ser mais difícil, o conjunto de instâncias dele não contempla várias das maiores instâncias do conjunto clássico. Além disto, o espaço de busca mais restrito limita as possibilidades de iterações para o SA, potencialmente chegando em uma solução final mais rapidamente.

Um último aspecto interessante de se analisar é a relação entre as funções objetivo A e S. Principalmente no que diz respeito a linhas de produção com trabalhadores deficientes, onde não existe a possibilidade de trocas de trabalhadores entre estações, a função S pode ser mais interessante. Os dados coletados mostram uma fato interessante: para otimizar a média dos índices, as vezes, é preciso piorar o balanço, assim como para otimizar a distribuição dos riscos, as vezes, é necessário piorar a média dos índices. De fato, isto ocorre em algumas das instâncias utilizadas, onde a função objetivo S é melhorada, mas a "melhora" da média é negativa, fazendo a média de melhora do S diminuir no total. Essa relação pode ser vista nos gráficos das figuras 6.4 e 6.5.

De um modo geral, quando uma função melhora a outra melhora também. Tomado como exemplo, porém, as instâncias rodando ErgoALWABP-S que conseguem 100% de

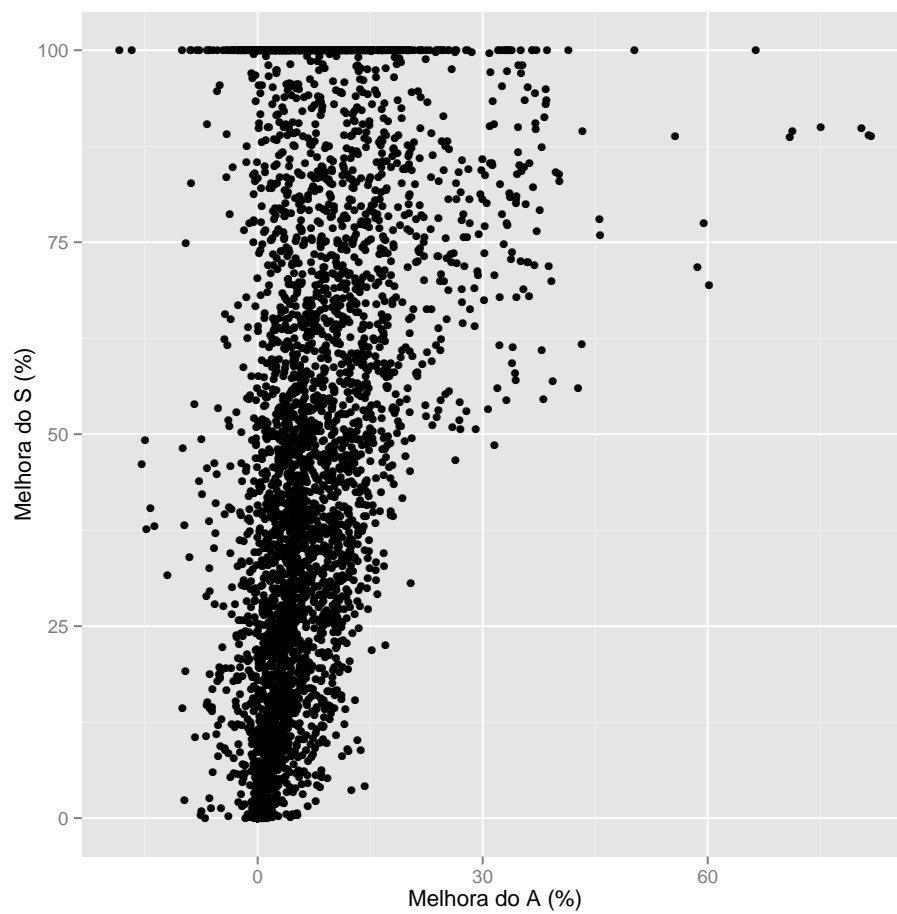


Figura 6.5: Relação entre a melhora na média dos índices (A) e a melhora na distribuição dos riscos (S) para o ErgoALWABP-S (S de *Smoothing*)

melhora, ou seja, todas estações verdes, a média dos índices OCRA das estações piora. Uma análise mais detalhada desta instância mostrou que existia uma estação amarela na solução inicial e 6 estações verdes. Possivelmente estas verdes tivessem um índice bem baixo e a amarela fosse quase verde, e para transformar a amarela em verde, foi necessário aumentar os índices das verdes já existentes para diminuir somente um pouco do índice da amarela, aumentando a média total, mas sem nenhum problema, porque agora todas estações estão em condições aceitáveis.

