

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
CAMPUS TIMÓTEO**

André Filipe Rodrigues Malta

**SIMULATED ANNEALING APLICADO AO PROBLEMA DE
FORMAÇÃO DE CÉLULAS DE MANUFATURA**

Timóteo

2017

André Filipe Rodrigues Malta

SIMULATED ANNEALING APLICADO AO PROBLEMA DE FORMAÇÃO DE CÉLULAS DE MANUFATURA

Monografia apresentada à Coordenação de Engenharia de Computação do Campus Timóteo do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Computação.

Orientador: Prof. Dr. Elder de Oliveira Rodrigues

Timóteo

2017

André Filipe Rodrigues Malta

SIMULATED ANNEALING APLICADO AO PROBLEMA DE FORMAÇÃO DE CÉLULAS DE MANUFATURA

Monografia apresentada à Coordenação de Engenharia de Computação do Campus Timóteo do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Computação.

Orientador: Prof. Dr. Elder de Oliveira Rodrigues

Trabalho aprovado. Timóteo, 07 de dezembro de 2017.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Elder de Oliveira Rodrigues
Orientador



Prof. Me. Douglas Nunes de Oliveira
Professor Convidado



Profª. Drª. Viviane Cota Silva
Professora Convidada

Timóteo
2017

Agradecimentos

Primeiramente a Deus que permitiu que tudo isso acontecesse, por ter me dado saúde e força para superar todas as dificuldades. A esta presente instituição, pelo ambiente criativo e amigável que proporciona. A todo corpo docente, direção e administração que se esforçou sem limites para a elaboração e manutenção do curso. Agradeço a todos os professores por me proporcionar o conhecimento não apenas racional, mas pela manifestação do caráter e afetividade da educação no processo de formação profissional. Ao meu orientador Elder de Oliveira Rodrigues, pelo empenho, paciência, incentivos e por se fazer presente para ajudar à qualquer momento. Agradeço aos meus pais, pelo amor, incentivo e apoio. E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

Resumo

O problema de formação de células de manufatura visa a organização do fluxo produtivo, tendo como meta melhorar a eficiência de uma operação industrial, minimizando o trabalho e maximizando a qualidade do produto. Assim sendo, esta abordagem traz consigo a sistematização das máquinas a essas células, para processarem uma ou mais famílias de peças, de modo que cada célula seja operada de forma independente e os movimentos intercelulares sejam minimizados. Neste âmbito, o presente trabalho propõe a utilização de um algoritmo evolutivo iterativo, denominado de *simulated annealing*, correlacionado com o método de agrupamento aglomerativo hierárquico de ligação única, sendo que este último é utilizado para gerar a solução inicial. Foram aplicados os procedimentos de atribuição de peças e de máquinas para direcionar o *simulated annealing* a convergir para soluções com bons valores de eficácia de agrupamento, explorando as propriedades com finalidade de obter um ótimo global e evitando que o mesmo fique preso a um ótimo local. Contudo, o mesmo deve ser capaz de lidar com a restrição de quantidade máxima de células.

Palavras-chave: células de manufatura, *simulated annealing*, agrupamento aglomerativo hierárquico.

Abstract

The manufacturing cell formation problem has the objective of organizing the production flow, aiming to improve the efficiency of an industrial operation, minimizing the work and maximizing the product's quality. Thus, this approach brings the systematization of the machines to these cells, to process one or more part families, so that each cell is operated independently and the intercellular movements are minimized. In this context, the present research proposes the use of an iterative evolutionary algorithm, called simulated annealing, correlated with the agglomerative single linkage clustering method, the latter have being used to generate the initial solution. Part assignment and machine assignment procedures were applied to direct simulated annealing to solution with good group efficacy values, exploiting the properties in order to obtain a global optimum and avoiding it being stuck to a local optimum. However, it should be able to handle the constraint of maximum amount of cells.

