

RENATO TEIXEIRA DA SILVA

**APLICAÇÃO DE META-HEURÍSTICAS NA RESOLUÇÃO DO PROBLEMA
DE BALANCEAMENTO E DESIGNAÇÃO DE TRABALHADORES COM
DEFICIÊNCIA EM LINHA DE PRODUÇÃO**

Guaratinguetá

2012

RENATO TEIXEIRA DA SILVA

APLICAÇÃO DE META-HEURÍSTICAS NA RESOLUÇÃO DO PROBLEMA DE
BALANCEAMENTO E DESIGNAÇÃO DE TRABALHADORES COM DEFICIÊNCIA
EM LINHA DE PRODUÇÃO

Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia do Campus de Guaratinguetá,
Universidade Estadual Paulista, para a
obtenção do título de Mestre em Engenharia
Mecânica na área de Gestão e Otimização.

Orientador: Prof. Dr. Galeno José de Sena

Co-orientador: Prof. Dr. Antônio Augusto Chaves

Guaratinguetá

2012

S586a	Silva, Renato Teixeira da Aplicação de meta-heurísticas na resolução do problema de balanceamento e designação de trabalhadores com deficiência em linha de produção / Renato Teixeira da Silva – Guaratinguetá : [s.n], 2012. 58 f : il. Bibliografia: f. 55 Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2012. Orientador: Prof. Dr. Galeno José de Sena Coorientador: Prof. Dr. Antônio Augusto Chaves 1. Otimização combinatória I. Título CDU 519.863(043)
-------	--

RENATO TEIXEIRA DA SILVA

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

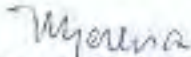
PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: GESTÃO E OTIMIZAÇÃO

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. GALENO JOSÉ DE SENA
Orientador / UNESP-FEG


Prof. Dr. MARCOS ANTONIO PEREIRA
UNESP-FEG


Prof. Dr. ANIBAL TAVARES DE AZEVEDO
UNICAMP

Outubro de 2012

DADOS CURRICULARES

RENATO TEIXEIRA DA SILVA

NASCIMENTO: 23.12.1987 – VOLTA REDONDA / RJ

FILIAÇÃO: Ricardo Camargo da Silva
Lucileila Teixeira Lima da Silva

2005/2009: Curso de Graduação
Engenharia de Produção – Universidade Federal Fluminense

2010/2012: Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de
Mestrado, na Faculdade de Engenharia do Campus de
Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.

Aos meus pais

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus pelo dom da vida.

Aos meus pais, pelo apoio e preocupação durante as idas e vindas a FEG.

A Carine, pela compreensão nos momentos em que me ausentei para me dedicar aos estudos.

Aos meus orientadores Antônio e Galeno, pela disponibilidade para me orientar, pela confiança depositada e pelo crescimento acadêmico obtido nesse período.

A todos os professores da pós-graduação que tive convívio neste período, por todo conhecimento transmitido e a acessibilidade constante.

Aos membros da banca, pela disposição e análise deste documento e pelas melhorias propostas.

A todos os amigos da FEG criados ao longo de todo curso, por todas as conversas, dicas e almoços.

A Michelin, por me permitir cursar disciplinas no horário de trabalho, compensando posteriormente.

Ao Christian e ao Nilson, grandes amigos que me encorajaram a percorrer este caminho.

A Márlen, pelo apoio mútuo durante nossa aventura simultânea na vida acadêmica.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização desta pesquisa.

“Poucos são os que enxergam com os próprios olhos e sentem com o próprio coração.”

Albert Einstein

SILVA, R. T. **Aplicação de meta-heurísticas na resolução do Problema de Balanceamento e Designação de Trabalhadores com Deficiência em Linha de Produção.** 2012. 58 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

RESUMO

A Organização Internacional do Trabalho estima que existem cerca de 650 milhões de pessoas com deficiência em idade produtiva. No entanto, esta parcela da população possui altos índices de desemprego devido a várias barreiras. Uma alternativa para facilitar a inclusão dessas pessoas é a criação de Centros de Trabalho para pessoas com Deficiência (CTD's) onde as pessoas com deficiência tenham a oportunidade de experimentar um ambiente de trabalho real antes de irem para um emprego “normal”. Neste tipo de ambiente, onde é impossível ao gestor prever quais trabalhadores estarão disponíveis a cada dia devido às altas taxas de absenteísmo, há a necessidade de se definir uma organização mais produtiva diariamente. Neste contexto se torna oportuna a utilização do Problema de Balanceamento de Linha e Designação de Trabalhadores (em inglês ALWABP), onde se busca minimizar o tempo de ciclo a partir de um dado número de trabalhadores, alocando tarefas às estações de trabalho e trabalhadores às estações, tendo em vista que alguns trabalhadores podem ser muito lentos para executar certas tarefas ou até incapazes, devido a alguma deficiência que eles apresentam, e muito eficientes na execução de outras. O objetivo geral desta dissertação consiste em empregar diferentes meta-heurísticas para resolver o ALWABP, comparando com os melhores resultados das instâncias encontradas na literatura. Dentre várias meta-heurísticas disponíveis na literatura foram utilizados o *Harmony Search* (HS), o *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS) e o *Clustering Search* (CS) utilizando o HS e o ALNS como heurísticas geradoras de soluções. Cada uma das quatro implementações foram testadas em 320 instâncias propostas na literatura divididas em quatro famílias. Os experimentos computacionais mostraram bons resultados, conseguindo contribuir em algumas instâncias com a obtenção de novas soluções, melhores que as já conhecidas. Conclusões a respeito das implementações e sugestões de trabalhos futuros também são apresentadas.

PALAVRAS-CHAVE: Meta-heurísticas. ALWABP. Harmony Search. ALNS. Clustering Search. Trabalhador com deficiência

SILVA, R. T. **Using metaheuristics to solve the Assembly Line Worker with Disability Assignment and Balancing Problem.** 2012. 58 p. Dissertation (Master in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

ABSTRACT

The International Labour Organization estimates that there are approximately 650 million disabled people in working age. However, this population presents high rates of unemployment due to numerous barriers. An alternative to facilitate the inclusion of these people is the establishment of Centers for Working People with Disabilities where people with disabilities have the opportunity to experience a real work environment before going to a “normal” job. In this type of environment, where it is impossible to predict which workers will be available each day due to high rates of absence in this population, there is a need to define a more productive organization on a daily basis. In this context it becomes appropriate to use the Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem (ALWABP), which seeks to minimize the cycle time for a given number of workers, assigning tasks to workstations and workers to stations, considering that some workers may be too slow to perform certain tasks, or even unable due to some deficiency they present, and very efficient in performing others. The aim of this dissertation is to employ different meta-heuristics to solve the ALWABP, comparing with the best results of instances found in the literature. Among several meta-heuristics available in the literature were used Harmony Search (HS), Adaptive Large Neighborhood Search (ALNS) and Clustering Search (CS) using the HS and ALNS as heuristics for the generation of solutions. Each of the four implementations has been tested in 320 instances proposed in the literature, classified into four families. The computational experiments showed good results, and in some instances obtaining better solution values best known. Conclusions regarding the implementations and suggestions for future work are also presented.

KEYWORDS: Meta-heuristics. ALWABP. Harmony Search. Clustering Search. Worker with disability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Grafo de precedência entre as tarefas.....	17
Figura 2 – Analogia entre a improvisação musical e otimização. (Geem, 2010).....	24
Figura 3 – Processo de otimização do HS. (adaptado de Degertekin (2008)).....	25
Figura 4 – Variação do PAR e bw versus o numero de gerações. (Mahdavi <i>et al.</i> , 2007).....	27
Figura 5 – Vizinhanças implícitas do ALNS. (Pisinger e Ropke, 2010).....	28
Figura 6 – O processo de otimização do ALNS.	29
Figura 7 – Estratégia híbrida do CS (Chaves <i>et al.</i> , 2009)	32
Figura 8 – Exemplo de solução do ALWABP. (Adaptado de Chaves <i>et al.</i> (2009a))	35
Figura 9 – Pseudocódigo algoritmo HS.....	38
Figura 10 – Exemplo dos movimentos das heurísticas dos métodos de destruição.	39
Figura 11 – Pseudocódigo algoritmo ALNS.	40
Figura 12 – Pseudocódigo algoritmo CS. (adaptado de Chaves <i>et al.</i> (2009a)).....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros do CS	41
Tabela 2 – Características das Instâncias	43
Tabela 3 – Resumo dos resultados dos testes realizados.....	44
Tabela 4 – Resultados Família Roszieg.....	45
Tabela 5 – Resultados Família Heskia	46
Tabela 6 – Resultados Família Tonge	47
Tabela 7 – Resultados Família Wee-Mag.....	48
Tabela 8 – Percentual de melhoria do desempenho do algoritmo quando se implementa também o CS	49
Tabela 9 – Resultados dos testes das novas instâncias.....	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALNS	- <i>Adaptive Large Neighborhood Search</i>
ALWABP	- <i>Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem</i>
bw	- <i>Bandwidth</i>
CS	- <i>Clustering Search</i>
CTD	- Centros de Trabalho para Pessoas com Deficiências
HGA	- <i>Hybrid Genetic Algorithm</i>
HM	- <i>Harmony Memory</i>
HMCRR	- <i>Harmony Memory Considering Rate</i>
HMS	- <i>Harmony Memory Size</i>
HS	- <i>Harmony Search</i>
IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBS	- <i>Iterated Beam Search</i>
IHS	- <i>Improved Harmony Search</i>
LNS	- <i>Large Neighborhood Search</i>
PAR	- <i>Pitch Adjusting Rate</i>
PCD	- Pessoa com deficiência
OIT	- Organização Internacional do Trabalho
ONU	- Organização das Nações Unidas
SALBP	- <i>Simple Assembly Line Balancing Problem</i>
VND	- <i>Variable Neighborhood Descent</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos.....	15
1.2	Classificação da pesquisa	15
1.3	Organização do trabalho	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1	Formulação matemática.....	19
2.2	Trabalhos recentes	21
3	MÉTODOS.....	23
3.1	Meta-heurísticas.....	23
3.2	Harmony Search	24
3.3	Adaptive Large Neighborhood Search	28
3.4	<i>Clustering Search</i>	31
4	IMPLEMENTAÇÃO	35
4.1	Representação da Solução	35
4.2	HS aplicado ao ALWABP	36
4.3	ALNS aplicado ao ALWABP	37
4.4	CS aplicado ao ALWABP	40
5	RESULTADOS	43
5.1	Testes com instâncias presentes na literatura	43
5.2	Testes para avaliar a variação no tempo de ciclo em uma linha de produção com 1 ou 2 trabalhadores com deficiência	49
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	53
6.1	Trabalhos futuros	54
	REFERÊNCIAS	55

1 INTRODUÇÃO

No último relatório da Organização Mundial da Saúde sobre a Deficiência estimou-se que mais de 1 bilhão de pessoas no mundo apresentam algum tipo de deficiência, sendo algo próximo a 15% da população mundial (Organização Mundial da Saúde, 2012). No Brasil, segundo os resultados preliminares do Censo 2010, cerca de 45,6 milhões de pessoas possuem algum tipo de deficiência (cerca de 24% da população do país) (IBGE, 2011).

A Organização das Nações Unidas (ONU) conta com uma convenção para defesa dos direitos das pessoas com deficiência desde 2006, ratificada pelo Congresso Nacional Brasileiro em 2008 que serve de linha-guia para política nacional para a pessoa com deficiência. Nela, em seu artigo 27 discorre sobre o trabalho e o emprego para pessoas com deficiência visando, sobretudo, ratificar a igualdade de direitos entre trabalhadores já estabelecida em outras convenções da Organização Internacional do Trabalho (OIT) (Resende e Vital, 2008).

A OIT estima que cerca de 650 milhões de pessoas com deficiência estão em idade produtiva (Murray, 2010). No entanto, esta população possui altas taxas de desemprego: cerca de 50 a 70% em países industrializados e de 80 a 90% em países em desenvolvimento (Organização Das Nações Unidas, 2008). Segundo a Organização Mundial Da Saúde (2012), as quatro principais barreiras à entrada de pessoas com deficiência no mercado de trabalho são:

- Falta de acesso: tanto à educação e treinamento quanto acesso físico;
- Conceitos errôneos sobre a deficiência: não só do empregador mas também da família da pessoa com deficiência, por menosprezar suas habilidades;
- Discriminação: desconfiança por parte dos empregadores da capacidade das pessoas com deficiência e de seu comportamento dentro da equipe de trabalho;
- Superproteção nas leis do trabalho: em muitos países há leis que dão “privilégios” às pessoas com deficiência, por exemplo, diminuindo sua carga de trabalho, aumentando benefícios, fazendo com que este profissional seja visto pelo empregador como mais custoso que um profissional sem deficiências.

O Brasil, visando inserir essas pessoas no mercado de trabalho, na Lei nº 8.213 de 24 de julho de 1991 obriga as empresas com mais de 100 funcionários terem seu quadro de funcionários formado por 2 a 5% de pessoas com deficiência (Brasil, 1991). Outra medida adotada em alguns países como estratégia de facilitar a inclusão dessas pessoas no mercado de

trabalho é a criação de Centros de Trabalho para Pessoas com Deficiências (CTD's). Os CTD's são organizações sem fins lucrativos onde os trabalhadores com deficiência passam pela etapa de integração com o mercado de trabalho, sendo absorvidos posteriormente pelo mercado "normal" de trabalho. Um de seus princípios é afastar-se do estereótipo tradicional que considera as pessoas com deficiência incapazes de desenvolver um trabalho profissional contínuo, tendo em vista que os CTD's visam atender mercados reais, necessitando ser suficientemente flexíveis e eficientes para absorver suas variações.

Miralles *et al.* (2007) descreve como a aplicação de linhas de produção em CTD's provê muitas vantagens, sendo que a divisão tradicional do trabalho em tarefas únicas é capaz de tornar imperceptíveis determinadas deficiências do trabalhador. Outra atribuição da tarefa é servir de método terapêutico para reabilitação das deficiências. Entretanto, algumas restrições específicas relacionadas à variabilidade dos tempos entre trabalhadores para executar a mesma tarefa surgem neste ambiente, devendo o balanceamento conciliar os seguintes objetivos:

- Maximizar a eficiência da linha de produção, balanceando a carga de trabalho atribuída a cada trabalhador disponível em cada estação;
- Satisfazer e respeitar as restrições existentes neste ambiente devido aos fatores humanos ao atribuir tarefas aos trabalhadores.

Após analisar alguns CTD's, Miralles *et al.* (2007) observaram algumas características que podem ser encontradas neste ambiente, que serviram de motivação para a definição do Problema de Balanceamento de Linha e Designação de Trabalhadores (ALWABP, do inglês *Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem*).

O ALWABP pode ser classificado como um problema NP-difícil, sendo uma generalização do Problema Simples de Balanceamento de Linhas de Produção (SALBP, do inglês *Simple Assembly Line Balancing Problem*) (Scholl e Becker, 2006), que também é um problema NP-difícil. Para problemas como estes a aplicação de meta-heurísticas é oportuna, buscando obter bons resultados em um tempo computacional competitivo.

Sendo assim, propõe-se utilizar neste trabalho as meta-heurísticas *Harmony Search* (HS), *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS) e *Clustering Search* (CS) para a resolução do ALWABP (Geem *et al.*, 2001; Chaves *et al.*, 2007; Pisinger e Ropke, 2010). O objetivo é comparar o desempenho das três meta-heurísticas entre si e com as melhores soluções encontradas na literatura. O HS possui método de otimização inspirado no processo musical de busca por um estado perfeito de harmonia, como é feito durante a improvisação do

jazz. O ALNS é uma extensão da meta-heurística LNS, que trabalha com diferentes métodos de destruição e reparo que combinados percorrem várias vizinhanças diferentes do espaço de busca de soluções. Já o CS visa detectar regiões promissoras no espaço de buscas e explorá-las por meio de um método de busca local, utilizando outras meta-heurísticas como geradoras de soluções.

1.1 Objetivos

O objetivo geral desta dissertação consiste em empregar diferentes meta-heurísticas para resolver o Problema de Balanceamento de Linha de Produção e Designação de Trabalhadores comparando com os melhores resultados das instâncias encontradas na literatura.

Como objetivos específicos pode-se relacionar:

- Comparar melhor solução, média de soluções encontradas e tempo de execução das meta-heurísticas com os das instâncias trabalhadas na literatura.
- Híbrido as meta-heurísticas, testar e comparar o desempenho com o encontrado na literatura.

1.2 Classificação da pesquisa

De acordo com Bertrand e Fransoo (2002) e Miguel *et al.* (2010) este trabalho pode ser classificado como uma pesquisa básica, com objetivos axiomáticos normativos, pois o modelo desenvolvido visa desenvolver normas, estratégias e ações buscando melhorar os resultados disponíveis na literatura. A forma de abordar o problema é quantitativa, sendo o método de pesquisa a modelagem.

1.3 Organização do trabalho

Esta dissertação está organizada em seis capítulos, sendo este o primeiro.

O capítulo 2 traz uma revisão teórica do ALWABP, com suas definições, formulação matemática e uma revisão bibliográfica.

O capítulo 3 apresenta as meta-heurísticas *Harmony Search*, *Adaptive Large Neighborhood Search* e *Clustering Search*, explicando seu funcionamento e apresentando seus principais parâmetros.

No capítulo 4 discorre-se sobre a implementação das meta-heurísticas para a resolução do ALWABP. Nele as principais características e parâmetros para cada uma das meta-heurísticas são detalhadas e são apresentados os respectivos pseudocódigos.

O capítulo 5 traz os resultados computacionais oriundos da execução de testes padronizados em cada uma das implementações junto a uma comparação das meta-heurísticas HS, ALNS, CS_HS, CS_ALNS com os resultados da literatura e os resultados computacionais oriundos da resolução de um novo conjunto de instâncias de teste com um ou dois trabalhadores com deficiência apenas.

O capítulo 6 conclui o trabalho com as considerações finais.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Uma linha de produção é um sistema produtivo orientado pelo fluxo e organizado em estações de trabalho em série. A ideia é que cada unidade de produção passe pelas várias estações de trabalho através de um sistema de transporte, por exemplo, uma esteira ou um teleférico, para ser processada. Seu desenvolvimento possibilitou às empresas produzir em larga escala de forma padronizada e com custos eficientes. Este sistema vem ganhando força também na produção de baixo volume de produtos customizados. Tomando em conta decisões relacionadas ao gerenciamento destes sistemas, os problemas de balanceamento de linha de produção auxiliam de forma importante as decisões no nível tático e operacional das empresas. Na literatura, sua forma mais básica é conhecida como Problema Simples de Balanceamento de Linhas de Produção (SALBP, do inglês *Simple Assembly Line Balancing Problem*) (Scholl e Becker, 2006).

Para compreender o SALBP, sejam $k=1,...,m$ estações de trabalho organizadas em sequência e $N=\{1,...,n\}$ o conjunto de tarefas necessárias para a fabricação de um determinado produto. Cada tarefa $i \in N$ está associada a um tempo de execução t_i . Devido a restrições de processo, as tarefas devem obedecer as relações de precedência, indicando quais devem ser realizadas antes das outras. Estas relações podem ser demonstradas através de um grafo, como pode ser visto na Figura 1. O problema consiste em designar as tarefas às diferentes estações de trabalho, respeitando às relações de precedência entre as tarefas. O tempo de execução da estação de trabalho é calculado a partir da soma dos tempos de todas as tarefas alocadas nela. A taxa de produção desta linha, que ditará sua capacidade, será dada pelo seu tempo de ciclo C , que é igual ao maior tempo de execução das estações de trabalho (Boysen *et al.*, 2008).