7 CONCLUSÃO

Estimativa de riscos ergonômicos em linhas de produção é uma necessidade. A garantia de saúde aos trabalhadores é uma prática regulamentada e fiscalizada hoje em dia, e eles não são os únicos beneficiados. Um trabalhador mais saudável produz mais e tem menos chance de faltar ao trabalho por licença médica devido às complicações obtidas no próprio local de trabalho. Balanceamento de linhas de produção é um problema amplamente tratado na literatura mas a inclusão de estimativas de riscos aos modelos deste problema é rara. Estimar riscos ergonômicos em linhas de produção operadas por portadores de deficiência tem um impacto ainda maior, pois estes trabalhadores podem ser mais suscetíveis aos riscos enfrentados na indústria. Este problema em particular não havia sido explorado anteriormente. Este trabalho mostra que é possível rebalancear uma linha de produção deste tipo com custos mínimos.

Estudos nesta área estão recém começando e ainda há muito a ser pesquisado. Somente os resultados destes experimentos já realçam características importantes do problema. A partir destas análises algumas novas ideias de como otimizar a solução foram pensadas, como por exemplo expandir o espaço de busca sem comprometer a taxa de produção final. Para o empregador, o aumento do tempo de ciclo significa uma potencial redução na lucratividade. Ao mesmo tempo, a melhora na saúde de seus empregados pode resultar em um aumento nos lucros. Esta relação entre ergonomia e economia não é bem definida ainda na indústria e pode influenciar a abordagem de futuras soluções. Certamente esta é uma característica que precisa ser melhor explorada para calibrar os interesses da otimização. Além disso, uma necessidade para resolução do problema é a aproximação entre a indústria e seus problemas reais e a teoria. Esta abordagem é, infelizmente, inexistente neste trabalho e é algo que trabalhos futuros deveriam abordar.

Testes computacionais apresentados neste trabalho mostram que é possível diminuir os riscos ergonômicos em uma linha de produção heterogênea. Além disto, é proposta uma abordagem que permite um relaxamento do tempo de ciclo, efetivamente diminuindo a eficiência da linha, mas os resultados obtidos indicam que com pouco relaxamento é possível diminuir bastante os riscos. Como a heurística *simulated annealing* funcionou para o problema homogêneo, ela foi implementada para o problema heterogêneo também. Outras heurísticas não foram exploradas neste trabalho, mas são um tema possível para trabalhos futuros sobre o assunto. Em suma, a inclusão de estimativas de riscos ergonômicos nos modelos e soluções que otimizam linhas de produção, ou até mesmo outros locais de trabalho na indústria, possui ainda muitas maneiras de ser explorada. Os resultados iniciais, porém, são promissores tanto para empregados quanto para empregadores.

BIBLIOGRAFIA

- Blum, Christian e Cristobal Miralles (jan. de 2011). “On solving the assembly line worker assignment and balancing problem via beam search”. Em: *Comput. Oper. Res.* 38.1, pp. 328–339. ISSN: 0305-0548. DOI: 10.1016/j.cor.2010.05.008.
- Boysen, Nils, Malte Flidner e Armin Scholl (2007). “A classification of assembly line balancing problems”. Em: *European Journal of Operational Research* 183.2, pp. 674–693. ISSN: 0377-2217. DOI: 10.1016/j.ejor.2006.10.010.
- Kirkpatrick, S., C. D. Gelatt e M. P. Vecchi (1983). “Optimization by simulated annealing”. Em: *Science* 220, pp. 671–680.
- Miralles, Cristobal et al. (2007). “Advantages of assembly lines in Sheltered Work Centres for Disabled. A case study”. Em: *International Journal of Production Economics* 110.1-2, pp. 187–197. URL: <http://ideas.repec.org/a/eee/proeco/v110y2007i1-2p187-197.html>.
- Miralles, Cristobal et al. (fev. de 2008). “Branch and bound procedures for solving the Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem: Application to Sheltered Work centres for Disabled”. Em: *Discrete Appl. Math.* 156.3, pp. 352–367. ISSN: 0166-218X. DOI: 10.1016/j.dam.2005.12.012.
- Occhipinti, E. (1998). “OCRA: a concise index for the assessment of exposure to repetitive movements of the upper limbs.” Em: *Ergonomics* 41.9, pp. 1290–1311.
- Otto, Alena e Armin Scholl (2011). “Incorporating ergonomic risks into assembly line balancing”. Em: *European Journal of Operational Research* 212.2, pp. 277–286. ISSN: 0377-2217. DOI: 10.1016/j.ejor.2011.01.056.
- Scholl, Armin e Christian Becker (2003). *State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing*. Jenaer Schriften zur Wirtschaftswissenschaft 20/2003. Friedrich-Schiller-Universität Jena, Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät. URL: <http://EconPapers.repec.org/RePEc:jen:jenasw:2003-20>.
- Sewell, E. C. e S. H. Jacobson (jul. de 2012). “A Branch, Bound, and Remember Algorithm for the Simple Assembly Line Balancing Problem”. Em: *INFORMS J. on Computing* 24.3, pp. 433–442. ISSN: 1526-5528. DOI: 10.1287/ijoc.1110.0462.