Keywords: manufacturing cells, simulated annealing, agglomerative hierarchical clustering.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Distribuição do tempo no processo de usinagem	16
Figura 2 – Arranjo das máquinas em um <i>jobshop</i>	17
Figura 3 – Arranjo das máquinas em um ambiente de manufatura celular	18
Figura 4 – <i>Layout</i> celular dedicado à manufatura de uma família de peças	19
Figura 5 – Classificação dos métodos de formação de células	20
Figura 6 – Arranjo de máquinas e sua representação por uma matriz de incidência	22
Figura 7 – Comparação entre matriz de incidência e sequência	23
Figura 8 – Matriz incidência peça-máquina reordenada	24
Figura 9 – Movimento intercelular	24
Figura 10 – Movimento intracelular	25
Figura 11 – Cálculo da eficácia do agrupamento	26
Figura 12 – Algoritmos para formação de células de manufatura	28
Figura 13 – Solução vizinha com uma pequena alteração	30
Figura 14 – Agrupamento hierárquico	32
Figura 15 – Gráfico representativo dos métodos aglomerativos	33
Figura 16 – Fluxograma do método ligação única para matriz de similaridade	40
Figura 17 – Exemplo de formação <i>cluster</i> inicial	40
Figura 18 – Exemplo de agrupamento gerado pela matriz de similaridade	41
Figura 19 – Gráfico eficácia por decaimento da temperatura: Problema 1	49
Figura 20 – Gráfico eficácia por decaimento da temperatura: Problema 2	51
Figura 21 – Gráfico eficácia por decaimento da temperatura: Problema 3	54
Figura 22 – Gráfico eficácia por decaimento da temperatura: Problema 4	56
Figura 23 – Gráfico eficácia por decaimento da temperatura (sem restrição de células): Problema 5	58
Figura 24 – Gráfico eficácia por decaimento da temperatura ($C_{max} = 7$): Problema 5	59
Figura 25 – Gráfico eficácia por decaimento da temperatura ($C_{max} = 6$): Problema 5	60

Lista de quadros

Quadro 1 – Fórmulas matemáticas da distância dos objetos entre dois <i>clusters</i>	34
Quadro 2 – Quadro de notações	43
Quadro 3 – Quadro de notações para o <i>simulated annealing</i>	45

Lista de tabelas

Tabela 1 – Tabela de contingência 2x2	38
Tabela 2 – Um exemplo de cálculo dos coeficientes de similaridade	39
Tabela 3 – Atribuição de peças	41
Tabela 4 – Solução inicial com duas células de manufatura	42
Tabela 5 – Matriz de incidência: Problema 1	48
Tabela 6 – Resultado do <i>simulated annealing</i> : Problema 1	48
Tabela 7 – Comparação dos resultados: Problema 1	49
Tabela 8 – Matriz de incidência: Problema 2	50
Tabela 9 – Resultado do <i>simulated annealing</i> : Problema 2	50
Tabela 10 – Comparação dos resultados: Problema 2	51
Tabela 11 – Matriz de incidência: Problema 3	52
Tabela 12 – Resultado do <i>simulated annealing</i> com $C_{max} = 4$: Problema 3	52
Tabela 13 – Resultado do <i>simulated annealing</i> sem restrição de células: Problema 3	53
Tabela 14 – Comparação dos resultados: Problema 3	53
Tabela 15 – Matriz de incidência: Problema 4	55
Tabela 16 – Resultado do <i>simulated annealing</i> : Problema 4	55
Tabela 17 – Comparação dos resultados: Problema 4	56
Tabela 18 – Matriz de incidência: Problema 5	57
Tabela 19 – Resultado do <i>simulated annealing</i> sem restrição de células: Problema 5	57
Tabela 20 – Resultado do <i>simulated annealing</i> com $C_{max} = 7$: Problema 5	58
Tabela 21 – Resultado do <i>simulated annealing</i> com $C_{max} = 6$: Problema 5	59
Tabela 22 – Comparação dos resultados: Problema 5	60