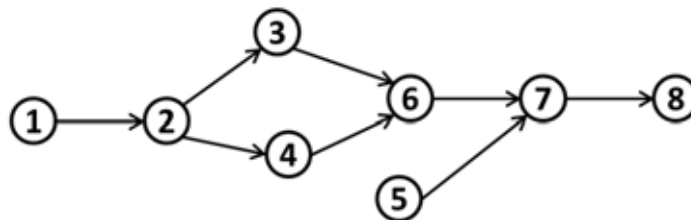


Figura 1 – Grafo de precedência entre as tarefas (elaborado pelo autor)

O SALBP é caracterizado por um conjunto de fatores (Scholl e Becker, 2006; Boysen *et al.*, 2007):

- Produção em massa de um produto homogêneo;

- Todas as tarefas são processadas em um tempo pré-determinado (não existem processos alternativos);
- Linha ritmada com um tempo de ciclo fixo de acordo com a quantidade de saída desejada;
- A linha é considerada em série, sem linhas alimentadoras ou elementos paralelos;
- A sequência de processamento de tarefas está sujeita a restrições de precedência;
- Tempo de tarefas t_i determinísticos (e inteiros);
- Sem restrições de tarefas além das restrições de precedência;
- As tarefas não podem ser divididas entre duas ou mais estações;
- Todas as estações estão igualmente equipadas com respeito a máquinas e trabalhadores.

Problemas de balanceamento de linha apresentam quatro abordagens com objetivos distintos. A primeira abordagem busca, a partir de um tempo de ciclo C , minimizar o número de estações de trabalho m . Ela é conhecida como SALBP-1. A segunda abordagem, SALBP-2, visa minimizar o tempo de ciclo C partindo de um número fixo m de estações de trabalho. Esta abordagem, devido às características deste trabalho, será explorada ao longo da pesquisa. A terceira, chamada SALBP-E, busca maximizar a eficiência da linha de produção minimizando simultaneamente o número de estações de trabalho m e o tempo de ciclo C de forma a minimizar seu produto. Por fim, a última abordagem, SALBP-F, objetiva verificar se existe uma solução viável a partir de um número de estações de trabalho m e tempo de ciclo C fixos (Scholl e Becker, 2006).

Ao se trabalhar com CTD's, a utilização do SALBP é inviável, devido às características singulares de cada trabalhador. Tendo este fato como motivação, Miralles *et al.* (2007) propuseram uma extensão deste problema, denominada Problema de Balanceamento de Linha e Designação de Trabalhadores (ALWABP, do inglês *Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem*). Neste problema, o objetivo não consiste apenas em alocar tarefas em estações de trabalho, mas também trabalhadores disponíveis às estações, tendo em vista que alguns trabalhadores podem ser muito lentos para executar certas tarefas ou até incapazes, devido à alguma deficiência que elas apresentam, e muito eficientes na execução de outras.

Além das considerações do SALBP apresentadas anteriormente, o ALWABP possui as seguintes características:

- Os tempos de processamento das tarefas e as relações de precedência são definidos previamente;

- Existe um dado número de trabalhadores disponíveis, e o tempo de processamento das tarefas pode ser diferente dependendo de qual trabalhador executa as tarefas (varia conforme a habilidade e capacidade de cada trabalhador);
- Não existem trabalhadores lentos ou rápidos. Ao invés disso, trabalhadores podem ser muito lentos, ou até incapazes, de executar algumas tarefas, mas muito eficientes quando executam outras tarefas;
- Toda tarefa é atribuída para somente uma estação de trabalho, contanto que o trabalhador selecionado para aquela estação seja capaz de realizar a tarefa, e que as relações de precedência sejam satisfeitas.

Como ocorre com o SALBP, o ALWABP também apresenta quatro abordagens distintas. Dentre elas, a mais utilizada é a ALWABP-2, que minimiza o tempo de ciclo dado o número de trabalhadores. Como a finalidade dos CTD's é a inclusão de pessoas com deficiência no mercado de trabalho, a abordagem ALWABP-1, que minimiza número de trabalhadores dado um tempo de ciclo C , não é muito usual. Sendo assim, este trabalho limita-se a tratar o ALWABP-2.

Boysen *et al.* (2007), na busca por diminuir a lacuna existente entre a academia e a prática, propuseram uma classificação para os problemas de balanceamento de linhas a partir de uma notação de três elementos $[\alpha | \beta | \gamma]$, sendo:

- α são possíveis características relacionadas ao grafo de precedências;
- β são possíveis características relacionadas às estações ou à linha de produção;
- γ indica os objetivos de otimização.

O ALWABP-2, segundo esta nomenclatura, classifica-se como $[pa, link, cum|equip|C]$. Isto porque o objetivo deste problema é minimizar o tempo de ciclo ($\gamma = C$), cada trabalhador possui características únicas ($\beta = equip$), o tempo de execução das tarefas varia de acordo com o trabalhador ($\alpha = cum$), estas variações influenciam e devem ser consideradas no cálculo da função objetivo ($\alpha = pa$) e existem conjuntos de tarefas encadeadas, que só podem ser alocadas para um mesmo trabalhador ($\alpha = link$).

2.1 Formulação matemática

A formulação matemática para o ALWABP, proposta por Miralles *et al.* (2008), utiliza a seguinte notação:

- x_{shi} é uma variável binária igual a 1 somente se a tarefa i é atribuída para o trabalhador h na estação s
- y_{sh} é uma variável binária igual a 1 somente quando o trabalhador h é atribuído para a estação s .
- t_{hi} o tempo de operação para o trabalhador h executar a tarefa i
- D_j o conjunto de tarefas que precedem imediatamente a tarefa j na rede de precedência.

O tempo de ciclo (C) é a variável de decisão que representa a quantidade de tempo que um produto gasta para ser processado por uma estação da linha de produção, tendo relação direta com a taxa de produção da linha.

$$\text{Min } z = C \quad (1)$$

sujeito a:

$$\sum_{h \in H} \sum_{s \in S} x_{shi} = 1; \quad \forall i \in N \quad (2)$$

$$\sum_{s \in S} y_{sh} \leq 1; \quad \forall h \in H \quad (3)$$

$$\sum_{h \in H} y_{sh} \leq 1; \quad \forall s \in S \quad (4)$$

$$\sum_{h \in H} \sum_{s \in S} s \cdot x_{shi} \leq \sum_{h \in H} \sum_{s \in S} s \cdot x_{shj} \quad \forall i, j / i \in D_j \quad (5)$$

$$\sum_{i \in N} t_{hi} \cdot x_{shi} \leq C \quad \forall h \in H; \forall s \in S \quad (6)$$

$$\sum_{i \in N} x_{shi} \leq P \cdot y_{sh} \quad \forall h \in H; \forall s \in S \quad (7)$$

$$y_{sh} \in [0,1] \forall s \in S, h \in H \quad (8)$$

$$x_{shi} \in [0,1] \forall s \in S, h \in H, i \in N \quad (9)$$

Sendo que:

- A função objetivo (1) busca minimizar o tempo de ciclo C ;
- As restrições (2) garantem que toda tarefa i é atribuída para apenas uma estação s e um trabalhador h ;
- As restrições (3) e (4) asseguram que todo trabalhador pode ser atribuído para somente uma única estação, e que em toda estação existe somente um trabalhador;
- O conjunto de restrições (5) reflete as relações de precedência entre as tarefas i e j , onde i é predecessor de j ;

- As restrições (6) e (7) implicam que todo trabalhador h atribuído para estação s pode ter mais que uma tarefa, desde que, o tempo de ciclo C não seja extrapolado;
- Como C e y_{sh} são ambos variáveis, as restrições (6) e (7) são definidas separadamente para que o modelo seja mantido linear;
- A constante P precisa ter um valor maior que o somatório de todos os tempos de processamento;
- As restrições (8) e (9) definem as variáveis y_{sh} e x_{shi} como binárias.

2.2 Trabalhos recentes

Miralles *et al.* (2007) apresentaram a formulação do ALWABP e realizaram um estudo de caso em um CTD que fabricava componentes eletrônicos. Por se tratar de uma aplicação com baixa complexidade, (7 trabalhadores e 18 tarefas), o problema foi otimizado utilizando o CPLEX 9.0[®].

Chaves *et al.* (2007) e Chaves *et al.* (2008) utilizaram a meta-heurística *Clustering Search* (CS) tendo como meta-heurística de busca o *Simulated Annealing* (SA) para resolver o ALWABP-2. Neste trabalho eles também criaram o banco de dados de problemas de teste inspirados nos problemas de teste do SALBP (Hoffmann,1990), utilizaram o CPLEX 10.01[®] para resolver as instâncias de teste possíveis e compararam estes resultados com os obtidos por meio do CS, que reduziu de forma significativa o tempo computacional.

Miralles *et al.* (2008) propuseram a utilização de procedimentos *branch and bound* para resolver o ALWABP-2. Esta proposta foi aplicada ao mesmo caso real de Miralles *et al.* (2007), obtendo a solução ótima do problema com menor tempo computacional.

Costa e Miralles (2008) e Costa e Miralles (2009) trabalharam com a rotação de tarefas no ALWABP. Para trabalhadores com deficiência, esta alternativa seria benéfica em termos de motivação dos trabalhadores, auxílio no combate de doenças de trabalho, por ter um caráter terapêutico, propondo novos treinamentos e desafios aos trabalhadores. O problema, com uma formulação linear inteira mista, foi resolvido através de um método de decomposição heurístico e testado algumas instâncias do ALWABP.

Chaves *et al.* (2009a) e Chaves *et al.* (2009b) apresentaram um *Clustering Search* tendo como meta-heurística de busca o *Iterated Local Search* (ILS). Os resultados obtidos foram comparados com o *benchmark* da literatura (Chaves *et al.*, 2007; Chaves *et al.*, 2008). O novo

método proposto foi superior em relação obtido com o uso do SA em termos de qualidade de solução e robustez do método.

Costa *et al.* (2009) avaliaram o impacto da presença de trabalhadores com deficiência na eficiência de linhas de produção. A partir dos resultados apresentados, viu-se que um bom planejamento da alocação de tarefas tornaria praticamente invisíveis as deficiências de um trabalhador, trazendo pouca ou nenhuma modificação na eficiência das linhas de produção.

Moreira e Costa (2009a) pesquisaram heurísticas construtivas para o ALWABP. A importância desta pesquisa se dá na aplicação de métodos aproximativos mais elaborados para resolver o ALWABP, que tendem a ter um tempo menor de convergência quando partem de uma boa solução inicial.

Moreira e Costa (2009b) propuseram um algoritmo Busca Tabu para ALWAPB-2. O objetivo era criar um algoritmo com quatro características: simplicidade, flexibilidade, robustez e velocidade. Buscando comparar os resultados, foram trabalhadas duas formas de geração de solução inicial: aleatória e gulosa, e a última trouxe melhores resultados.

Blum e Miralles (2010) utilizam um algoritmo baseado em *Beam Search* (BS) para resolver o ALWABP-2. O princípio do BS consiste em trabalhar com extensões de soluções parciais de várias maneiras possíveis. A partir de um conjunto B, chamado *beam*, de soluções parciais, a cada passo o algoritmo verifica um conjunto de extensões viáveis para estas soluções. Por ser um problema de minimização, o BS calcula um limite inferior para cada extensão e o algoritmo seleciona as melhores extensões para compor o novo conjunto B tendo como retorno a melhor solução completa formada, caso exista.

Araújo *et al.* (2010) trabalharam com uma extensão do ALWABP, que permite a presença de estações paralelas. Os resultados indicaram que seu uso pode melhorar o desempenho da linha de produção, permitindo, por exemplo, a adição de trabalhadores lentos sem prejuízo à eficiência da linha de produção.

Moreira *et al.* (2012) apresentaram uma coletânea de heurísticas simples e rápidas que podem ser utilizadas, de forma autônoma, como geradoras de soluções iniciais ou como decodificadoras de soluções para outras heurísticas para o ALWABP. Além disso, utilizou uma dessas heurísticas como decodificadora para um *Hybrid Genetic Algorithm* (HGA) que, a partir dos resultados experimentais obtidos, mostraram ser este o atual método que representa o estado-da-arte para resolver este problema.

3 MÉTODOS

3.1 Meta-heurísticas

Para a resolução do ALWABP serão empregadas meta-heurísticas, que são métodos de solução que comandam uma interação entre processos de melhoria locais e estratégias de alto nível para criar um processo capaz de escapar de ótimos locais, realizando uma busca robusta no espaço de soluções do problema (Glover e Kochenberger, 2003). O termo meta-heurística foi introduzido pela primeira vez em Glover (1986) composto a partir das palavras heurística, do verbo grego *heuristiké*, que significa “a arte de descobrir” e meta, do grego *metá*, que transmite a ideia de “além, de um nível superior”.

Blum e Roli (2003), em uma das maneiras de classificar meta-heurísticas apresentada em seu trabalho, as divide com base nas técnicas utilizadas para explorar o espaço de soluções:

- *métodos de trajetória*, nos quais a exploração do espaço de soluções é feita por meio de movimentos aplicados a cada iteração sobre uma solução corrente, visando gerar uma outra boa solução em sua vizinhança e;
- *métodos baseados em população*, nos quais se mantém um grupo de boas soluções que são combinadas visando obter soluções ainda melhores. *Simulated Annealing* (SA), Busca Tabu (TS, do inglês *Tabu Search*) e *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS) são exemplos de métodos de trajetória. Algoritmos Genéticos (GA, do inglês *Genetic Algorithms*), Núvem de partículas (PSO, do inglês *Particle Swarm Optimization*), *Harmony Search* (HS) e Sistemas Imunológicos Artificiais (AIS, do inglês *Artificial Immune Systems*) são exemplos de métodos baseados em população.
- *metodos híbridos*: métodos que combinam uma meta-heurística com outras técnicas de otimização a fim de se obter um melhor desempenho a partir da combinação das vantagens das técnicas utilizadas: por exemplo, o *Clustering Search* (CS).

Neste trabalho, pretende-se aplicar as seguintes meta-heurísticas: HS; ALNS e; CS utilizando HS e ALNS como geradores de soluções. Uma breve descrição destas meta-heurísticas citadas será dada neste capítulo.

3.2 Harmony Search

Na literatura existem várias meta-heurísticas inspiradas em fenômenos naturais como, por exemplo, o recozimento físico no *Simulated Annealing* (Kirkpatrick, 1984), a memória humana na busca tabu (Glover, 1986), o processo de evolução no algoritmo genético (Goldberg e Holland, 1988), entre outras. Uma nova meta-heurística, introduzida por Geem *et al.* (2001), chamada Busca Harmônica (HS, do inglês *Harmony Search*) é inspirada no processo musical de busca por um estado perfeito de harmonia, como é feito durante a improvisação do jazz.

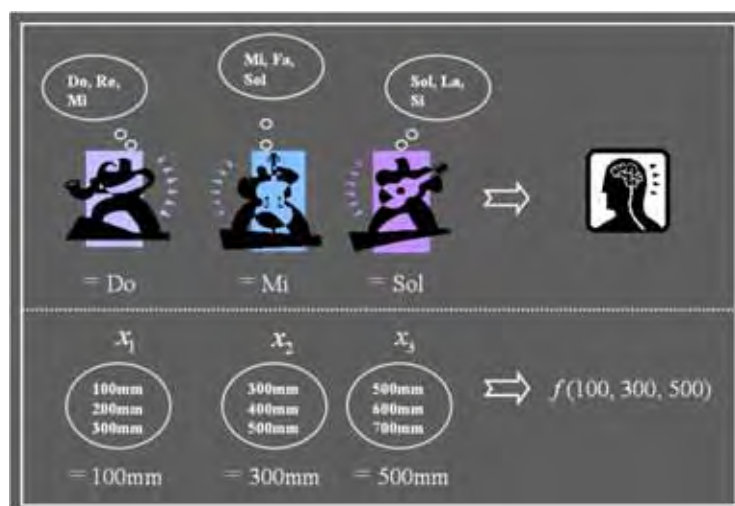


Figura 2 – Analogia entre a improvisação musical e otimização. (Geem, 2010)

A Figura 2 apresenta uma analogia entre o processo de improvisação musical e o de otimização. Cada músico de jazz toca um possível acorde musical, que juntos, formarão uma harmonia. Caso a harmonia gerada seja boa, esta experiência será guardada em uma memória do músico, para ser usada futuramente, aumentando as chances de se melhorar a harmonia gerada em uma próxima rodada. Analogamente, no processo de otimização cada variável de decisão tem seus valores gerados inicialmente de forma aleatória dentro de um intervalo possível, que, combinados, geram uma solução da função objetivo. Caso esta seja uma boa solução, estas variáveis serão guardadas em uma memória, para que sejam usadas na geração de novas soluções, aumentando as possibilidades de melhorar os resultados.

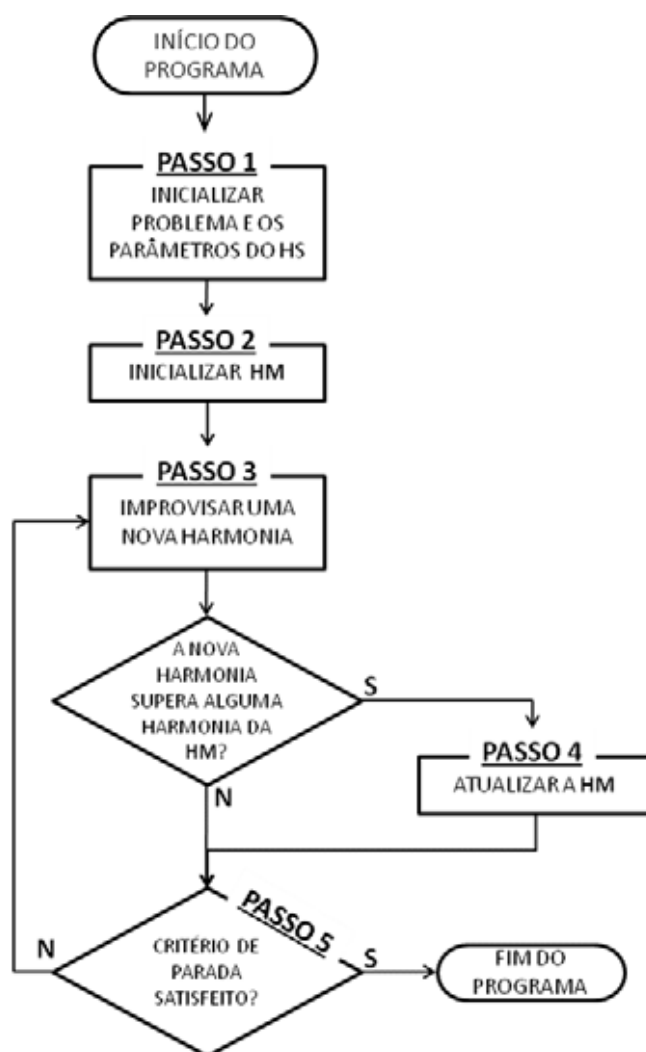


Figura 3 – Processo de otimização do HS. (adaptado de Degertekin (2008))

O processo de otimização do algoritmo HS, como visto na Figura 3, consiste em cinco passos (Geem *et al.*, 2001; Lee e Geem, 2005; Coelho e Bernert, 2009):

Passo 1: Inicialização do problema de otimização e dos parâmetros do algoritmo

Primeiramente, o problema de otimização é especificado conforme abaixo:

$$\text{Minimizar } F \quad \text{sujeito a } x_i \in X_i, \quad i = 1, \dots, N$$

sendo que F é a função objetivo, e x é o conjunto das variáveis de decisão (x_i); X_i é o conjunto de possíveis valores para cada variável de decisão, sendo para variáveis contínuas $x_{i,lower} < X_i < x_{i,upper}$, onde $x_{i,lower}$ e $x_{i,upper}$ designam os limites inferior e superior, ou, $X_i = \{ x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(K) \}$ para variáveis discretas. Os parâmetros necessários para resolver o algoritmo HS são especificados neste passo. Assim, o

número de soluções na memória harmônica (HMS, em inglês *Harmony Memory Size*), que é o tamanho da matriz da memória harmônica, a taxa de consideração da memória harmônica (HMCR, em inglês *Harmony Memory Considering Rate*), taxa de afinação (PAR, em inglês *Pitch Adjusting Rate*), e o número máximo de buscas (critério de parada) são selecionados neste passo (os parâmetros HMCR e PAR serão definidos no passo 3, onde são utilizados).