Lista de abreviaturas e siglas

TG	<i>Tecnologia de Grupo</i>
CMS	<i>Sistema de Célula de Manufatura</i>
ICM	<i>Inter Cell Movement (Movimento Intercelular)</i>
AG	<i>Algoritmo Genético</i>
SA	<i>Simulated Annealing</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Justificativa	13
1.2	Objetivos	14
1.3	Estrutura da monografia	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	Tecnologia de grupo e manufatura celular	16
2.2	Abordagens para células de manufatura	19
2.3	Arranjos de máquinas	21
2.3.1	Matriz de incidência	22
2.3.2	Matriz de sequência	22
2.4	Processo de agrupamento	23
2.4.1	Avaliação do agrupamento	25
2.5	Simulated annealing	27
2.5.1	O algoritmo	30
2.6	Agrupamento hierárquico (identificação de <i>cluster</i>)	31
2.6.1	Métodos aglomerativos	32
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	35
3.1	Revisão da literatura	35
3.2	Adaptação do problema e restrições	36
3.3	Comparação e avaliação dos resultados	36
4	DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO	37
4.1	Formulação do sistema de manufatura celular	37
4.1.1	Solução Inicial	37
4.1.1.1	Atribuição em família de peças	37
4.1.1.2	Atribuição de máquinas	42
4.1.2	Função objetivo e restrições adotadas	43
4.1.3	Geração da soluções vizinhas	43
4.2	Simulated annealing para formação de células de manufatura	44
5	TESTES E ANÁLISE DOS RESULTADOS	47
5.1	Parâmetros do <i>simulated annealing</i>	47
5.2	Análise dos resultados	47
5.2.1	Problema 1	48
5.2.2	Problema 2	50
5.2.3	Problema 3	52
5.2.4	Problema 4	54

5.2.5	Problema 5	56
6	CONCLUSÃO	61
6.1	Considerações finais	61
6.2	Trabalhos futuros	62
	REFERÊNCIAS	63

1 Introdução

Diante do mercado atual, com a globalização, competitividade e exigências dos clientes, os fabricantes tem buscado cada vez mais técnicas para aprimorarem sua capacidade de produção, garantindo menores custos, alta produtividade e qualidade. Contudo, com a variação de demanda, as indústrias modernas chegam a fabricar diversos tipos de produtos simultaneamente, lançando-os no mercado com ciclo de vida menor. Além do mais, existem diversos processos que necessitam de manutenção rápida, por exemplo, a troca de uma linha de montagens. Se não for realizada desta maneira, pode acarretar em uma parada imediata no processo de produção, impactando negativamente no processo produtivo. Em geral, essas indústrias possuem diversas máquinas e necessitam que as mesmas atendam da melhor maneira a produção demandada.

Neste contexto, se faz necessário o planejamento da produção de forma eficiente, com a elaboração de um modelo capaz de otimizar o fluxo de fabricação das peças. Para isso, torna-se imprescindível o agrupamento das máquinas utilizando a técnica de células de manufatura. Uma das etapas cruciais no projeto de um *layout* celular é agrupar as partes em famílias e máquinas em células, de forma que as peças com necessidades de processamento similares permaneçam juntas em uma mesma célula de manufatura, sendo completamente fabricadas dentro da mesma. No entanto, células completamente independentes possuem comumente uma difícil geração, pois na prática, algumas das partes podem precisar ser processadas em mais de uma máquina, podendo estar em outras células de manufatura, levando à existência de alguns movimentos intercelulares no fluxo de fabricação. Assim, o principal objetivo do problema desta formação é encontrar o agrupamento de máquinas em células que minimizem os movimentos intercelulares. Desta forma é possível reduzir o tempo gasto no processo produtivo.

Esta metodologia tem sido adotada em vários tipos de indústrias, como por exemplo, a de componentes elétricos, automotivas, espaciais e montadoras de computadores. Segundo Lit, Falkenauer e Delchambre (2000), a formação de células de manufaturas é fundamentada no princípio de que objetos semelhantes compartilham operações e recursos, desta forma, formando subsistemas de produção.

Deste modo, a literatura traz vários tratamentos para resolução do problema de formação de células de manufaturas, que podem ser classificadas de acordo com as diferentes perspectivas. Estas perspectivas vão de encontro com abordagens de pesquisa operacional (programação linear e programação inteira), técnicas heurísticas, meta-heurísticas, análise de fluxo de fabricação (BURBIDGE, 1985), redes neurais e técnicas híbridas que englobam métodos meta-heurísticos com redes neurais artificiais.

1.1 Justificativa

De acordo com o crescimento do mercado, a otimização do processo de produção se torna fundamental, de modo que, a indústria que obtém maior eficiência e qualidade na fabricação tem um lucro maior comparado com suas concorrentes.

Segundo Díaz, Luna e Zetina (2013) muitas vantagens trazem a implementação de células de manufaturas, entre elas, a simplificação de manuseio de materiais, redução do custo de movimentação de materiais, redução dos prazos de produção, redução das máquinas e do trabalho durante processo de fabricação. A busca pela solução de um *layout* industrial pode atingir altos níveis de complexidade devido aos seus diversos aspectos geométricos e combinatórios possíveis, englobando fatores quantitativos e qualitativos que, quando associados, tornam-se difíceis de modelar e analisar. Analogamente, a formação de células de manufaturas é um problema caracterizado como NP-completo (KING; NAKORNCHAI, 1982). Sendo assim, pode não existir um algoritmo polinomial para este problema.

A maior parte dos problemas de formação de células visam a minimização do movimento intercelular, e outros, em menor quantidade, visam minimizar custos e/ou carga de máquina. A complexidade do problema é determinada principalmente a partir da quantidade de células e de máquinas. Outro fator, mas secundário, que agrega na complexidade é a quantidade de tipos de peças, sendo que este aumenta relativamente quando se também aumenta o número de máquinas.

As abordagens para soluções descritas na literatura são estudadas e comparadas, todavia esta comparação é difícil de ser realizada, posto que os métodos abordados tratam e englobam restrições de formas distintas. Contudo é de se questionar o tempo de convergência que as mesmas levam para obter o resultado e/ou a qualidade da solução encontrada. Apesar da literatura conter diversas técnicas para realizar a otimização do processo de organização para problemas de *layouts* industriais, atualmente vem surgindo inúmeras pesquisas sobre abordagens que vão de encontro a métodos de agrupamentos aglomerativos, nas quais resultam na formação de células de manufatura com boa eficácia. Não obstante, em alguns casos estes métodos de agrupamentos podem ser bastante falhos, o que leva alguns estudos a aplicá-los juntamente com um método meta-heurístico, sendo o mesmo utilizado como solução inicial. Normalmente as meta-heurísticas são aplicadas a problemas para os quais não se conhece um algoritmo totalmente eficiente, sendo considerados problemas NP-completos.

Em virtude disto, se justifica este trabalho pela criação de um algoritmo utilizando uma meta-heurística para resolução do problema de células de manufatura, demonstrando portanto seu comportamento na aplicação em um problema computacional visando obter uma solução viável com menor custo computacional, com maior eficácia do agrupamento e com objetivo de escapar de possíveis estagnações em um ponto de ótimo local. Descrito então, por meio de um arranjo de peças e máquinas que representam um chão de fábrica modeladas por intermédio da matriz de incidência.

1.2 Objetivos

A busca de métodos que possam atingir boas soluções, sem necessariamente serem ótimas, mas que levem em consideração um tempo computacional razoável, tem em comum a utilização de técnicas que escapem de ótimos locais que possam ainda estarem longes de um ótimo global. A partir disso, o objetivo principal é minimizar o movimento intercelular e intra-celular, sendo que as células de manufaturas devem ser formadas adequadamente seguindo as restrições físicas reais existentes no projeto, para que, desta forma, o *layout* industrial seja considerado eficaz. Com isso, este trabalho visa implementar uma solução para o problema da formação de células de manufatura utilizando a meta-heurística *simulated annealing*.

Mais especificamente, os objetivos podem ser descritos nos seguintes tópicos:

1. Analisar algoritmos de otimização contidos na literatura que são utilizados para resolver o problema de células de manufatura.
2. Implementar o algoritmo baseado na meta-heurística *sumulated annealing* para estudar o comportamento em um problema de otimização combinatória.
3. Adaptar a implementação para suportar o problema de células de manufatura descrito através da matriz de incidência de peças e máquinas.
4. Comparar com as demais abordagens individuais de resolução do problema, de acordo com os cenários propostos contidos na literatura.