Passo 2: Inicializar a memória harmônica (HM, do inglês *Harmony Memory*)

Na HM ficam alocados os vetores de solução. Neste passo, a matriz HM, apresentada na equação (10), é preenchida com vetores de soluções gerados aleatoriamente utilizando uma distribuição uniforme.

$$HM = \begin{bmatrix} x_1^1 & \cdots & x_N^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_1^{HMS} & \cdots & x_N^{HMS} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Passo 3: Improvisar uma nova harmonia a partir da HM.

Um novo vetor de harmonia, $x' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_N)$, é gerado com base na consideração da memória, ajustes finos e seleção aleatória. Em analogia ao processo musical, a criação de um novo vetor de solução, uma nova harmonia, é denominada improvisação. Na consideração da memória, cada valor de uma variável (x'_i) da nova solução é definido a partir de qualquer valor respectivo da HM $[x_i^1, \dots, x_i^{HMS}]$. A HMCR, variando de 0 e 1, é a taxa de consideração de um valor dos valores históricos contidos na HM, enquanto $(1 - HMCR)$ é a taxa de escolha aleatória de um valor dentro do intervalo de possíveis valores.

$$x'_i \leftarrow \begin{cases} x'_i \in \{x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^{HMS}\} \\ x'_i \in X_i \end{cases} \quad (11)$$

Em seguida, todo componente obtido a partir da consideração da memória é examinado para determinar quando ele deve ter seu tom ajustado. O PAR, que também varia de 0 a 1, é a taxa de ajuste do valor obtido na memória, enquanto $(1 - PAR)$ é a taxa em que o valor obtido da memória é considerado sem alterações.

$$\text{Decisão de ajuste de tom de } x'_i \leftarrow \begin{cases} \text{Sim} & \text{com a probabilidade } PAR \\ \text{Não} & \text{com a probabilidade } (1 - PAR) \end{cases} \quad (12)$$

Caso haja o ajuste para o tom de x'_i , este valor deve ser substituído por;

$$x'_i \leftarrow x'_i \pm r \cdot bw \quad (13)$$

sendo que r é um valor aleatório gerado a partir de uma distribuição uniforme entre 0 e 1 e bw (do inglês *bandwidth*) é o intervalo arbitrário máximo de variação do tom.

Mahdavi *et al.* (2007), ao apresentarem a Busca Harmônica Aperfeiçoada (IHS, do inglês *Improved Harmony Search*), sugeriram a utilização de valores variáveis para PAR e bw , como mostram os gráficos da Figura 4. Isto porque o ajuste fino destes parâmetros tem grande influência na taxa de convergência do algoritmo para a solução ótima. As equações (14) e (15) descrevem os novos valores de PAR e bw .

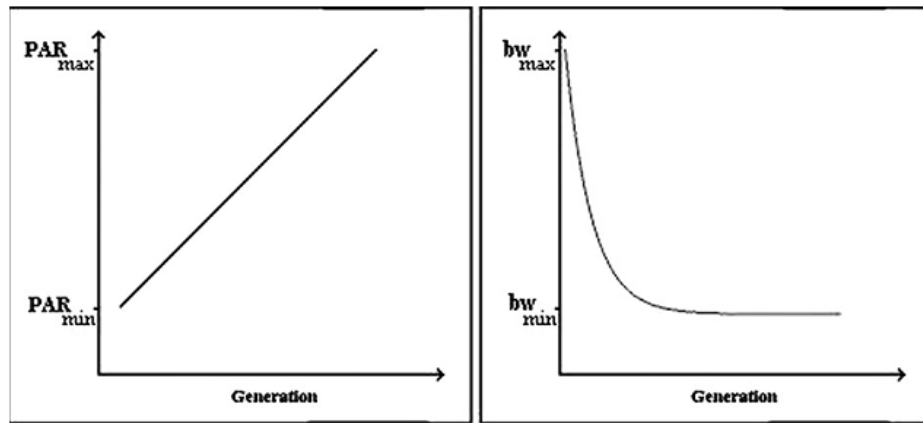


Figura 4 – Variação do PAR e bw versus o número de gerações. (Mahdavi *et al.*, 2007)

$$PAR(gn) = PAR_{min} + \left(\frac{PAR_{max} - PAR_{min}}{NI} \right) gn \quad (14)$$

sendo que $PAR(gn)$ representa a taxa de ajuste de tom para geração gn , PAR_{min} a taxa de ajuste de tom mínima, PAR_{max} a taxa de ajuste de tom máxima, NI o número de total de gerações de vetores de solução e gn , a geração atual do vetor de soluções.

$$bw(gn) = bw_{max} \cdot \exp \left(\frac{\ln \left(\frac{bw_{min}}{bw_{max}} \right)}{NI} \cdot gn \right) \quad (15)$$

sendo que $bw(gn)$ representa o intervalo máximo de variação do tom da geração gn , bw_{min} o valor mínimo do intervalo máximo de variação tom e bw_{max} o valor máximo do intervalo máximo de variação tom.

Passo 4: Atualizar a HM

Em geral, caso o novo vetor de harmonia $x' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_N)$ possua um valor da função objetivo melhor que a do pior vetor existente na HM, substitui-se o pior vetor pelo novo vetor de harmonia gerado. Contudo, outros aspectos podem ser também avaliados como, por exemplo, semelhança entre vetores, evitando uma convergência a um ótimo local.

Passo 5: Checar critério de parada

Caso o critério de parada definido seja atingido, a execução do algoritmo é finalizada. Caso contrário, executam-se novamente os passos 3 e 4.

3.3 Adaptive Large Neighborhood Search

O *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS) de Ropke e Pisinger (2006), uma extensão do *Large Neighborhood Search* (LNS) de Shaw (1998), foi baseado na percepção de que as buscas em grandes vizinhanças resultam em ótimos locais de alta qualidade. No ALNS as vizinhanças $N_k(x)$ são definidas de forma implícita, a partir da combinação de métodos (sub-heurísticas) de destruição e reparo, como visto na Figura 5. Um método de destruição destrói parte da solução corrente e um método de reparo a reconstrói a cada iteração gerando uma nova solução. Estes métodos são controlados a partir de um vetor de pesos próprio que é atualizado dinamicamente com base no seu desempenho após sua utilização. A variação dos pesos tem por objetivo adaptar a heurística ao estado atual da busca (Pisinger e Ropke, 2010).

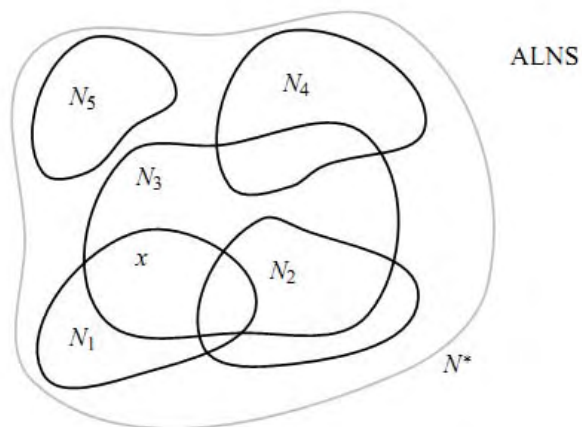


Figura 5 – Vizinhanças implícitas do ALNS. (Pisinger e Ropke, 2010)

O processo de otimização, apresentado na Figura 6, é descrito em 7 passos a seguir (Pisinger e Ropke, 2010).

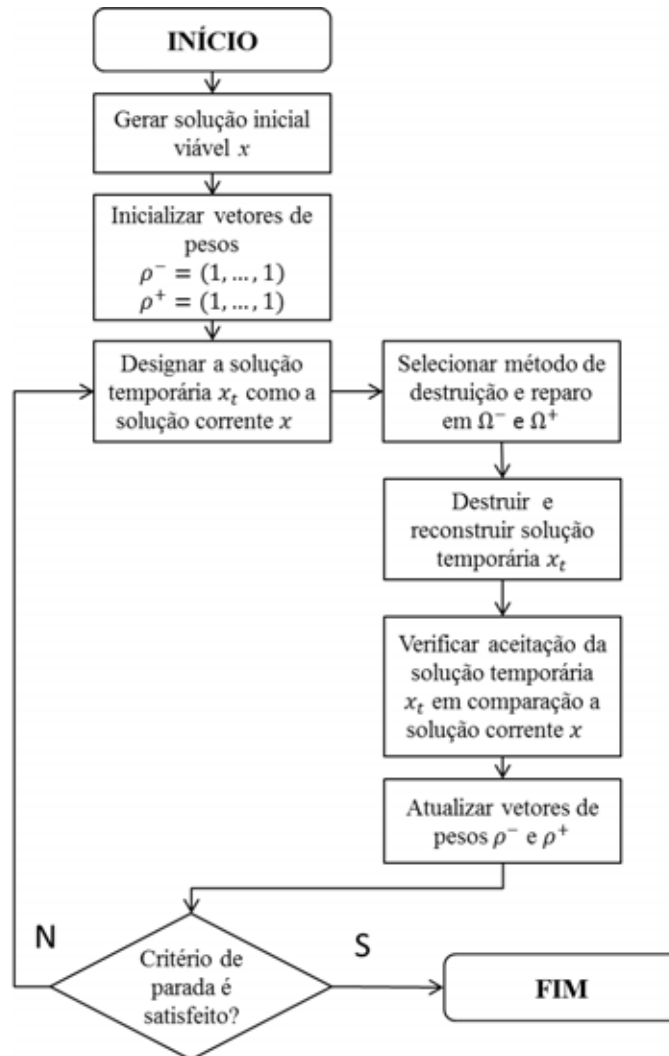


Figura 6 – O processo de otimização do ALNS. (elaborado pelo autor)

Passo 1: Gerar solução inicial viável x

A partir de uma heurística construtiva, gerar uma solução x que respeite todas as restrições do problema. Esta solução inicial também pode ser obtida a partir de um banco de soluções viáveis.

Passo 2: Inicializar vetores de pesos

Os vetores $\rho^- \in \mathbb{R}^{|\Omega^-|}$ e $\rho^+ \in \mathbb{R}^{|\Omega^+|}$, que alocam os pesos dos métodos de destruição e reparo, respectivamente, são inicializados, sendo todos os pesos igualados a 1. Isso faz com que todos os métodos de destruição e reparo tenham a mesma probabilidade de serem escolhidos no início da heurística.

$$\rho^- = (1, \dots, 1) \quad (16)$$

$$\rho^+ = (1, \dots, 1) \quad (17)$$

Passo 3: Definir uma solução temporária como a solução corrente

A cada iteração, a solução temporária x_t , que será modificada ao longo de cada iteração, recebe o mesmo valor da solução corrente x .

$$x_t = x \quad (18)$$

Este passo é importante pois ao terminar de executar o processo de destruição e reparo a solução temporária x_t terá sido modificada e será comparada com a solução corrente x .

Passo 4: Selecionar método de destruição e reparo

Utilizando os vetores de pesos ρ^- e ρ^+ , aplicar o princípio da roleta. Nele, o j -ésimo método de destruição possui a probabilidade ϕ_j^- de ser escolhido, apresentado na equação (19).

$$\phi_j^- = \frac{\rho_j^-}{\sum_{k=1}^{|\Omega^-|} \rho_k^-} \quad (19)$$

As probabilidades de escolha dos métodos de reparo são calculadas segundo a mesma lógica.

Passo 5: Destruir e reparar solução temporária

Aplicar os métodos de destruição e reparo escolhidos dos conjuntos Ω^- e Ω^+ , respectivamente. No final deste passo tem-se uma nova solução viável.

Passo 6: Verificar aceitação da solução temporária em comparação com a solução corrente e atualizar os pesos dos métodos de destruição e reparo utilizados

Ao comparar a solução temporária x_t com a solução corrente x , uma pontuação ψ é atribuída aos métodos de destruição e reparo utilizados na iteração de acordo com a equação (20).

$$\psi = \max \begin{cases} \omega_1 & \text{se } x_t \text{ for a melhor solu\c{c}\~ao encontrada at\~e o momento} \\ \omega_2 & \text{se } x_t \text{ for melhor que a solu\c{c}\~ao corrente} \\ \omega_3 & \text{se } x_t \text{ for aceita} \\ \omega_4 & \text{se } x_t \text{ for rejeitada} \end{cases} \quad (20)$$

A pontua\c{c}\~ao ψ corresponde \~a performance do m\~etodo na itera\c{c}\~ao, sendo que quanto mais alta, maior o sucesso da combina\c{c}\~ao entre o m\~etodo de destrui\c{c}\~ao e reparo da itera\c{c}\~ao. Os par\~ametros ω_k devem respeitar a rela\c{c}\~ao $\omega_1 \geq \omega_2 \geq \omega_3 \geq \omega_4 \geq 0$.

Os pesos dos m\~etodos de destrui\c{c}\~ao e reparo utilizados na itera\c{c}\~ao atual dever\~ao ser atualizados de acordo com a equa\c{c}\~ao (21).

$$\rho = \lambda\rho + (1 - \lambda)\psi \quad (21)$$

sendo que $\lambda \in [0,1]$ \~e o par\~ametro de deteriora\c{c}\~ao, que define a velocidade de mudan\c{c}\~a do valor dos pesos dos m\~etodos de destrui\c{c}\~ao e reparo. Este ajuste de pesos visa variar de forma din\~amica os pesos dos m\~etodos, privilegiando a escolha de m\~etodos que tragam bons resultados a cada itera\c{c}\~ao.

Passo 7: Checar crit\~erio de parada

Caso o crit\~erio de parada definido seja atingido, a execu\c{c}\~ao do algoritmo ser\~a finalizada. Caso contr\~ario, executam-se novamente os passos 3, 4, 5 e 6.

3.4 Clustering Search

O m\~etodo h\~ibrido Busca por Agrupamentos (do ingl\~es *Clustering Search*) proposto por Oliveira e Lorena (2007) e Chaves *et al.* (2007) visa encontrar boas solu\c{c}\~oes por meio da intensifica\c{c}\~ao de buscas em regi\~oes promissoras do espa\c{c}o de solu\c{c}\~oes. O espa\c{c}o de solu\c{c}\~oes \~e dividido em regi\~oes ou *clusters* que s\~ao atualizados dinamicamente. Este processo de atualiza\c{c}\~ao \~e feito a cada itera\c{c}\~ao do algoritmo, alimentado pelas informa\c{c}\~oes geradas por uma meta-heur\~istica.

No CS, tr\~es atributos definem um *cluster* $C = (c, v, r)$ a saber: centro (c), volume (v) e \~indice de inefic\~acia (r), caracterizados a seguir. Sua localiza\c{c}\~ao dentro do espa\c{c}o de busca \~e representada pelo centro c . Cada centro cont\~em parte das caracteristicas das solu\c{c}\~oes agrupadas no respectivo *cluster*. Com isso, elimina-se a necessidade de armazenar todas as

suas soluções. A quantidade de soluções agrupadas no *cluster* é definida pelo atributo v e através da comparação deste com um limitante λ , isto é, quando v atingir este valor um *cluster* passa a ser considerado promissor. Visando controlar e adicionar “inteligência” ao método de busca local evitando que o mesmo não seja executado por mais de r_{max} vezes em regiões já exploradas de forma satisfatória anteriormente ou em regiões ruins, o índice de ineficácia r é acompanhado. Ele apresenta o número de vezes consecutivas em que a busca local foi aplicada no *cluster* sem melhorar a solução.

Como artifício para conseguir distribuir as soluções em *clusters* define-se uma função de medida de distância $d(i, j)$, que calcula a distância entre duas soluções i e j como um número positivo. Quanto maior a similaridade entre duas soluções, menor será o valor da função de medida de distância.

A Figura 7 apresenta a estratégia híbrida do CS, que é descrita nos cinco passos a seguir:

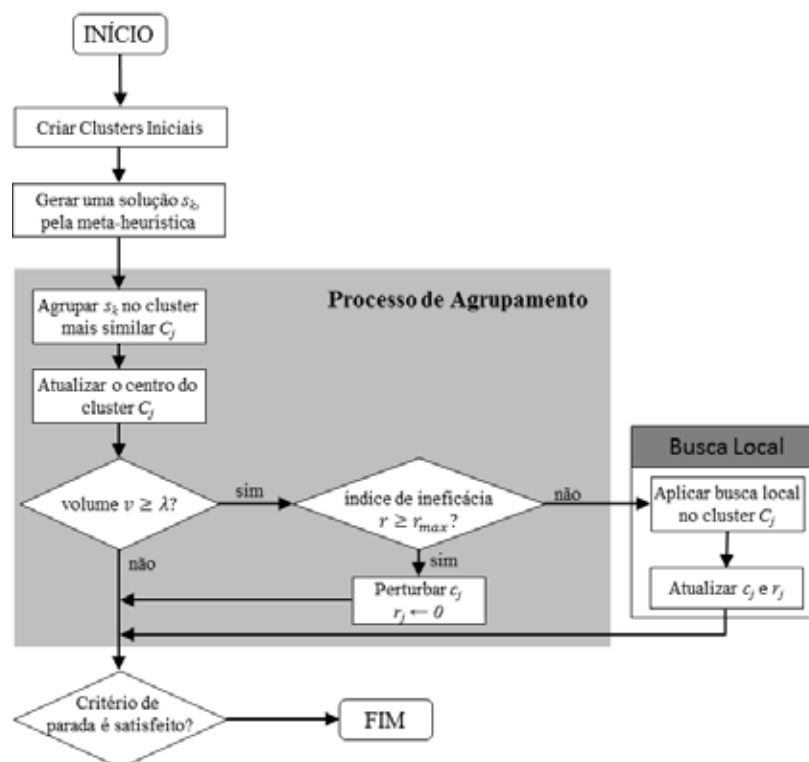


Figura 7 – Estratégia híbrida do CS (Chaves *et al.*, 2009)

Passo 1: Criação dos *Clusters* Iniciais

A partir de um número definido de *clusters*, devem-se gerar os seus centros de forma a representar diferentes regiões do espaço de busca. Propõe-se utilizar um método baseado na diversidade máxima, onde as m soluções mais distantes entre si são

selecionadas para representar os *clusters*, a partir de n soluções geradas aleatoriamente, tal que $n > m$, sendo que m é definido de forma empírica.

Passo 2: Gerar solução s_k pela meta-heurística

Através da utilização de qualquer meta-heurística, gera-se uma solução s_k . Esta solução será a informação que alimentará todo processo de agrupamento. Deve-se, preferencialmente, utilizar uma meta-heurística capaz de gerar soluções com grande diversidade, possibilitando ao CS uma ampla análise do espaço de soluções.

Passo 3: Agrupar solução s_k ao cluster C_j mais similar

Ao receber a solução s_k gerada pela meta-heurística, o CS a compara com todos os centros dos *clusters*, visando encontrar o de menor distância com a solução, C_j , considerado como o *cluster* mais similar. A intenção é reunir soluções similares dentro dos *clusters* e direcionar a busca para as regiões supostamente promissoras. Ao inserir uma nova solução no *cluster* C_j , deve-se primeiramente atualizar seu centro, para que nele também constem traços da característica desta nova solução. Para isto, é utilizado o método *Path-Relinking* (Glover, 1996), utilizando como novo centro do *cluster* a melhor solução encontrada dentro da trajetória que interconecta o centro c_j e a solução s_k . O volume do *cluster* v_j também é alterado, sofrendo um incremento.

Passo 4: Verificar se *cluster* C_j é elegível a realizar busca local

Para que o *cluster* C_j seja elegível para se aplicar busca local, ele deve ser considerado promissor. Isso se dá quando o volume v_j atinge o limitante λ .

$$v_j = \lambda \leftarrow \begin{cases} \text{Sim} & \text{analisar eficiência da busca em } C_j \\ \text{Não} & \text{passar para próximo passo} \end{cases} \quad (22)$$

Em seguida, analisa-se o sucesso do método de busca local através do atributo r_j . Caso o método não tenha sucesso nas últimas r_{max} aplicações neste *cluster* ($r_j = r_{max}$) é aplicado em seu centro c_j uma perturbação aleatória, objetivando escapar desta região do espaço de busca, e reiniciando o valor de r_j . Caso contrário, uma busca local é aplicada neste centro, a fim de intensificar a busca na vizinhança de C_j .

$$r_j = r_{max} \leftarrow \begin{cases} \text{Sim} & \text{perturbar } c_j, \text{ reiniciar } r_j \text{ e ir para próximo passo} \\ \text{Não} & \text{realizar busca local} \end{cases} \quad (23)$$

Considera-se bem sucedida a busca local que consegue encontrar uma solução que seja a melhor obtida neste *cluster* até o momento (c_j^*). Quando isto acontece o centro do *cluster* é novamente atualizado e o atributo de ineficiência da busca r_j é reiniciado. Caso contrário, somente incrementa-se r_j , registrando a ineficiência da busca nesta aplicação.

$$\text{Busca local}(c_j) = c_j^* \leftarrow \begin{cases} \text{Verdadeiro} & \text{atualizar } c_j \text{ e reiniciar } r_j \\ \text{Falso} & \text{incrementar } r_j \end{cases} \quad (24)$$

Passo 5: Checar critério de parada

Caso o critério de parada definido seja atingido, a execução do algoritmo é finalizada. Caso contrário, executam-se novamente os passos 2, 3 e 4.

4 IMPLEMENTAÇÃO

4.1 Representação da Solução

Inspirado em Chaves *et al.* (2009a), uma solução do ALWABP é representado por dois vetores: um representa a alocação trabalhador/estação de trabalho; e o outro representa a designação tarefa/estação de trabalho, como visto na equação (25). Um exemplo de uma solução com 10 tarefas, 4 trabalhadores e 4 estações de trabalho pode ser vista na Figura 8.

$$s = \{x', x''\} \quad (25)$$

Tarefas	<i>n1</i>	<i>n2</i>	<i>n3</i>	<i>n4</i>	<i>n5</i>	<i>n6</i>	<i>n7</i>	<i>n8</i>	<i>n9</i>	<i>n10</i>
Estação de Trabalho	<i>s1</i>	<i>s2</i>	<i>s1</i>	<i>s2</i>	<i>s2</i>	<i>s3</i>	<i>s4</i>	<i>s3</i>	<i>s4</i>	<i>s4</i>

Trabalhadores	<i>h1</i>	<i>h2</i>	<i>h3</i>	<i>h4</i>
Estação de Trabalho	<i>s2</i>	<i>s3</i>	<i>s4</i>	<i>s1</i>

Figura 8 – Exemplo de solução do ALWABP. (Adaptado de Chaves *et al.* (2009a))

Como visto no capítulo 2, o valor da função objetivo do ALWABP-2 é igual ao tempo de ciclo C . Como em Chaves *et al.* (2009a), será acrescentado um complemento, responsável por penalizar as soluções inviáveis geradas, dado na equação (26). No ALWABP-2, dois tipos de violações podem ocorrer e inviabilizar a solução gerada. A primeira delas é o desrespeito às regras de precedência, mensurada em f_p . A segunda é a alocação de um trabalhador a uma tarefa que ele não é capaz de realizar, mensurada em f_t . Estas variáveis, f_p e f_t , são acompanhadas por um fator multiplicador ω e δ , respectivamente, responsáveis por diferenciar a penalização de acordo com a violação ocorrida.

$$f(s) = C + (\omega \cdot f_p + \delta \cdot f_t) \quad (26)$$

Inspirado em Chaves *et al.* (2009a), utilizou-se $\omega = 1000$ e $\delta = 500$ visando privilegiar soluções que respeitem as restrições da rede de precedências, pois estas inviabilidades são muito mais complicadas de serem eliminadas.

4.2 HS aplicado ao ALWABP

Esta seção traz uma descrição dos elementos pertencentes ao HS. A memória harmônica HM será formada por HMS harmonias, sendo nesta aplicação cada harmonia um conjunto de dois vetores x'_i e x''_i , como apresentado da equação (27). Utilizou-se uma memória com 100 harmonias neste trabalho.

$$HM = \begin{bmatrix} x'_1 & x''_1 \\ x'_2 & x''_2 \\ \vdots & \vdots \\ x'_{HMS} & x''_{HMS} \end{bmatrix} \quad (27)$$

A memória harmônica inicial é constituída de 80% de soluções construídas aleatoriamente e o seu complemento de soluções que não violam as restrições da rede de precedências. Para estas, utilizou-se um método adaptado de Chaves *et al.* (2009a). Neste método, define-se de forma aleatória a quantidade de tarefas que devem ser alocadas em cada estação de trabalho. É permitido que uma estação não possua tarefas alocadas. Constrói-se uma lista em ordem crescente das tarefas com o menor número de tarefas antecessoras. Quando há tarefas com o mesmo número de antecessoras, a ordem é escolhida aleatoriamente. As estações são preenchidas da primeira para a última com as tarefas seguindo a ordem da lista construída. Após alocar as tarefas, os trabalhadores são alocados aleatoriamente às estações. Com isso, a única inviabilidade que pode ocorrer é a entre trabalhadores e tarefas incompatíveis.

Como pode ser visto em seu pseudo-código, o HS foi aplicado somente ao primeiro vetor de solução x' , que aloca as estações de trabalho às tarefas. A taxa de consideração da memória de 90% foi aplicada a blocos de variáveis da solução. O tamanho destes blocos é definido aleatoriamente, limitado em 25% do tamanho de uma solução. Apesar de trabalhar com blocos, o ajuste de tom foi aplicado a cada uma das variáveis do bloco. Sua taxa variou linearmente iniciando em 25% e terminando em 10%, de acordo com número da iteração.

Para realizar a otimização no segundo vetor de solução x'' , onde os trabalhadores são alocados nas estações de trabalho, foi utilizada uma heurística de busca local após uma alocação aleatória dos trabalhadores, visando resultados eficientes. A heurística consiste em buscar o melhor movimento ao se trocar a alocação em estações de trabalho de dois trabalhadores.

A atualização da memória harmônica verifica inicialmente se a solução gerada na iteração é melhor que a pior solução da memória. Caso não seja, ela pode ser aceita com uma probabilidade de 5% para diversificar a memória. Sendo melhor, primeiramente é verificado se há alguma solução semelhante na memória comparando a alocação das tarefas nas estações de trabalho. Considera-se semelhante toda solução que possua uma diferença menor que 30% em relação à nova solução, isto é, mais de 70% das tarefas estão alocadas para as mesma estações de trabalho nas duas soluções. Quando isto acontece, caso a nova solução seja melhor que a solução mais semelhante, substitui-se esta solução. Caso contrário, parte-se para uma nova iteração. Quando não há solução semelhante, com uma probabilidade de 95% substitui-se o pior indivíduo. Com 5% de probabilidade, substitui-se o indivíduo mais semelhante, mesmo a diferença entre as duas soluções sendo maior que 30%. O objetivo é não perder a diversidade da memória harmônica, importante para possibilitar a busca em todo o espaço de soluções.

Como critério de parada, foi utilizado o valor de 100000 iterações.

O pseudocódigo do HS aplicado ao ALWABP pode ser visto na Figura 9.

4.3 ALNS aplicado ao ALWABP

Esta seção traz uma descrição dos elementos pertencentes ao ALNS.

Para a geração da solução inicial viável também utilizou-se o método adaptado de Chaves *et al.* (2009a), já explicado na seção anterior.

Diferentemente do HS, o ALNS foi aplicado aos dois vetores x' e x'' . A escolha tanto do método de destruição quanto do método de reparo da solução a cada iteração é feita a partir de uma roleta utilizando o vetor de pesos ρ_a^- e ρ_r^+ , respectivamente.

A destruição das soluções foi feita a partir de seis métodos baseados na combinação de três heurísticas apresentadas na Figura 10.

- Trocar tarefas: o total de tarefas alocadas em cada estação continua o mesmo, sendo alterado aleatoriamente de 20 a 40% das tarefas das estações;
- Trocar trabalhadores: alteração aleatória de 30 a 60% da alocação dos trabalhadores às estações de trabalho;
- Transferir tarefas: o total de tarefas alocadas em cada estação é alterado, sendo que se define aleatoriamente para 20 a 40% das tarefas uma nova estação de trabalho.

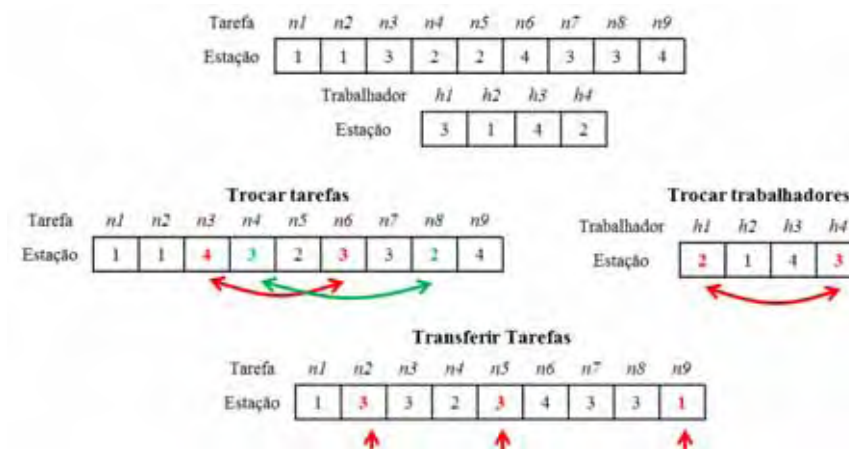


Figura 10 – Exemplo dos movimentos das heurísticas dos métodos de destruição. (elaborado pelo autor)

O reparo das soluções foi feito também a partir de seis métodos baseados em combinações de três heurísticas, com os mesmos movimentos dos métodos de destruição:

- Trocar tarefas: realizar movimentos de troca de duas tarefas entre diferentes estações;
- Trocar trabalhadores: realizar movimentos de troca de dois trabalhadores entre diferentes estações;
- Transferir tarefas: realizar movimentos de transferir uma tarefa para uma nova estação.

Todas as heurísticas de reparo utilizam como método de seleção a primeira melhoria (*first improving*), onde caso a solução encontrada seja melhor que a corrente, atualiza-se a solução corrente e a busca continua a partir deste novo ponto (Costa, 2011). Elas podem também ser repetidas até 20 vezes, caso no final de cada iteração se consiga melhorar a solução.

Na atualização dos pesos dos métodos de destruição e reparo escolhidos a cada iteração utilizou-se a equação (28), apresentada na seção 3.3.

$$\rho = \lambda\rho + (1 - \lambda)\psi \quad (28)$$

sendo que o parâmetro de deterioração λ é de 0,75 e que a performance do método ψ pode assumir os valores 27, 9, 3 e 1 para ω_1 , ω_2 , ω_3 e ω_4 , respectivamente. Considera-se ainda uma taxa de aceitação de 0,01% para soluções que pioram a solução corrente.

Como critério de parada, foi utilizado o valor de 2500 iterações.

O pseudocódigo do ALNS aplicado ao ALWABP pode ser visto na Figura 11.

Algoritmo ALNS

```

criar solução inicial viável  $s$ 
inicializar os vetores de peso  $\rho^- = \{1, \dots, 1\}$  e  $\rho^+ = \{1, \dots, 1\}$ 
 $s_b \leftarrow s$ 
enquanto critério de parada não satisfeito faça
     $s_t \leftarrow s$ 
    selecionar  $d \in \Omega^-$  utilizando  $\rho^-$            //Destruição da solução temporária
     $s'_t \leftarrow d(s_t)$ 

    selecionar  $r \in \Omega^+$  utilizando  $\rho^+$            //Reparo da solução temporária
     $s''_t \leftarrow r(s'_t)$ 
    se  $s_b > s''_t$  então
         $s_b \leftarrow s''_t$ 
    fim se
    atualizar pesos  $\rho_d^-$  e  $\rho_r^+$ 
fim enquanto

```

Figura 11 – Pseudocódigo algoritmo ALNS. (elaborado pelo autor)

4.4 CS aplicado ao ALWABP

Esta seção traz uma descrição dos elementos pertencentes ao CS.

Foram utilizadas como meta-heurísticas geradoras de soluções o HS e o ALNS.

Após identificar o *cluster* C_j mais similar à solução corrente s_k , atualiza-se o centro c_j com as características da solução s_k . Para este procedimento utiliza-se o *Path-Relinking* partindo do centro c_j em direção à solução s_k . Contudo, assim como em Chaves *et al.* (2009a), a análise foi limitada a 30% do caminho, evitando que o centro se movesse para regiões muito distantes da atual.

A definição de um *cluster* promissor é dada a partir da análise de seu volume v_j , ou seja, quando este atinge o limitante λ . Ao verificar que um cluster C_j é promissor, antes de aplicar um procedimento de busca local, é analisado se a heurística vem obtendo sucesso neste *cluster* através do r_j . Caso r_j atinja r_{max} o centro c_j sofre uma perturbação, trocando 30% da alocação das tarefas aleatoriamente. Sendo $r_j < r_{max}$, intensifica-se a busca por meio

da heurística de busca local. Os parâmetros utilizados para cada uma das meta-heurísticas geradoras de soluções podem ser vistos na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros do CS

Parâmetro	HS	ALNS
Número de soluções iniciais	100	100
Número de clusters	10	10
λ	10	5
τ_{max}	5	10
Perturbação	30%	30%

Como o ALNS gerará menos soluções que o HS, ele teve definido um λ menor, para que pudesse executar mais vezes a heurística de busca local em um número menor de soluções.

Assim como em Chaves *et al.* (2009a), a heurística de busca local utilizada foi o *Variable Neighborhood Descent (VND)*. Este método foi modelado com três heurísticas com base em movimentos relevantes para o ALWABP:

- Trocar tarefa: realizar o melhor movimento de trocar duas tarefas que estão atribuídas a estações diferentes;
- Transferir tarefa: realizar o melhor movimento de transferir uma tarefa de uma estação para outra;
- Trocar trabalhador: realizar o melhor movimento de trocar a posição de dois trabalhadores.

As heurísticas são executadas na sequência apresentada. Caso haja melhora na solução, o VND regressa a primeira heurística, parando somente quando não existam mais melhoras para a solução corrente. Caso a solução encontrada seja melhor que o centro c_j , o mesmo é atualizado. Contudo, o índice de ineficácia r_j só é reiniciado caso a solução encontrada seja a melhor encontrada até o momento neste *cluster*.

O critério de parada utilizado é o critério da meta-heurística, isto é, 100000 iterações para HS e 2500 para o CS.

O pseudocódigo do CS aplicado ao ALWABP pode ser visto na Figura 12.

Algoritmo CS

criar clusters iniciais

 $s_k \leftarrow \{\text{meta-heurística}\}$ **enquanto** critério de parada não satisfeito **faça** encontrar cluster C_j mais similar a s_k $v_j \leftarrow v_j + 1$ // agrupar s_k em C_j $c_j = \text{Path Relinking}(c_j, s_k)$

// atualizar centro do cluster

se ($v_j = \lambda$) **então** $v_j \leftarrow 0$ **se** ($r_j = r_{max}$) **então** $c_j \leftarrow \text{PerturbaçãoAleatória}(c_j)$ $r_j \leftarrow 0$ **senão** $\hat{c}_j \leftarrow \text{BuscaLocal}(c_j)$ **se** $f(\hat{c}_j) < f(c_j)$ **então** $c_j \leftarrow \hat{c}_j$ **fim se** **se** $f(\hat{c}_j) < f(c_j^*)$ **então** $c_j^* \leftarrow \hat{c}_j$ $r_j \leftarrow 0$ **senão** $r_j \leftarrow r_j + 1$ **fim se** **fim se** **fim se****fim enquanto**

Figura 12 – Pseudocódigo algoritmo CS. (adaptado de Chaves *et al.* (2009a))

5 RESULTADOS

5.1 Testes com instâncias presentes na literatura

As quatro meta-heurísticas implementadas foram codificadas em C++. Os testes computacionais foram realizados em um PC com processador Core i5 2,53Ghz e 4 GB de memória RAM. O objetivo dos experimentos foi o de comparar o desempenho dos métodos propostos com os presentes na literatura.

Ao todo, foram testadas 320 instâncias divididas em quatro conjuntos de problemas teste: *Roszieg*, *Heskia*, *Tonge* e *Wee-Mag*. Estas instâncias, propostas por Chaves *et al.* (2007), foram baseadas na coleção de problemas clássicos do SALBP (Hoffmann, 1990). Suas principais características (Tar – número de tarefas, Trab – número de trabalhadores e OS – densidade da rede de precedências, do inglês *Order Strength*¹) podem ser vistas na Tabela 2. Elas estão disponíveis no endereço <http://www.sjc.unifesp.br/docente/chaves>.

Tabela 2 – Características das Instâncias

Família	Tar	Trab		OS
		Grupos 1-4	Grupos 5-8	
Roszieg	25	4	6	71,67
Heskia	28	4	7	22,49
Tonge	70	10	17	59,12
Wee-mag	75	11	19	22,67

Durante os testes, executou-se 20 vezes cada uma das instâncias. Os resultados obtidos podem ser vistos nas tabelas a seguir, que apresentam o melhor resultado, a média dos resultados e o tempo de execução de cada uma das implementações para cada uma das instâncias. Eles foram comparados com os melhores resultados encontrados na literatura até o momento, gerados a partir da utilização do *Beam Search* (IBS) por Blum e Miralles (2010), executados em um PC com AMD64X2 e 4 GB de memória RAM e por um *Hybrid Genetic Algorithm* (HGA) por Moreira *et al.* (2012), executados em um PC com processador Intel Core i7 930 2,8 Ghz e 3GB de memória RAM. Um resumo dos testes é apresentado Tabela 3 e seu detalhamento está disponível na Tabela 4, Tabela 5, Tabela 6 e Tabela 7.

¹ Número de relações de precedência/(número de tarefas * (número de tarefas-1)) (Scholl e Voß, 1997)

Tabela 3 – Resumo dos resultados dos testes realizados

Família	Grupo	Ótimo	HS			CS_HS			ALNS			CS_ALNS			IBS (Blum e Miralles, 2010)			HGA (Moreira et al., 2012)		
			Melhor	Média	t(s)	Melhor	Média	t(s)	Melhor	Média	t(s)	Melhor	Média	t(s)	Melhor	Média	t(s)	Melhor	Média	t(s)
Roszieg	1	20,1 *	20,1	20,4	8,5	20,1	20,2	20,1	20,1	20,7	2,5	20,1	20,4	3,0	20,1	20,1	0,0	20,1	20,1	3,3
	2	31,5 *	31,5	42,5	9,1	31,5	31,5	20,2	31,5	34,3	2,5	31,5	32,6	3,0	31,5	31,5	0,1	31,5	31,5	4,5
	3	28,1 *	28,1	28,4	8,8	28,1	28,2	20,3	28,1	28,6	2,5	28,1	28,2	3,1	28,1	28,1	0,1	28,1	28,1	4,0
	4	28,0 *	28,0	28,1	8,9	28,0	28,0	20,0	28,0	28,3	2,5	28,0	28,2	3,1	28,0	28,0	0,0	28,0	28,0	3,4
	5	9,7 *	9,7	10,5	9,0	9,7	9,9	18,0	9,9	11,4	3,2	9,7	10,9	4,0	9,7	9,7	0,0	9,7	9,7	3,6
	6	11,0 *	11,3	12,5	8,1	11,0	11,7	25,0	11,1	13,1	3,3	11,0	12,8	4,1	11,0	11,0	0,0	11,1	11,1	4,0
	7	16,0 *	16,1	17,1	6,0	16,0	16,3	15,5	16,1	17,6	3,4	16,0	17,3	4,2	16,0	16,0	0,0	16,0	16,0	4,5
	8	15,1 *	15,2	16,0	5,5	15,1	15,4	16,4	15,2	16,7	3,4	15,1	16,2	4,2	15,1	15,1	0,0	15,1	15,1	4,5
	Média	18,9 *	18,9	19,8	7,9	18,9	19,1	19,3	18,9	20,4	3,0	18,9	19,9	3,7	18,9	18,9	0,0	18,9	18,9	4,0
Heskia	1	102,3 *	103,7	108,5	8,4	102,3	104,2	18,1	102,3	104,8	3,2	102,3	103,8	4,1	102,3	102,3	8,2	102,3	102,3	6,9
	2	122,6 *	125,6	130,0	6,1	122,6	125,4	17,6	122,6	127,5	3,4	122,6	124,5	4,2	122,6	122,6	3,0	122,7	122,7	9,3
	3	172,5 *	176,6	180,9	6,5	172,5	175,8	17,4	172,5	176,8	3,3	172,5	175,1	4,0	172,5	172,5	5,6	172,5	172,5	9,2
	4	171,2 *	172,1	176,1	7,2	171,2	172,0	17,7	171,2	173,4	3,4	171,2	172,6	4,1	171,2	171,3	5,2	171,2	171,7	9,5
	5	34,9 *	38,7	43,1	11,1	35,3	38,1	32,4	34,9	39,4	5,0	34,9	38,2	6,1	34,9	34,9	1,1	34,9	35,1	8,0
	6	42,6	45,7	49,4	11,4	43,0	44,3	33,7	43,2	46,0	5,2	43,3	45,3	6,5	42,6	42,6	2,5	42,6	42,8	7,4
	7	75,2 *	78,9	83,9	11,2	75,4	77,6	31,9	75,3	78,2	5,3	75,2	78,2	6,4	75,2	75,2	1,7	75,2	75,4	6,6
	8	67,2 *	73,9	77,9	11,3	67,6	70,8	32,1	68,8	74,4	5,3	67,2	73,4	6,5	67,2	67,2	2,5	67,2	67,6	9,2
	Média	96,9	100,5	104,7	9,5	97,1	99,4	26,4	97,3	101,1	4,4	97,0	100,0	5,4	96,9	96,9	3,1	96,9	97,1	8,4
Tonge	1	92,4	112,9	135,7	116,2	94,1	101,3	492,4	109,7	140,3	71,1	102,5	123,2	184,6	94,9	96,7	86,4	92,8	95,9	205,7
	2	108,8	137,1	168,6	100,1	110,8	119,1	302,3	135,0	189,7	107,2	121,7	161,3	196,7	110,2	111,5	92,2	109,3	111,2	241,2
	3	160,2	198,5	229,2	128,1	162,3	172,9	345,7	189,3	241,6	153,6	175,7	209,6	204,8	165,0	168,0	150,3	162,2	166,3	391,0
	4	166,1	211,8	247,0	127,5	170,2	181,3	395,6	199,7	251,2	120,5	180,8	219,0	140,6	170,0	171,4	149,5	168,4	171,0	347,6
	5	33,1	54,2	66,7	136,6	38,3	42,8	392,4	56,5	71,0	124,7	45,4	57,1	183,6	33,1	34,2	88,0	34,1	35,2	296,9
	6	39,3	69,7	87,6	136,5	45,4	50,5	546,2	67,1	108,8	112,9	53,6	73,6	163,7	40,0	41,0	70,5	40,2	42,0	300,0
	7	65,6	103,2	124,8	138,7	73,5	79,9	364,7	101,8	130,9	150,9	82,5	103,8	166,3	66,4	67,9	124,3	66,6	69,6	446,7
	8	64,4	105,9	128,2	131,2	72,0	80,2	452,0	99,6	123,4	151,1	88,0	115,1	142,8	64,7	66,6	156,4	65,8	67,5	469,4
	Média	90,4	125,5	149,7	130,3	95,4	103,2	411,2	120,4	157,5	133,2	106,2	133,3	170,3	92,1	93,7	119,4	91,8	94,1	360,1
Wee-mag	1	26,7	45,8	52,4	132,9	32,8	36,4	504,5	45,4	51,4	75,4	33,2	38,9	109,1	28,7	29,7	104,9	26,7	27,8	136,9
	2	32,2	51,4	62,0	126,8	36,9	41,2	483,8	51,5	69,0	107,6	40,1	47,4	125,1	33,6	34,9	84,9	32,2	33,5	158,8
	3	47,6	79,3	91,9	136,8	56,2	61,5	533,4	73,6	86,7	122,2	58,2	66,7	150,2	50,1	51,6	160,3	47,6	49,9	248,5
	4	45,6	76,9	91,9	139,9	54,7	60,6	525,5	74,4	85,3	120,2	53,9	65,6	134,8	48,6	50,4	143,3	45,6	47,8	245,9
	5	10,1	23,3	27,5	168,9	15,2	18,0	408,0	28,9	34,2	118,3	17,1	22,5	131,0	10,3	10,7	57,1	10,5	11,1	213,9
	6	11,9	29,5	35,4	143,6	17,6	20,3	460,7	31,1	46,8	86,3	19,4	35,4	130,9	11,9	12,4	60,2	12,3	12,9	225,6
	7	18,1	42,0	50,1	141,9	26,0	29,9	486,2	44,8	54,9	128,7	27,7	35,9	172,4	18,2	19,0	71,4	18,6	19,7	283,7
	8	17,9	41,9	50,6	171,6	26,1	30,1	325,0	44,9	55,3	140,9	27,7	36,5	169,0	18,1	18,9	90,0	18,4	19,3	288,1
	Média	25,9	49,2	58,2	148,8	33,1	37,2	462,1	49,1	61,6	118,4	34,6	44,2	144,3	27,0	28,0	95,3	26,2	27,5	240,7

Tabela 4 – Resultados Família Roszieg

(grp,inst)	Ótimo	HS			CS_HS			ALNS			CS_ALNS			IBS (Blum e Miralles, 2010)			HGA (Moreira et al., 2012)		
		Melhor	Média	t(s)	Melhor	Média	t(s)	Melhor	Média	t(s)	Melhor	Média	t(s)	Melhor	Média	t(s)	Melhor	Média	t(s)
(1/1)	20 *	20	20,7	9,1	20	20,2	20,7	20	20,5	2,5	20	20,3	3,1	20	20,0	0,0	20	20,0	3,6
(1/2)	22 *	22	22,3	8,9	22	22,0	19,8	22	22,8	2,5	22	22,1	2,9	22	22,0	0,0	22	22,0	4,0
(1/3)	18 *	18	19,1	8,7	18	18,4	20,0	18	18,9	2,5	18	18,5	3,1	18	18,0	0,1	18	18,0	2,8
(1/4)	18 *	18	18,2	8,8	18	18,0	20,1	18	18,6	2,5	18	18,4	3,1	18	18,0	0,0	18	18,0	2,9
(1/5)	17 *	17	17,0	8,6	17	17,0	19,6	17	17,4	2,4	17	17,1	3,0	17	17,0	0,0	17	17,0	2,7
(1/6)	24 *	24	24,0	8,1	24	24,0	19,6	24	24,3	2,6	24	24,2	3,1	24	24,0	0,0	24	24,0	3,7
(1/7)	21 *	21	21,0	8,4	21	21,0	20,1	21	21,3	2,5	21	21,0	3,0	21	21,0	0,0	21	21,0	3,3
(1/8)	20 *	20	20,1	8,3	20	20,0	20,3	20	20,8	2,4	20	20,6	3,0	20	20,0	0,0	20	20,0	2,7
(1/9)	22 *	22	22,5	7,3	22	22,1	20,8	22	22,9	2,4	22	22,5	3,1	22	22,0	0,0	22	22,0	4,3
(1/10)	19 *	19	19,0	9,0	19	19,0	19,8	19	19,8	2,4	19	19,1	3,0	19	19,0	0,0	19	19,0	3,3
(2/1)	30 *	30	30,0	9,4	30	30,0	19,2	30	31,1	2,5	30	30,8	3,0	30	30,0	0,0	30	30,0	6,5
(2/2)	27 *	27	27,4	8,4	27	27,0	19,9	27	29,6	2,5	27	28,9	2,7	27	27,0	0,0	27	27,0	5,3
(2/3)	76 *	76	182,7	8,8	76	76,0	20,5	76	76,0	2,4	76	76,0	2,7	76	76,0	0,0	76	76,0	0,1
(2/4)	25 *	25	25,0	9,3	25	25,0	20,0	25	27,5	2,6	25	25,0	3,1	25	25,0	0,0	25	25,2	5,1
(2/5)	26 *	26	28,0	9,3	26	26,0	19,6	26	27,7	2,4	26	26,3	2,9	26	26,0	0,0	26	26,0	4,7
(2/6)	22 *	22	22,0	9,1	22	22,0	20,6	22	23,8	2,4	22	22,4	3,1	22	22,0	0,0	22	22,0	3,8
(2/7)	22 *	22	22,0	9,4	22	22,0	21,1	22	22,0	2,5	22	22,0	3,1	22	22,0	0,0	22	22,0	2,8
(2/8)	20 *	20	20,0	9,1	20	20,0	19,8	20	20,2	2,5	20	20,1	3,0	20	20,0	0,0	20	20,0	3,4
(2/9)	27 *	27	27,0	9,2	27	27,0	20,4	27	33,0	2,5	27	30,5	3,0	27	27,0	0,0	27	27,0	4,6
(2/10)	40 *	40	40,6	8,8	40	40,2	21,1	40	51,9	2,3	40	44,5	3,0	40	40,0	0,8	40	40,0	9,0
(3/1)	28 *	28	28,8	8,7	28	28,6	20,1	28	28,6	2,4	28	28,0	3,1	28	28,0	0,0	28	28,0	3,0
(3/2)	30 *	30	30,0	8,9	30	30,0	20,9	30	30,2	2,5	30	30,0	3,2	30	30,0	0,0	30	30,0	4,0
(3/3)	26 *	26	26,0	8,7	26	26,0	16,6	26	26,1	2,5	26	26,1	3,0	26	26,0	0,0	26	26,0	2,8
(3/4)	33 *	33	33,7	9,0	33	33,0	21,6	33	33,5	2,5	33	33,4	3,1	33	33,0	0,0	33	33,0	4,5
(3/5)	28 *	28	28,0	8,8	28	28,0	19,0	28	28,3	2,5	28	28,0	3,1	28	28,0	0,0	28	28,0	4,4
(3/6)	27 *	27	27,0	8,7	27	27,0	19,7	27	27,1	2,4	27	27,0	3,2	27	27,0	0,0	27	27,0	3,5
(3/7)	21 *	21	21,6	8,7	21	21,0	20,2	21	21,7	2,5	21	21,5	3,1	21	21,0	0,0	21	21,0	2,8
(3/8)	28 *	28	28,6	8,9	28	28,0	21,7	28	29,9	2,6	28	28,0	3,1	28	28,0	1,2	28	28,0	3,3
(3/9)	27 *	27	27,6	9,0	27	27,0	21,5	27	27,4	2,6	27	27,0	3,1	27	27,0	0,1	27	27,0	3,7
(3/10)	33 *	33	33,0	8,8	33	33,0	21,2	33	33,3	2,6	33	33,2	3,2	33	33,0	0,0	33	33,0	7,7
(4/1)	31 *	31	31,0	9,0	31	31,0	19,9	31	31,3	2,6	31	31,0	3,0	31	31,0	0,0	31	31,0	4,4
(4/2)	29 *	29	29,0	9,0	29	29,0	20,7	29	29,2	2,6	29	29,0	3,2	29	29,0	0,0	29	29,0	3,1
(4/3)	32 *	32	32,0	8,8	32	32,0	20,8	32	32,3	2,5	32	32,1	3,1	32	32,0	0,0	32	32,0	4,3
(4/4)	27 *	27	27,0	8,7	27	27,0	19,6	27	27,1	2,5	27	27,1	3,0	27	27,0	0,0	27	27,0	3,0
(4/5)	27 *	27	27,0	8,8	27	27,0	19,6	27	27,0	2,5	27	27,0	3,1	27	27,0	0,0	27	27,0	2,6
(4/6)	29 *	29	29,3	9,1	29	29,0	20,6	29	29,0	2,6	29	29,0	3,1	29	29,0	0,0	29	29,0	3,5
(4/7)	27 *	27	27,0	8,7	27	27,0	18,8	27	27,1	2,5	27	27,0	3,0	27	27,0	0,0	27	27,0	3,1
(4/8)	28 *	28	28,4	8,8	28	28,0	20,2	28	29,9	2,5	28	29,7	3,1	28	28,0	0,0	28	28,0	3,3
(4/9)	21 *	21	21,0	9,3	21	21,0	19,0	21	21,0	2,4	21	21,0	3,0	21	21,0	0,0	21	21,0	2,8
(4/10)	29 *	29	29,0	8,7	29	29,0	20,9	29	29,5	2,5	29	29,3	2,9	29	29,0	0,0	29	29,0	3,4
(5/1)	10 *	10	10,7	9,2	10	10,0	13,8	10	11,1	3,2	10	11,0	3,9	10	10,0	0,0	10	10,0	3,8
(5/2)	10 *	10	10,8	8,8	10	10,2	10,6	10	11,1	3,1	10	10,7	3,9	10	10,0	0,0	10	10,0	4,5
(5/3)	10 *	10	11,0	9,1	10	10,2	15,2	10	11,6	3,3	10	11,4	3,9	10	10,0	0,0	10	10,0	3,8
(5/4)	9 *	9	10,2	9,0	9	9,4	12,2	9	10,3	3,3	9	10,0	4,0	9	9,0	0,0	9	9,0	3,3
(5/5)	12 *	12	12,1	8,9	12	12,0	13,3	12	13,5	3,2	12	12,6	4,0	12	12,0	0,0	12	12,0	4,1
(5/6)	9 *	9	9,6	9,0	9	9,0	14,2	9	11,6	3,1	9	10,8	3,8	9	9,0	0,0	9	9,0	2,6
(5/7)	10 *	10	10,8	9,1	10	10,2	14,3	10	11,0	3,2	10	11,1	4,0	10	10,0	0,0	10	10,0	3,7
(5/8)	8 *	8	8,1	8,9	8	8,0	14,6	8	8,8	3,1	8	8,4	4,0	8	8,0	0,0	8	8,0	2,4
(5/9)	10 *	10	10,3	9,1	10	10,0	33,1	10	12,1	3,2	10	11,4	4,0	10	10,0	0,0	10	10,0	4,4
(5/10)	9 *	9	11,5	9,1	9	10,3	38,4	11	12,7	3,3	9	12,1	4,1	9	9,0	0,1	9	9,0	3,1
(6/1)	11 *	11	11,8	9,3	11	11,3	46,1	11	12,2	3,2	11	11,9	4,0	11	11,0	0,0	11	11,1	5,2
(6/2)	10 *	10	11,8	9,8	10	10,8	29,2	10	11,3	3,2	10	11,2	4,0	10	10,0	0,0	10	10,0	4,0
(6/3)	10 *	11	12,3	9,6	10	11,1	28,9	11	13,8	3,3	10	12,4	4,1	10	10,0	0,0	11	11,0	3,8
(6/4)	10 *	12	12,0	9,6	10	11,4	30,2	10	12,8	3,3	10	12,5	4,1	10	10,0	0,0	10	10,0	3,6
(6/5)	11 *	11	13,1	9,6	11	12,1	27,4	11	14,2	3,2	11	13,2	4,1	11	11,0	0,0	11	11,0	3,7
(6/6)	13 *	13	13,5	9,7	13	13,1	20,3	13	13,9	3,4	13	14,4	4,2	13	13,0	0,0	13	13,0	4,3
(6/7)	13 *	13	14,5	7,4	13	13,2	15,0	13	14,2	3,3	13	14,0	4,1	13	13,0	0,0	13	13,0	4,5
(6/8)	11 *	11	11,9	5,3	11	11,1	15,9	11	12,2	3,3	11	11,5	4,2	11	11,0	0,0	11	11,0	3,5
(6/9)	12 *	12	14,1	6,3	12	13,5	22,5	12	16,0	3,2	12	15,6	4,1	12	12,0	0,0	12	12,0	4,4
(6/10)	9 *	9	10,2	4,8	9	9,6	14,4	9	11,2	3,2	9	11,4	3,9	9	9,0	0,0	9	9,0	2,7
(7/1)	16 *	16	16,5	6,0	16	16,0	20,5	16	17,7	3,4	16	16,8	4,2	16	16,0	0,0	16	16,0	4,1
(7/2)	13 *	13	13,2	5,3	13	13,0	15,8	13	13,6	3,5	13	13,6	4,2	13	13,0	0,0	13	13,0	4,3
(7/3)	19 *	20	20,3	6,1	19	19,8	14,4	19	20,9	3,4	19	20,5	4,2	19	19,0	0,0	19	19,0	5,6
(7/4)	16 *	16	18,6	5,3	16	16,9	14,5	16	19,3	3,4	16	19,2	4,2	16	16,0	0,0	16	16,0	5,2
(7/5)	14 *	14	14,6	4,7	14	14,1	15,3	15	15,1	3,4	14	15,0	4,2	14	14,0	0,0	14	14,0	3,6
(7/6)	17 *	17	17,7	4,8	17	17,0	17,8	17	17,7	3,4	17	17,7	4,3	17	17,0	0,0	17	17,0	3,9
(7/7)	17 *	17	18,3	5,4	17	17,1	13,9	17	18,1	3,4	17	17,9	4,2	17	17,0	0,0	17	17,0	5,5
(7/8)	16 *	16	18,0	6,5	16	16,5	13,2	16	18,5	3,4	16	17,9	4,3	16	16,0	0,0	16	16,0	4,0
(7/9)	15 *	15	15,3	9,0	15	15,0	16,7	15	16,2	3,2	15	15,9	4,2	15	15,0	0,0	15	15,0	4,5
(7/10)	17 *	17	18,7	6,4	17	17,2	12,7	17	19,6	3,4	17	18,6	4,3	17	17,0	0,0	17	17,0	4,8
(8/1)	15 *	15	16,2	5,0	15	15,3	16,3	15	16,8	3,3	15	16,4	4,2	15	15,0	0,0	15	15,0	4,6
(8/2)	16 *	16	16,0	4,4	16	16,0	16,0	16	16,7	3,4	16	16,5	4,2	16	16,0	0,0	16	16,0	5,3
(8/3)	16 *	16	16,9	4,3	16														

Tabela 5 – Resultados Família Heskia

(grp,inst)	Ótimo	HS			CS_HS			ALNS			CS_ALNS			IBS (Blum e Miralles, 2010)			HGA (Moreira et al., 2012)		
		Melhor	Média	t(s)	Melhor	Média	t(s)	Melhor	Média	t(s)	Melhor	Média	t(s)	Melhor	Média	t(s)	Melhor	Média	t(s)
(1/1)	94 *	97	100,2	5,9	94	96,2	19,5	94	96,8	3,3	94	95,1	4,2	94	94,0	0,6	94	94,0	4,0
(1/2)	95 *	96	103,5	6,7	95	97,0	18,4	95	96,6	3,2	95	96,6	4,1	95	95,0	5,6	95	95,0	8,0
(1/3)	102 *	102	105,4	5,1	102	102,2	17,8	102	103,1	3,2	102	104,3	4,1	102	102,0	17,1	102	102,0	5,7
(1/4)	103 *	103	113,1	4,9	103	104,6	15,7	103	105,8	3,3	103	103,8	4,2	103	103,0	0,0	103	103,0	5,4
(1/5)	92 *	97	97,0	5,1	92	93,6	16,7	92	97,4	2,9	92	95,6	3,7	92	92,0	30,3	92	92,0	8,7
(1/6)	98 *	98	100,4	6,1	98	98,1	19,8	98	99,4	3,3	98	98,7	4,2	98	98,0	0,2	98	98,0	7,3
(1/7)	116 *	116	116,0	11,9	116	116,0	20,8	116	117,1	2,9	116	117,8	4,2	116	116,0	3,8	116	116,0	8,1
(1/8)	86 *	91	107,9	15,5	86	92,7	16,3	86	88,7	3,4	86	86,0	4,3	86	86,0	6,5	86	86,0	4,7
(1/9)	95 *	95	99,4	14,0	95	95,3	19,9	95	96,0	3,2	95	96,2	4,0	95	95,0	17,6	95	95,0	7,0
(1/10)	142 *	142	142,0	8,8	142	142,0	16,4	142	147,6	3,0	142	144,4	3,7	142	142,0	0,0	142	142,0	10,3
(2/1)	169 *	173	174,7	4,6	169	171,1	15,0	169	171,3	3,5	169	170,2	4,3	169	169,0	8,1	169	169,0	15,0
(2/2)	107 *	113	115,5	4,7	107	109,4	17,7	107	108,7	3,5	107	108,4	4,2	107	107,0	0,0	107	107,0	9,2
(2/3)	108 *	112	119,4	6,2	108	109,9	18,2	108	113,8	3,2	108	110,8	3,9	108	108,0	0,0	108	108,0	5,9
(2/4)	96 *	97	106,7	6,3	96	98,2	20,0	96	105,2	3,4	96	100,5	4,2	96	96,0	5,7	97	97,0	6,6
(2/5)	130 *	130	138,9	5,6	130	132,0	20,0	130	136,5	3,5	130	131,1	4,3	130	130,0	1,9	130	130,0	8,7
(2/6)	117 *	117	117,3	7,2	117	117,0	16,5	117	117,6	3,5	117	117,5	4,2	117	117,0	6,7	117	117,1	12,3
(2/7)	146 *	146	146,1	7,2	146	146,0	21,0	146	151,1	3,4	146	146,8	4,2	146	146,0	0,5	146	146,0	5,2
(2/8)	132 *	146	150,8	6,0	132	134,5	15,4	132	144,2	3,4	132	136,6	4,0	132	132,0	0,0	132	132,0	12,1
(2/9)	101 *	102	105,1	5,7	101	101,2	19,4	101	103,9	3,3	101	102,7	4,2	101	101,0	1,1	101	101,0	7,0
(2/10)	120 *	120	126,1	7,8	120	123,0	13,4	120	122,6	3,4	120	120,4	4,2	120	120,0	5,7	120	120,0	11,1
(3/1)	200 *	200	201,8	6,1	200	200,8	16,4	200	203,5	3,3	200	200,3	4,2	200	200,0	0,2	200	200,0	13,8
(3/2)	147 *	147	147,0	4,6	147	147,0	17,3	147	147,7	3,2	147	147,0	4,1	147	147,0	0,1	147	147,0	6,7
(3/3)	186 *	192	199,1	7,5	186	187,9	18,2	186	189,0	3,3	186	186,0	4,1	186	186,0	0,2	186	186,0	7,5
(3/4)	181 *	182	183,1	7,2	181	181,0	16,1	181	184,5	3,3	181	182,9	4,2	181	181,0	52,0	181	181,0	9,6
(3/5)	142 *	142	146,8	7,5	142	143,6	20,8	142	144,9	3,5	142	145,1	4,3	142	142,0	0,1	142	142,0	8,4
(3/6)	194 *	194	195,2	8,3	194	194,0	17,2	194	194,0	3,1	194	194,0	4,1	194	194,0	0,0	194	194,0	11,6
(3/7)	149 *	161	165,7	7,1	149	153,9	20,0	149	155,2	3,4	149	152,3	4,1	149	149,0	1,8	149	149,0	8,7
(3/8)	191 *	192	201,1	5,2	191	193,7	14,7	191	192,7	3,3	191	193,3	3,7	191	191,0	1,9	191	191,2	6,3
(3/9)	170 *	175	175,0	5,7	170	171,5	16,9	170	173,3	3,3	170	171,2	3,7	170	170,0	0,0	170	170,0	12,1
(3/10)	165 *	181	194,8	5,7	165	169,5	16,1	165	183,1	3,3	165	179,3	3,4	165	165,0	0,0	165	165,0	6,9
(4/1)	204 *	205	217,5	7,2	204	205,0	15,0	204	204,6	3,2	204	204,7	3,7	204	204,0	4,4	204	204,0	8,6
(4/2)	147 *	147	148,7	8,0	147	147,1	17,4	147	148,1	3,4	147	148,0	3,5	147	147,0	0,3	147	147,0	7,6
(4/3)	211 *	211	212,6	9,5	211	211,1	20,0	211	215,8	3,5	211	213,6	4,0	211	211,0	3,1	211	211,1	10,3
(4/4)	127 *	127	127,3	7,5	127	127,0	20,9	127	128,3	3,2	127	127,4	3,8	127	127,0	2,4	127	127,0	4,8
(4/5)	181 *	181	181,0	6,6	181	181,0	18,7	181	184,7	3,5	181	183,4	4,3	181	181,0	3,5	181	185,2	17,2
(4/6)	179 *	179	185,2	7,9	179	179,0	17,9	179	180,8	3,6	179	179,0	4,3	179	179,0	0,1	179	179,0	5,8
(4/7)	191 *	191	191,6	5,1	191	191,0	16,4	191	191,4	3,5	191	191,4	4,3	191	191,0	12,8	191	191,0	9,8
(4/8)	152 *	152	152,9	6,2	152	152,0	15,7	152	154,7	3,5	152	155,4	4,4	152	152,0	0,1	152	152,0	9,1
(4/9)	167 *	175	184,6	8,3	167	167,7	21,2	167	167,7	3,4	167	167,5	4,3	167	167,0	0,3	167	167,3	14,6
(4/10)	153 *	153	160,0	5,4	153	155,0	13,6	153	158,0	3,4	153	156,2	4,4	153	153,7	25,3	153	153,1	7,6
(5/1)	35 *	42	48,2	9,7	35	38,8	33,1	35	39,1	5,0	35	37,1	6,1	35	35,0	0,4	35	35,0	6,4
(5/2)	40 *	48	48,0	11,4	40	45,0	32,5	40	45,9	4,8	40	44,6	6,0	40	40,0	0,2	40	40,0	9,4
(5/3)	35 *	37	45,5	10,6	35	35,4	32,8	35	38,0	5,1	35	36,5	6,1	35	35,0	6,8	35	36,8	8,9
(5/4)	30 *	35	36,4	11,6	30	33,6	33,0	30	34,3	4,9	30	33,7	6,1	30	30,0	0,7	30	30,0	7,3
(5/5)	40 *	46	51,6	11,6	42	46,0	33,2	40	46,0	5,1	40	44,8	6,3	40	40,0	0,5	40	40,0	14,3
(5/6)	29 *	31	34,5	11,2	29	31,0	31,7	29	34,9	5,1	29	34,5	6,2	29	29,0	1,3	29	29,0	6,5
(5/7)	25 *	33	35,0	11,0	25	29,6	32,3	25	28,6	5,0	25	27,8	6,3	25	25,0	0,1	25	25,0	5,3
(5/8)	43 *	43	50,2	11,0	43	43,3	30,1	43	48,3	4,8	43	47,4	6,0	43	43,0	0,1	43	43,0	0,4
(5/9)	38 *	38	41,9	11,5	38	38,0	33,4	38	41,3	5,0	38	39,7	6,2	38	38,0	0,4	38	38,0	13,2
(5/10)	34 *	34	39,5	11,5	34	35,6	32,1	34	38,4	4,9	34	36,5	6,1	34	34,0	0,6	34	34,0	8,6
(6/1)	51 *	53	56,3	11,6	51	51,3	34,8	51	54,1	5,4	51	53,5	6,7	51	51,0	0,0	51	51,0	13,5
(6/2)	50 *	51	56,5	11,5	50	50,7	34,6	51	57,3	5,5	50	54,5	6,7	50	50,0	0,2	50	50,3	14,4
(6/3)	52 *	56	56,6	11,1	52	52,7	34,0	52	53,7	5,4	52	52,2	6,6	52	52,0	0,0	52	52,0	8,0
(6/4)	33 *	42	48,6	11,4	33	36,5	32,9	33	36,2	5,2	33	36,8	6,4	33	33,0	1,2	33	33,0	6,4
(6/5)	38	40	43,0	11,6	40	40,9	33,9	40	43,5	5,1	40	42,5	6,5	38	38,0	9,0	38	39,8	13,7
(6/6)	34 *	35	40,3	11,5	34	34,4	34,3	35	35,8	4,4	34	35,4	6,4	34	34,0	0,0	34	34,0	4,8
(6/7)	42	48	51,9	11,2	44	45,2	33,7	44	46,0	5,2	44	45,8	6,5	42	42,0	14,9	42	42,3	2,0
(6/8)	39 *	41	42,7	11,4	39	40,8	33,3	39	42,7	5,4	41	42,5	6,4	39	39,0	0,1	39	39,0	10,6
(6/9)	59 *	62	68,6	11,4	60	61,1	33,2	59	62,2	5,1	60	61,2	6,4	59	59,0	0,0	59	59,0	0,3
(6/10)	28 *	29	30,0	11,3	28	28,2	31,9	28	28,5	5,2	28	28,7	6,2	28	28,0	0,0	28	28,0	0,3
(7/1)	66 *	77	79,3	11,2	66	75,4	30,3	66	72,3	5,2	66	70,9	6,4	66	66,0	0,0	66	66,0	13,0
(7/2)	56 *	59	62,6	11,5	56	58,9	33,6	56	61,9	5,3	56	60,6	6,4	56	56,0	0,4	56	56,0	6,4
(7/3)	69 *	72	72,0	11,2	69	69,3	31,5	70	72,4	5,2	69	71,6	6,3	69	69,0	0,1	69	69,0	17,5
(7/4)	126 *	126	126,0	10,9	126	126,0	28,7	126	126,0	4,9	126	126,0	6,1	126	126,0	0,0	126	126,0	0,2
(7/5)	107 *	107	108,7	10,8	107	107,0	32,2	107	107,0	5,2	107	107,0	6,3	107	107,0	0,0	107	107,0	0,2
(7/6)	39 *	39	41,5	11,3	39	39,4	33,0	39	40,3	5,5	39	44,2	6,7	39	39,0	0,1	39	39,0	0,5
(7/7)	87 *	87	111,0	11,0	87	87,0	31,3	87	87,0	5,1	87	87,0	6,3	87	87,0	0,0	87	87,0	0,3
(7/8)	62 *	69	80,7	11,7	62	64,1	35,3	62	68,4	5,5	62	68,8	6,7	62	62,0	15,9	62	63,8	27,2
(7/9)	61 *	74	75,6	11,3	63	70,8	31,7	61	67,0	5,4	61	66,1	6,5	61	61,0	0,1			

Tabela 6 – Resultados Família Tonge

(grp,inst)	Melhor conhecido	HS			CS_HS			ALNS			CS_ALNS			IBS (Blum e Miralles, 2010)			HGA (Moreira et al., 2012)		
		Melhor	Média	t(s)	Melhor	Média	t(s)	Melhor	Média	t(s)	Melhor	Média	t(s)	Melhor	Média	t(s)	Melhor	Média	t(s)
(1/1)	90 *	109	127,8	115,8	90	96,1	495,7	105	133,9	68,4	102	117,2	181,8	93	94,0	59,2	91	95,5	225,5
(1/2)	87	112	127,9	125,7	88	100,2	479,0	104	128,0	65,0	98	120,9	180,2	94	95,6	78,9	87	92,9	183,3
(1/3)	105 *	122	150,9	123,1	105	113,1	504,8	122	156,2	68,9	115	132,4	185,2	106	108,8	28,3	105	108,1	182,6
(1/4)	109	125	146,1	123,3	112	116,9	454,4	135	158,5	63,8	113	134,2	190,1	112	114,6	108,9	109	114,2	297,8
(1/5)	92	128	149,3	121,4	95	101,8	505,8	109	145,4	70,4	110	126,5	189,0	92	93,2	149,8	92	93,0	172,1
(1/6)	88	115	137,4	120,5	92	100,1	498,1	103	140,2	67,8	101	122,5	181,3	90	92,3	98,2	88	90,1	244,1
(1/7)	95	126	150,8	121,4	96	102,5	491,9	115	151,7	73,7	103	132,5	185,9	95	95,0	118,0	95	95,7	136,8
(1/8)	104 *	115	141,3	121,2	104	112,0	552,7	115	152,3	75,4	108	136,8	187,0	108	110,9	77,1	106	107,5	223,6
(1/9)	71 *	81	102,6	104,6	71	78,3	691,1	85	114,8	78,7	79	93,5	180,4	73	73,8	107,0	72	72,2	170,3
(1/10)	83	96	122,8	84,7	84	92,5	251,2	104	121,8	79,0	96	115,7	185,3	86	88,7	38,4	83	90,3	221,3
(2/1)	110	122	167,5	80,8	115	121,1	205,9	153	221,3	92,1	129	163,2	194,4	112	112,0	56,6	110	111,5	216,6
(2/2)	108	131	168,4	92,0	115	121,0	217,5	144	176,6	83,3	116	147,9	189,2	116	117,7	46,5	108	111,9	267,5
(2/3)	105 *	131	152,1	89,9	105	115,1	212,1	133	206,7	78,4	120	137,7	192,6	105	105,0	78,8	105	110,9	238,9
(2/4)	93 *	128	145,9	91,5	93	101,6	215,3	108	164,1	76,4	104	142,4	195,9	93	94,5	206,3	93	93,1	233,2
(2/5)	94	143	166,2	93,5	99	104,4	221,2	125	172,1	94,3	99	148,7	187,8	95	97,8	105,7	94	97,2	176,0
(2/6)	101	118	139,2	103,5	102	105,0	343,9	122	163,0	94,0	114	141,3	194,6	101	101,7	124,9	101	101,0	187,7
(2/7)	122 *	141	182,5	108,7	122	130,9	469,3	139	180,5	95,1	133	168,2	189,7	123	123,0	40,1	123	123,2	245,7
(2/8)	112	159	189,2	105,7	113	129,3	464,9	144	189,1	116,1	135	175,0	228,9	113	116,1	75,2	112	114,8	252,5
(2/9)	127 *	150	187,1	116,8	127	134,7	392,0	148	201,2	178,8	144	181,3	205,5	128	128,6	79,9	129	130,6	337,6
(2/10)	116	148	188,2	118,8	120	125,4	280,5	134	222,6	163,3	123	207,4	188,2	116	119,1	107,7	118	118,0	256,4
(3/1)	158	213	245,1	113,5	168	177,6	258,0	184	248,5	170,7	184	219,9	205,9	171	173,0	314,0	158	161,5	407,0
(3/2)	161	210	233,4	111,6	169	176,1	268,0	202	226,3	169,9	169	194,3	207,2	161	163,4	152,0	169	173,8	468,1
(3/3)	145 *	156	194,9	133,1	145	149,7	245,2	157	213,6	166,3	148	170,3	201,0	148	149,5	86,8	145	147,4	322,7
(3/4)	147 *	175	212,1	138,1	147	159,5	254,6	188	220,0	166,8	174	202,6	203,1	150	156,3	47,4	147	149,7	297,0
(3/5)	167	209	239,3	131,2	170	175,7	437,2	195	248,1	166,1	180	219,3	195,5	174	177,8	146,8	167	173,5	424,2
(3/6)	163 *	208	236,3	118,2	163	177,5	343,0	199	251,7	168,8	184	227,8	228,9	173	175,7	294,8	167	177,9	408,9
(3/7)	146 *	182	204,2	133,4	146	151,9	339,0	169	237,3	164,5	156	187,2	184,5	149	155,3	159,2	150	154,4	380,2
(3/8)	176 *	212	251,1	130,0	176	199,6	422,3	214	271,6	121,5	196	233,5	203,5	182	184,7	155,4	179	181,4	350,0
(3/9)	186 *	224	253,6	132,6	186	192,0	440,9	195	262,2	120,1	197	238,8	201,1	189	190,7	103,4	187	190,7	509,3
(3/10)	153 *	196	222,8	139,3	153	161,4	449,1	190	236,9	121,4	169	202,6	217,8	153	153,8	43,0	153	153,3	342,8
(4/1)	169 *	201	234,7	138,1	169	177,1	467,6	201	260,1	119,1	180	213,8	143,8	175	178,1	104,7	175	181,4	568,9
(4/2)	178	222	250,3	135,5	180	193,1	454,4	227	268,2	118,5	190	225,5	140,0	180	180,3	134,2	178	179,6	257,4
(4/3)	157	221	255,0	139,9	165	181,2	462,2	192	242,5	120,8	180	214,6	138,6	157	157,0	130,9	157	157,9	303,0
(4/4)	172 *	220	273,4	130,5	172	188,0	434,5	211	282,6	119,2	197	234,7	140,2	181	181,5	79,8	184	184,0	350,2
(4/5)	146 *	182	227,9	113,9	146	154,8	460,6	166	215,7	121,6	171	210,9	139,3	152	153,9	55,6	146	149,6	357,0
(4/6)	169	208	229,6	110,6	172	181,3	444,1	186	239,1	119,4	177	213,7	140,6	169	171,3	252,0	174	181,5	303,2
(4/7)	167	210	247,1	115,1	173	188,9	397,7	199	271,7	119,8	186	227,5	139,4	167	167,0	301,5	167	167,0	281,6
(4/8)	152 *	199	234,5	122,2	152	164,2	272,0	195	225,1	121,4	163	189,4	141,2	153	154,4	258,0	152	153,7	274,7
(4/9)	181 *	230	263,5	133,9	184	203,7	264,6	221	267,0	122,7	181	235,9	141,7	183	186,1	131,6	181	181,0	396,5
(4/10)	170	225	254,2	134,9	177	188,0	298,0	199	240,6	122,1	183	224,0	140,9	183	184,8	46,7	170	174,0	382,9
(5/1)	29	53	66,2	138,1	38	42,1	383,9	53	71,2	168,1	42	60,1	163,2	29	29,8	152,2	29	29,2	269,8
(5/2)	33	52	61,6	139,4	40	42,8	366,3	57	67,3	144,0	45	56,6	139,5	33	34,6	55,8	33	35,3	343,5
(5/3)	33	57	72,8	139,5	38	41,2	490,7	61	69,9	168,6	43	52,0	177,6	33	33,6	59,0	34	35,2	363,8
(5/4)	34	60	68,5	137,7	40	43,3	590,8	52	70,3	139,1	49	60,9	253,2	34	36,0	111,6	37	38,4	307,9
(5/5)	31	62	69,7	139,5	40	43,5	349,5	62	74,5	126,9	49	59,7	249,3	31	32,7	116,5	31	33,5	295,3
(5/6)	38	53	73,4	139,4	41	46,3	309,0	59	69,7	100,4	45	56,8	187,6	38	38,1	59,8	38	39,0	245,7
(5/7)	32	49	61,6	133,5	39	42,6	311,7	54	77,6	100,4	43	53,5	156,1	32	33,2	27,2	33	33,1	252,4
(5/8)	35	54	68,1	135,1	39	43,4	349,1	54	73,9	102,7	48	60,8	158,3	35	35,9	56,1	36	37,2	339,3
(5/9)	34	47	59,8	132,6	38	43,4	371,8	55	66,1	102,0	43	52,4	191,8	34	34,9	74,1	36	36,0	196,0
(5/10)	32	55	65,4	131,2	39	42,8	401,1	58	70,1	95,2	47	58,4	159,7	32	33,3	167,5	34	35,1	355,4
(6/1)	38	70	83,1	136,1	42	47,1	454,4	65	97,3	94,0	54	71,0	166,1	38	39,7	111,0	39	40,7	366,4
(6/2)	43	69	83,8	133,5	45	54,1	513,5	68	87,9	102,6	54	67,5	162,1	43	43,0	39,1	43	44,3	96,7
(6/3)	36	71	86,7	135,9	44	49,1	592,3	62	112,6	98,0	54	63,0	163,1	36	39,3	76,5	38	39,1	392,6
(6/4)	39	72	86,3	135,9	43	48,9	572,6	63	80,4	99,7	52	63,1	164,0	40	41,1	86,8	39	39,5	207,0
(6/5)	40	75	90,4	137,1	44	53,8	592,7	68	91,4	105,1	58	70,7	164,5	40	40,3	67,7	41	42,0	361,2
(6/6)	38	77	90,5	140,8	43	48,9	578,2	67	117,8	101,7	60	73,3	165,9	40	41,0	79,8	38	41,6	347,3
(6/7)	42	83	92,9	136,6	51	56,3	574,7	73	189,7	105,8	56	71,6	164,1	42	42,9	88,0	44	48,0	430,5
(6/8)	42	66	86,9	139,4	46	49,5	557,3	69	88,5	137,5	57	126,9	165,3	42	42,1	62,2	43	45,7	303,6
(6/9)	37	53	79,8	134,4	42	44,4	532,0	66	84,0	140,8	40	54,7	159,9	37	37,1	55,0	39	39,0	294,4
(6/10)	38	61	96,1	135,0	46	50,6	494,2	70	138,3	143,4	51	74,4	162,3	42	43,3	39,0	38	40,8	200,7
(7/1)	63	94	114,5	130,6	72	77,1	303,9	103	122,2	149,4	81	102,0	170,9	63	65,7	182,6	65	68,6	421,4
(7/2)	68	102	121,2	138,7	77	83,3	315,0	98	123,4	149,8	88	103,6	173,4	68	71,3	173,4	68	75,8	540,6
(7/3)	66	113	134,3	141,2	73	83,4	303,7	109	134,8	152,0	85	111,3	174,6	69	70,6	156,4	66	69,0	511,9
(7/4)	97 *	119																	

Tabela 7 – Resultados Família Wee-Mag

(grp,inst)	Melhor conhecido	HS			CS_HS			ALNS			CS_ALNS			IBS (Blum e Miralles, 2010)			HGA (Moreira et al., 2012)		
		Melhor	Média	t(s)	Melhor	Média	t(s)	Melhor	Média	t(s)	Melhor	Média	t(s)	Melhor	Média	t(s)	Melhor	Média	t(s)
(1/1)	25	43	49,8	140,4	31	35,1	533,3	44	51,7	86,0	30	39,0	110,3	28	29,3	104,6	25	27,9	152,9
(1/2)	26	43	49,3	136,1	33	35,7	508,2	46	52,3	89,2	33	37,6	125,4	28	29,1	93,6	26	27,1	126,7
(1/3)	25	47	51,8	137,9	33	36,7	437,2	42	48,7	73,3	32	37,3	95,9	27	27,2	128,2	25	25,9	111,6
(1/4)	30	50	55,8	131,0	37	38,9	381,5	47	52,9	62,0	35	42,0	104,2	33	33,7	121,5	30	31,4	154,0
(1/5)	30	49	56,4	138,0	36	39,9	538,3	49	53,8	65,9	37	41,8	104,3	32	32,5	121,6	30	30,3	152,9
(1/6)	25	44	52,4	139,7	34	35,4	534,4	43	50,4	63,0	32	37,3	100,5	26	27,4	95,2	25	25,8	123,3
(1/7)	25	45	51,0	141,7	29	34,9	536,7	45	50,2	65,9	31	37,0	107,9	27	28,4	88,3	25	26,4	134,8
(1/8)	28	48	53,4	137,4	35	38,4	527,7	46	51,8	83,1	37	40,5	112,1	31	32,6	90,5	28	29,3	150,1
(1/9)	26	43	48,8	128,6	29	33,1	522,4	44	48,0	83,8	32	37,2	108,0	27	28,0	77,7	26	26,5	123,0
(1/10)	27	46	56,1	98,3	31	36,3	525,8	48	54,3	81,7	33	39,8	122,6	28	29,2	127,9	27	27,6	139,3
(2/1)	31	45	63,1	94,3	34	39,2	535,0	52	60,7	91,6	35	42,1	130,6	32	33,3	99,2	31	31,9	160,0
(2/2)	31	50	61,0	92,9	36	39,9	459,0	47	62,1	82,1	39	45,3	136,4	33	34,4	123,7	31	32,8	172,3
(2/3)	32	50	63,7	150,1	38	42,1	389,2	54	61,6	92,7	41	48,7	143,9	32	34,3	64,6	32	32,5	141,7
(2/4)	31	50	59,9	107,2	38	41,3	381,2	50	60,2	109,4	40	45,2	161,6	33	34,4	105,1	31	33,4	142,5
(2/5)	33	53	61,8	118,1	38	42,5	394,2	51	65,0	113,7	43	48,1	136,4	34	34,8	60,1	33	34,7	170,2
(2/6)	31	52	58,4	134,8	33	38,7	530,4	48	62,2	108,5	40	45,8	101,4	32	33,0	85,8	31	31,6	180,5
(2/7)	31	49	60,2	139,4	34	40,2	531,1	53	116,1	99,2	38	51,5	112,3	34	34,0	35,5	31	33,2	148,4
(2/8)	36	61	70,9	141,5	40	44,0	554,9	56	78,1	127,1	41	49,8	106,9	37	39,0	88,7	36	37,0	210,1
(2/9)	31	54	60,2	145,4	38	41,5	558,1	49	57,0	129,6	41	45,6	103,0	33	33,2	87,3	31	32,2	124,8
(2/10)	35	50	61,5	144,7	40	42,7	505,1	55	67,4	122,0	43	52,4	119,1	36	38,8	99,4	35	36,2	138,0
(3/1)	50	78	88,0	139,7	55	60,9	585,8	78	92,3	111,0	59	69,1	126,8	50	51,6	148,2	50	51,9	279,1
(3/2)	44	75	83,0	108,0	52	55,3	519,7	68	83,9	125,5	59	64,2	109,4	48	49,4	181,5	44	46,8	293,9
(3/3)	47	77	93,0	128,2	50	59,4	522,1	79	91,8	132,1	57	67,0	97,6	48	49,7	189,3	47	49,5	232,9
(3/4)	49	80	94,0	140,9	63	68,0	534,8	68	85,8	123,6	60	67,1	135,0	52	54,7	148,9	49	50,1	241,5
(3/5)	46	81	92,8	143,3	56	60,0	526,9	75	86,5	134,7	55	65,3	139,3	49	49,8	101,0	46	49,2	206,7
(3/6)	46	86	97,6	143,7	59	64,7	537,0	74	87,6	124,9	61	70,3	198,5	47	49,0	201,7	46	48,6	247,6
(3/7)	52	80	92,4	139,3	60	64,9	529,9	77	87,9	118,1	56	67,1	178,9	56	57,0	155,0	52	53,7	211,8
(3/8)	47	77	93,3	142,2	56	62,7	536,8	71	83,0	118,9	57	65,5	176,3	51	53,4	148,6	47	50,2	293,3
(3/9)	44	75	84,1	139,2	53	56,3	498,9	70	79,4	119,6	55	60,3	172,3	45	46,1	159,8	44	45,4	223,0
(3/10)	51	84	100,6	143,1	58	63,4	542,2	76	88,7	113,4	63	71,1	167,7	55	55,6	169,4	51	53,6	255,5
(4/1)	49	81	94,1	140,8	56	62,8	535,3	78	90,3	118,6	62	70,4	176,0	51	52,5	159,7	49	50,3	244,3
(4/2)	45	78	93,8	143,2	58	62,9	542,1	76	85,8	123,9	56	65,4	166,9	49	53,4	172,8	45	45,8	269,3
(4/3)	48	80	95,1	142,0	58	64,8	537,6	80	89,8	120,1	59	70,8	162,8	52	54,5	220,6	48	51,9	285,1
(4/4)	55	85	95,0	143,1	63	68,3	534,6	85	92,9	116,5	62	70,6	131,7	58	59,9	146,2	55	58,2	334,3
(4/5)	43	79	91,7	141,1	53	60,5	534,3	78	86,7	121,0	50	63,6	114,0	47	49,1	142,6	43	47,4	269,5
(4/6)	46	73	91,0	130,2	53	57,7	506,1	70	79,3	127,9	52	65,6	115,9	49	50,3	118,1	46	48,2	207,3
(4/7)	39	76	89,3	133,3	50	55,4	512,6	61	76,3	125,3	49	58,7	114,1	42	42,6	118,9	39	41,0	179,0
(4/8)	44	75	91,3	142,1	54	59,2	516,8	76	86,2	121,2	50	61,7	111,2	47	48,0	85,1	44	46,9	246,1
(4/9)	47	75	89,1	143,7	52	57,0	516,9	69	85,5	108,3	51	67,3	126,0	50	51,8	104,1	47	47,8	251,1
(4/10)	40	67	88,4	139,7	50	57,8	519,1	71	80,8	118,7	48	62,5	129,7	41	42,4	165,3	40	40,6	172,6
(5/1)	10	23	27,7	184,9	16	18,2	729,1	30	34,0	118,1	16	22,0	197,4	10	10,3	80,8	10	10,8	192,9
(5/2)	10	22	25,9	186,8	14	17,1	340,3	28	33,3	108,4	16	20,9	139,7	10	10,8	45,1	11	11,0	225,0
(5/3)	10	23	27,7	184,4	14	17,7	372,0	26	33,1	125,3	15	22,9	121,6	10	10,1	70,0	10	10,4	181,9
(5/4)	11	24	28,8	162,9	17	19,7	364,9	31	36,2	117,4	19	23,8	173,9	12	12,3	60,5	11	12,4	268,0
(5/5)	11	22	27,6	171,6	16	17,5	599,8	28	33,6	110,5	16	23,0	115,9	11	11,0	40,5	11	11,6	199,9
(5/6)	9	24	26,7	186,7	16	18,2	323,1	29	34,0	105,6	18	22,8	117,5	10	10,0	45,9	9	10,2	205,2
(5/7)	11	27	30,5	155,8	18	20,7	334,4	29	37,7	122,6	20	25,2	115,2	11	11,3	111,8	12	12,6	254,5
(5/8)	10	23	26,2	141,0	14	17,7	336,8	30	34,1	111,9	17	22,0	106,2	10	10,9	26,2	11	11,4	197,3
(5/9)	9	22	26,8	162,0	12	16,4	337,2	29	32,3	132,9	17	22,4	108,1	9	9,6	52,3	10	10,2	203,9
(5/10)	10	23	27,2	153,3	15	16,9	342,9	29	33,8	130,1	17	20,6	114,5	10	10,6	37,5	10	10,7	210,8
(6/1)	12	31	37,0	144,8	18	21,1	345,7	33	39,3	85,2	20	25,7	121,2	12	12,7	51,1	12	13,2	224,8
(6/2)	10	26	33,8	149,8	16	18,5	327,8	28	35,2	87,1	18	23,6	120,6	10	10,6	63,1	11	11,1	220,5
(6/3)	11	31	36,8	140,8	16	19,8	396,3	31	37,5	89,1	18	25,6	115,4	11	11,6	38,3	12	12,0	195,4
(6/4)	12	31	34,5	145,4	17	20,2	460,7	31	38,7	84,8	19	26,3	119,8	12	12,3	73,8	13	13,7	228,9
(6/5)	12	29	33,9	141,4	17	19,4	490,3	27	62,5	85,7	19	23,8	122,1	12	12,3	68,3	12	12,8	196,7
(6/6)	13	32	37,8	140,2	20	22,6	545,0	33	40,7	86,0	22	25,2	123,5	13	13,2	68,0	13	13,7	251,4
(6/7)	12	27	33,8	145,2	17	20,4	522,4	33	40,2	83,6	22	27,1	157,4	12	12,4	65,4	12	12,7	218,2
(6/8)	12	30	36,2	143,1	19	20,7	536,6	30	44,3	87,6	19	23,9	135,3	12	12,4	62,5	12	12,2	229,3
(6/9)	14	30	36,2	147,5	19	21,7	527,0	34	42,0	90,3	17	27,2	133,9	14	14,4	58,0	14	14,6	248,4
(6/10)	11	28	34,0	137,8	17	19,1	455,1	31	37,8	83,9	20	25,9	159,6	11	11,9	54,1	12	12,6	241,9
(7/1)	16	37	46,8	136,9	23	26,4	457,9	37	48,0	89,5	25	32,3	143,7	16	16,9	41,8	17	17,5	242,3
(7/2)	18	40	46,9	145,6	24	28,6	450,5	46	51,6	92,7	27	33,5	133,0	18	19,1	71,1	18	19,0	144,4
(7/3)	19	41	47,6	146,7	26	29,0	463,1	41	53,4	105,5	30	37,5	171,7	19	20,0	77,5	19	20,7	301,1
(7/4)	17	41	49,0	151,6	25	28,5	510,3	46	58,5	167,6	30	37,4	190,4	17	18,0	58,9	17	19,1	311,4
(7/5)	18	46	51,3	131,9	30	33,1	489,1	47	57,0	141,8	29	38,1	190,8	18	19,1	104,4	19	20,0	322,8
(7/6)	18	40	52,0	142,2	26	31,7	483,6	46	54,8	135,7	25	35,6	185,1	18	18,9	82,4	19	19,3	296,1
(7/7)	20	43	54,0	130,8	28	33,1	575,4	46	56,1	138,7	28	37,8	190,7	20	20,1	77,8	20	20,7	324,5
(7/8)	15	40	46,0	139,0	22	25,2	729,8	44	51,6	135,8	24	32,9	186,0	15	15,6	77,4	16	16	

Nota-se que para as instâncias da família Roszieg todos os quatro algoritmos propostos tiveram um bom desempenho, atingindo a solução ótima ou resultados muito próximos dela. A grande diferença está no tempo computacional do HS e CS_HS, que foi muito superior se comparado aos algoritmos de melhor desempenho da literatura. Isso se deve à quantidade de iterações realizadas pelo HS, que é tido como parâmetro fixo, independente da complexidade do problema.

Para a família Heskia, ao utilizar o CS conseguiu-se atingir a solução ótima na maioria das 80 instâncias, sendo que o tempo computacional do CS_HS ainda continuou muito superior que todos os outros algoritmos.

Para a família Tonge o CS_HS conseguiu superar o conjunto das melhores soluções conhecidas em 12,5% das instâncias com um tempo computacional compatível com as outras heurísticas, contribuindo para este conjunto. Em outras 11,3% das instâncias atingiu-se a melhor solução conhecida com um tempo computacional compatível com as outras heurísticas.

Nenhuma das quatro implementações tiveram um bom desempenho para a família Wee-Mag, sendo que a de melhor desempenho, o CS_HS, é 24% pior comparativamente ao conjunto de melhores soluções conhecidas.

Em todas as quatro famílias nota-se que o uso do CS possibilita uma melhoria na qualidade das soluções ao se comparar com a implementação apenas das meta-heurísticas HS e ALNS. Observa-se também que esta melhoria se intensifica de acordo com o aumento da complexidade das instâncias. Esta análise pode ser vista na Tabela 8.

Tabela 8 – Percentual de melhoria do desempenho do algoritmo quando se implementa também o CS

	HS	ALNS
Roszieg	0,3%	0,3%
Heskia	3,2%	0,2%
Tonge	22,9%	11,3%
Wee-Mag	31,9%	29,7%

5.2 Testes para avaliar a variação no tempo de ciclo em uma linha de produção com 1 ou 2 trabalhadores com deficiência

Um segundo teste realizado foi a utilização da implementação de melhor desempenho, o CS_HS, para resolver um novo conjunto de instâncias teste. Este conjunto possui

trabalhadores com e sem deficiência, sendo possível comparar a variação do tempo de ciclo a partir da presença de um ou dois trabalhadores com deficiência. Estes testes tiveram como motivação simular uma situação próxima a encontrada nas empresas que cumprem a Lei nº 8.213 de 24 de julho de 1991 que obriga as empresas com mais de 100 funcionários terem seu quadro de funcionários formado por 2 a 5% de pessoas com deficiência (Brasil, 1991).

As novas instâncias foram criadas com base na família Tonge da coleção de problemas clássicos do SALBP (Hoffmann, 1990) utilizando a mesma lógica de Chaves *et al.* (2007). Definiu-se utilizar 17 trabalhadores, assim como nas instâncias da seção anterior, pois já se conhece a solução ótima deste problema quando se tem apenas trabalhadores sem deficiência, equivalente ao SALBP (Scholl, 1999), que é um tempo de ciclo igual a 208. Três fatores foram considerados ao se gerar as novas instâncias:

- Número de trabalhadores com deficiência;
- Variabilidade dos tempos de uma tarefa para os trabalhadores com deficiência;
- Porcentagem de incompatibilidades tarefa/trabalhador para os trabalhadores com deficiência.

Para o primeiro fator considerou-se duas situações, uma com um trabalhador e outra com dois trabalhadores, sendo cerca de 6% e 12% do efetivo trabalhando formado de pessoas com deficiência. Os tempos de execução das tarefas pelos trabalhadores foram gerados aleatoriamente, com base em uma distribuição uniforme, a partir de uma variação do tempo original da tarefa (t_i). Para isto, foram definidos dois níveis para a variabilidade dos tempos utilizando as distribuições $U[t_i, 2t_i]$ e $U[t_i, 3t_i]$, obtendo uma variabilidade de tempo pequena e grande, respectivamente. Para o terceiro fator, utilizou-se a mesma regra que em Chaves *et al.* (2007), com 10% e 20%. Para cada combinação de fatores 10 instâncias foram criadas, dando um total de 80 instâncias de teste. Elas estão disponíveis no endereço <http://www.sjc.unifesp.br/docente/chaves>.

Os testes foram realizados em um PC com processador Core i5 2,53Ghz e 4 GB de memória RAM. Durante os testes, executou-se 5 vezes cada instância e os resultados podem ser vistos na Tabela 9. A coluna %var(ótimo) apresenta a variação do melhor tempo de ciclo encontrado quando comparado com o tempo ótimo quando não se tem trabalhadores com deficiência, que é igual a 208. A coluna %var(209) apresenta a variação do melhor tempo de ciclo encontrado quando comparado com o melhor tempo encontrado pelo HS quando não se tem trabalhadores com deficiência, que é igual a 209.

Tabela 9 – Resultados dos testes das novas instâncias

(grp,inst)	Variação Tempo	Taxa Incomp.	1 Trabalhador com deficiência					2 Trabalhadores com deficiência				
			Melhor	Média	t(s)	% var (209)	% var (ótimo)	Melhor	Média	t(s)	% var (209)	% var (ótimo)
(1/1)	[ti,2ti]	10%	213	218,0	507,9	1,9%	2,4%	215	218,0	456,2	2,9%	3,4%
(1/2)			213	216,0	502,9	1,9%	2,4%	215	218,0	462,7	2,9%	3,4%
(1/3)			213	216,0	498,0	1,9%	2,4%	214	218,0	446,9	2,4%	2,9%
(1/4)			211	216,0	511,9	1,0%	1,4%	216	220,0	449,3	3,3%	3,8%
(1/5)			211	217,0	510,6	1,0%	1,4%	215	219,0	456,3	2,9%	3,4%
(1/6)			211	217,0	491,5	1,0%	1,4%	213	217,0	480,6	1,9%	2,4%
(1/7)			213	217,0	487,4	1,9%	2,4%	216	219,0	527,6	3,3%	3,8%
(1/8)			212	215,0	504,1	1,4%	1,9%	216	220,0	473,6	3,3%	3,8%
(1/9)			211	214,0	504,2	1,0%	1,4%	217	218,0	462,0	3,8%	4,3%
(1/10)			212	215,0	508,6	1,4%	1,9%	215	220,0	478,2	2,9%	3,4%
Média			212,0	216,1	502,7	1,4%	1,9%	215,2	218,7	469,3	3,0%	3,5%
(2/1)	[ti,2ti]	20%	210	214,0	511,4	0,5%	1,0%	213	215,0	468,8	1,9%	2,4%
(2/2)			212	214,0	500,0	1,4%	1,9%	213	215,0	472,9	1,9%	2,4%
(2/3)			214	217,0	505,0	2,4%	2,9%	219	221,0	441,7	4,8%	5,3%
(2/4)			211	218,0	519,3	1,0%	1,4%	216	221,0	476,1	3,3%	3,8%
(2/5)			213	216,0	458,0	1,9%	2,4%	216	220,0	458,6	3,3%	3,8%
(2/6)			212	215,0	502,2	1,4%	1,9%	219	222,0	484,2	4,8%	5,3%
(2/7)			213	217,0	435,9	1,9%	2,4%	215	219,0	471,3	2,9%	3,4%
(2/8)			211	215,0	462,1	1,0%	1,4%	216	218,0	472,2	3,3%	3,8%
(2/9)			210	215,0	518,9	0,5%	1,0%	216	220,0	441,1	3,3%	3,8%
(2/10)			212	215,0	680,9	1,4%	1,9%	215	217,0	478,7	2,9%	3,4%
Média			211,8	215,6	509,4	1,3%	1,8%	215,8	218,8	466,6	3,3%	3,8%
(3/1)	[ti,5ti]	10%	214	219,0	478,8	2,4%	2,9%	220	223,0	487,2	5,3%	5,8%
(3/2)			214	219,0	470,4	2,4%	2,9%	218	222,0	485,2	4,3%	4,8%
(3/3)			212	216,0	480,3	1,4%	1,9%	217	221,0	477,3	3,8%	4,3%
(3/4)			216	221,0	480,4	3,3%	3,8%	221	223,0	499,5	5,7%	6,3%
(3/5)			213	217,0	463,3	1,9%	2,4%	223	224,0	486,4	6,7%	7,2%
(3/6)			216	220,0	622,5	3,3%	3,8%	219	223,0	431,5	4,8%	5,3%
(3/7)			213	218,0	503,4	1,9%	2,4%	219	224,0	502,4	4,8%	5,3%
(3/8)			213	219,0	439,5	1,9%	2,4%	221	223,0	483,8	5,7%	6,3%
(3/9)			215	218,0	601,0	2,9%	3,4%	223	225,0	497,3	6,7%	7,2%
(3/10)			216	219,0	501,9	3,3%	3,8%	222	224,0	498,6	6,2%	6,7%
Média			214,2	218,6	504,1	2,5%	3,0%	220,3	223,2	484,9	5,4%	5,9%
(4/1)	[ti,5ti]	20%	212	217,0	464,3	1,4%	1,9%	218	221,0	496,5	4,3%	4,8%
(4/2)			214	218,0	455,7	2,4%	2,9%	221	224,0	494,4	5,7%	6,3%
(4/3)			214	219,0	420,6	2,4%	2,9%	224	227,0	490,4	7,2%	7,7%
(4/4)			215	219,0	451,2	2,9%	3,4%	224	226,0	480,4	7,2%	7,7%
(4/5)			214	219,0	445,7	2,4%	2,9%	216	222,0	496,8	3,3%	3,8%
(4/6)			214	218,0	456,4	2,4%	2,9%	223	224,0	489,5	6,7%	7,2%
(4/7)			214	218,0	446,9	2,4%	2,9%	220	223,0	485,8	5,3%	5,8%
(4/8)			215	219,0	447,2	2,9%	3,4%	223	225,0	484,4	6,7%	7,2%
(4/9)			216	219,0	458,4	3,3%	3,8%	224	225,0	476,8	7,2%	7,7%
(4/10)			212	218,0	461,8	1,4%	1,9%	221	223,0	454,8	5,7%	6,3%
Média			214,0	218,4	450,8	2,4%	2,9%	221,4	224,0	485,0	5,9%	6,4%

Observa-se que a variação da incompatibilidade quando se tem apenas um trabalhador praticamente não influencia na variação dos tempos de ciclo. Já quando se tem dois trabalhadores com deficiência, seu impacto é maior, chegando até a 0,5% de incremento no tempo de ciclo, que representa 8% da variação total do tempo, que foi de 6,4%.

Nota-se que a variação do tempo de ciclo quando se tem dois trabalhadores com deficiência e incompatibilidade de 20% foi sempre maior que o dobro quando comparado quando se tem apenas um trabalhador. Isso se deve a dificuldade de alocar os trabalhadores e “esconder” suas deficiências em estações de trabalho que tinham alguma folga em seus tempos.

Verifica-se ainda que em todos os casos houve uma piora, mesmo que mínima, nos tempos de ciclo. Já era de se esperar encontrar um valor ao menos igual ao da solução ótima do SALBP, 208, tendo em vista que a distribuição de tempos utilizada para gerar os tempos dos trabalhadores com deficiência gerava um tempo no mínimo igual ao tempo original da instância.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou quatro implementações de três diferentes meta-heurísticas para resolver o problema de Balanceamento de Linha e Designação de Trabalhadores, conhecido na literatura como ALWABP. Duas delas, o *Harmony Search* e o *Adaptive Large Neighborhood Search*, nunca haviam sido implementadas para este problema. Já o *Clustering Search* já foi implementado para resolver o ALWABP utilizando outras heurísticas como geradoras de soluções.

Os experimentos computacionais mostraram que as duas implementações do *Clustering Search*, utilizando o HS e o ALNS como geradoras de soluções, apresentam bons resultados em um tempo computacional razoável, sendo que o *Clustering Search* que utiliza o *Harmony Search* como heurística geradora de soluções conseguiu encontrar a melhor solução conhecida para 19 instâncias da família Tonge, sendo que 10 delas ainda não eram conhecidas, contribuindo com o conjunto de melhores soluções conhecidas desta instância. Contudo, as melhores soluções para as outras 61 instâncias da família Tonge e para família Wee Mag estão divididas entre o *Iterated Beam Search* de Blum e Miralles (2010) e o *Hybrid Genetic Algorithm* de Moreira *et al.* (2012).

Ao comparar as implementações do *Harmony Search* e *Adaptive Large Neighborhood Search* com as do *Clustering Search* que as utilizam como heurísticas geradoras de soluções conseguiu-se uma melhoria de até 31% na qualidade das soluções. Isso se deve à intensificação da busca em regiões promissoras, principal característica do *Clustering Search*.

Nos testes onde se inseriu um ou dois trabalhadores com deficiência em uma linha de produção com trabalhadores sem deficiências verificou-se que sempre houve aumento do tempo de ciclo. Isto, de fato, nem sempre acontece. Há algumas atividades em que pessoas com deficiência podem ter um desempenho superior se comparado a pessoas sem deficiências. Um exemplo é a inserção de pessoas portadoras de deficiência visual em postos de inspeção de qualidade por tato, onde a falta da visão neste caso auxilia o trabalhador a ter maior concentração ao realizar o trabalho e maior percepção.

De fato, a procura de métodos eficientes para resolver o ALWABP tem também um grande peso social. A viabilização da entrada de pessoas com deficiência no mercado de trabalho de forma otimizada é de grande importância tanto para o empregador, que terá minimizado suas possíveis perdas de produção com uma pessoa com deficiência integrada em sua equipe de trabalho, quanto para as pessoas com deficiência, que passarão a ser vistas

como mão de obra produtiva e não apenas integrantes do quadro simplesmente para o cumprimento de uma obrigação legal.

6.1 Trabalhos futuros

A formulação da função objetivo adaptada ao problema utiliza-se de fatores de penalização constantes, ω e δ , quando há desrespeito às regras de precedência e quando se aloca um trabalhador a uma tarefa que ele não é capaz de realizar, respectivamente. Indica-se investigar em trabalhos futuros o impacto no desempenho dos algoritmos ao se utilizar valores dinâmicos nestes parâmetros.

O *Adaptive Large Neighborhood Search* foi a meta-heurística com os piores resultados da quatro implementações. Sugere-se o desenvolvimento de novos métodos de destruição e reparo visando melhorar o desempenho da meta-heurística. Estes métodos podem basear-se nas duas meta-heurísticas com os melhores resultados até o momento para o ALWABP: o *Iterated Beam Search* e o *Hybrid Genetic Algorithm*.

Um ponto interessante a ser abordado em futuras pesquisas é criar uma forma de mensurar a variação de eficiência de uma linha de produção que possui um trabalhador com deficiência. Esta é uma informação de grande importância para auxiliar aos gestores na decisão do melhor posto para alocar uma pessoa com deficiência, levando em consideração que um posto pode ser bom para uma pessoa e ruim para outra, devido a diferentes tipos de deficiência.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, F. F. B.; COSTA, A. M.; MIRALLES, C. Extensão do problema ALWABP: melhorando a flexibilidade através de estações paralelas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 42., 2010, Bento Gonçalves. **Anais do XLII ...** Rio de Janeiro: SOBRAPO, 2010. p. 2404-2414.
- BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 22, n. 2, p. 241-264, 2002.
- BLUM, C.; MIRALLES, C. On solving the assembly line worker assignment and balancing problem via beam search. **Computers & Operations Research**, v. 38, n. 1, p. 328-339, Jan 2010.
- BLUM, C.; ROLI, A. Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. **ACM Computing Surveys (CSUR)**, v. 35, n. 3, p. 268-308, 2003.
- BOYSEN, N.; FLIEDNER, M.; SCHOLL, A. A classification of assembly line balancing problems. **European Journal of Operational Research**, v. 183, n. 2, p. 674-693, 2007.
- BOYSEN, N.; FLIEDNER, M.; SCHOLL, A. Assembly line balancing: Which model to use when? **International Journal of Production Economics**, v. 111, n. 2, p. 509-528, 2008.
- BRASIL. Lei Nº 8.213, de 24 de julho de 1991. Dispõe sobre os Planos de Benefícios da Previdência Social e dá outras providências. Brasília 1991.
- CHAVES, A. **Uma meta-heurística híbrida com busca por agrupamentos aplicadas a problemas de otimização combinatória**. 2009. 196p. Tese (Doutorado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009.
- CHAVES, A.; LORENA, L.; MIRALLES, C. Hybrid metaheuristic for the assembly line worker assignment and balancing problem. **Lecture Notes in Computer Science (Hybrid Metaheuristics)**, v. 5818, p. 1-14, 2009a.
- CHAVES, A.; MIRALLES, C.; LORENA, L. Clustering search approach for the assembly line worker assignment and balancing problem. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTERS AND INDUSTRIAL ENGINEERING, 37., 2007. Alexandria. **Proceedings ...** Alexandria: 2007. p. 1469–1478.
- CHAVES, A.; MIRALLES, C.; LORENA, L. Problema de Balanceamento e Designação de Trabalhadores em Linha de Produção: uma abordagem via o método híbrido Busca por Agrupamentos (CS). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 41., 2009b. Porto Seguro. **Anais do XLI ...** Rio de Janeiro: SOBRAPO, 2009. p. 2061-2072.
- CHAVES, A. A.; MIRALLES, C.; LORENA, L. A. N. Uma Metaheurística Híbrida Aplicada ao Problema de Balanceamento e Designação de Trabalhadores em Linha de Produção. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 40., 2008. João Pessoa. **Anais XL ...** Rio de Janeiro: SOBRAPO, 2008. p.1479-1490.

COELHO, L. D.; BERNERT, D. L. D. An improved harmony search algorithm for synchronization of discrete-time chaotic systems. **Chaos Solitons & Fractals**, v. 41, n. 5, p. 2526-2532, Sep 2009.

COSTA, A.; MIRALLES, C. Rotação de tarefas em linhas de produção com trabalhadores deficientes. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 40., 2008, João Pessoa. **Anais do XL...** Rio de Janeiro: SOBRAPO, 2008. p. 143-152.

COSTA, A. et al. Análise da eficiência de linhas de produção com trabalhadores deficientes. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 41., 2009. Porto Seguro. **Anais do XLI ...** Rio de Janeiro: SOBRAPO, 2009. p. 698-709.

COSTA, A. M.; MIRALLES, C. Job rotation in assembly lines employing disabled workers. **International Journal of Production Economics**, v. 120, n. 2, p. 625-632, Aug 2009.

COSTA, C. R. D. **Condução de Experimentos Computacionais com Métodos Heurísticos**. 2011. 149 p. Dissertação (Mestrado em Computação) – Instituto de Informática, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2009.

DEGERTEKIN, S. O. Optimum design of steel frames using harmony search algorithm. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, v. 36, n. 4, p. 393-401, Oct 2008.

GEEM, Z. **Recent Advances In Harmony Search Algorithm**. Springer, 2010. 296 p.

GEEM, Z. W.; KIM, J. H.; LOGANATHAN, G. V. A new heuristic optimization algorithm: Harmony search. **Simulation**, v. 76, n. 2, p. 60-68, 2001.

GLOVER, F. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. **Computers and Operational Research**, v. 13, n. 5, p. 533-549, 1986.

GLOVER, F., Ed. **Tabu search and adaptive memory programming-advances, applications and challenges**. Interfaces in computer science and operations research: Kluwer Academic Publishers, v.1, p.1-75, Interfaces in computer science and operations research, 1 ed. 1996.

GLOVER, F.; KOCHENBERGER, G. **Handbook of metaheuristics**. Springer, 2003.

GOLDBERG, D.; HOLLAND, J. Genetic algorithms and machine learning. **Machine Learning**, v. 3, n. 2, p. 95-99, 1988.

HOFFMANN, T. R. Assembly line balancing: a set of challenging problems. **International Journal of Production Research**, v. 28, n. 10, p. 1807 - 1815, 1990.

IBGE. **Resultados preliminares da amostra do Censo 2010**. Rio de Janeiro: IBGE 2011.

KIRKPATRICK, S. Optimization by simulated annealing: Quantitative studies. **Journal of Statistical Physics**, v. 34, n. 5, p. 975-986, 1983.

LEE, K. S.; GEEM, Z. W. A new meta-heuristic algorithm for continuous engineering optimization: harmony search theory and practice. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v. 194, n. 36-38, p. 3902-3933, 2005.

MAHDAVI, M.; FESANGHARY, M.; DAMANGIR, E. An improved harmony search algorithm for solving optimization problems. **Applied Mathematics and Computation**, v. 188, n. 2, p. 1567-1579, 2007.

MIGUEL, P. et al. **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010. 248 p.

MIRALLES, C. et al. Advantages of assembly lines in Sheltered Work Centres for Disabled. A case study. **International Journal of Production Economics**, v. 110, n. 1-2, p. 187-197, 2007.

MIRALLES, C. et al. Branch and bound procedures for solving the assembly line worker assignment and balancing problem: Application to sheltered work centres for disabled. **Discrete Applied Mathematics**, v. 156, n. 3, p. 352-367, Feb 2008.

MOREIRA, M.; COSTA, A. Heurísticas Construtivas para o Problema de Balanceamento em Linhas de Produção com Trabalhadores Deficientes. In: Encontro Regional de Pesquisa Operacional da Região Sul, 3., 2009a. Porto Alegre. **Anais do III ...** Porto Alegre:Inf-UFRGS, 2009. p.7-12.

MOREIRA, M.; COSTA, A. A minimalist yet efficient tabu search algorithm for balancing assembly lines with disabled workers. 2009b. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 41., 2009. Porto Seguro. **Anais do XLI ...** Rio de Janeiro: SOBRAPO, 2009. p. 660-671.

MOREIRA, M. et al. Simple heuristics for the assembly line worker assignment and balancing problem. **Journal of Heuristics**, p. 1-20, 2012.

MURRAY, B. **Employment for social justice and a fair globalization**. 2010. Disponível em: <http://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_emp/documents/publication/wcms_140958.pdf>. Acesso em: 03 out. 2010.

OLIVEIRA, A.; LORENA, L. Hybrid evolutionary algorithms and clustering search. **Hybrid Evolutionary Algorithms**, p. 77-99, 2007.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Mainstreaming Disability in the Development Agenda**. 2008. Disponível em: <<http://www.un.org/disabilities/documents/reports/e-cn5-2008-6.doc>>. Acesso em: 03 out. 2010.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **World report on disability 2011**. São Paulo: SEDPcD: 334 p. 2012.

PISINGER, D.; ROPKE, S. Large neighborhood search. **Handbook of Metaheuristics**, p. 399-419, 2010.

RESENDE, A. P. C.; VITAL, F. M. P. **Convenção sobre Direitos das Pessoas com Deficiência comentada**. Brasília: Secretaria Especial dos Direitos Humanos: 164 p. 2008.

ROPKE, S.; PISINGER, D. An adaptive large neighborhood search heuristic for the pickup and delivery problem with time windows. **Transportation Science**, v. 40, n. 4, p. 455-472, Nov 2006.

SCHOLL, A. **Balancing and sequencing of assembly lines**. 2 ed. Heidelberg: Physica, 1999. 318 p.

SCHOLL, A.; BECKER, C. State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing. **European Journal of Operational Research**, v. 168, n. 3, p. 666-693, Feb 2006.

SCHOLL, A.; VOß, S. Simple assembly line balancing—Heuristic approaches. **Journal of Heuristics**, v. 2, n. 3, p. 217-244, 1997.

SHAW, P. Using constraint programming and local search methods to solve vehicle routing problems. **Principles and Practice of Constraint Programming—CP98**, p. 417-431, 1998.