1.3 Estrutura da monografia

Esta monografia está organizada em 5 capítulos. Esses capítulos foram ordenados em uma sequência lógica que facilitaram a compreensão do leitor.

- No capítulo 2 é apresentada a fundamentação que serve como base teórica para o trabalho, incluindo uma conceituação sobre tecnologia de grupo e manufatura celular, além de discorrer sobre os métodos adotados para otimização da função objetivo, sendo utilizado o *simulated annealing* com o método de agrupamento de ligação única.
- No capítulo 3 é demonstrado o processo metodológico adotado no desenvolvimento deste trabalho. Nele é feito uma análise preliminar de domínio juntamente com processo de seleção da literatura base e a definição das ferramentas e parâmetros para a implementação do algoritmo de otimização para o problema de manufatura celular.
- No capítulo 4 é explanada toda a fundamentação teórica através do desenvolvimento e implementação do *simulated annealing* para otimização combinatória, modelando-a de tal forma a resolver o problema de manufatura celular. Discorrendo também, todo processo para geração da solução inicial, soluções vizinhas, atribuição de peças e atribuição de máquinas.

- No capítulo 5 é analisado o desempenho da algoritmo a partir de diversos problemas contidos na literatura. Juntamente com isso, para cada um dos problemas é realizado uma comparação com alguns métodos de resolução já conhecidos. Os resultados serão mostrados em forma de matriz, gráfico e tabela, para melhor visualização do leitor.
- No capítulo 6 é apresentado a conclusão obtida sobre a implementação de uma meta-heurística para o problema de otimização combinatória. Também é discorrido sobre alguns temas e mudanças relevantes no algoritmo para geração de trabalhos futuros.

2 Fundamentação teórica

*“Não há lugar para a sabedoria onde não há paciência.”
Santo Agostinho*

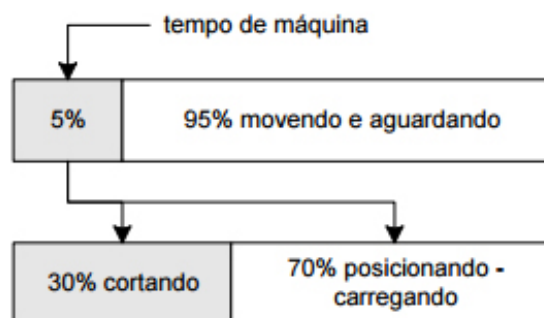
Este capítulo é dividido em seis seções, e busca-se a contextualização do leitor sobre os princípios teóricos nos quais este trabalho se fundamenta. Nesta conjuntura, explicitando as tecnologias utilizadas para a realização desta pesquisa, sendo apresentadas de forma teórica, permitindo que haja desta forma a melhor assimilação do funcionamento das mesmas em suas aplicações práticas diante de um ambiente onde se faz uso do conceito de manufatura celular.

2.1 Tecnologia de grupo e manufatura celular

A partir da década de 60, o conceito de Tecnologia de Grupo (TG) passou a ser trabalhado nas grandes indústrias, sendo difundida principalmente em países industrializados como Estados Unidos, Inglaterra, Alemanha, Japão e Oriente Médio. Entretanto, nesta época a TG era somente empregada como uma técnica de otimização para a diminuição de *setup* e minimização da troca de ferramentas nas máquinas. Não sucedia-se a preocupação em se formar um fluxo de produção balanceado.

Entretanto, há uma grande importância que fluxo de produção seja bem definido e balanceado. Em um ambiente de fabricação por usinagem, de acordo com Lorini (1993) somente 5% do tempo total no processo de manufatura é dado pela operação principal de corte do metal, logo quando a peça está em contato com metal-cortante aproximadamente 30% dos respectivos 5% gastos no processo de manufatura correspondem ao real trabalho de fato (Figura 1), considerando que o resto do tempo é empregado em preparação, carga e descarga dos materiais. O mal planejamento acarreta drasticamente no aumento da perda de tempo, sendo que 95% do tempo é desperdiçado na movimentação das peças entre as máquinas.

Figura 1 – Distribuição do tempo no processo de usinagem



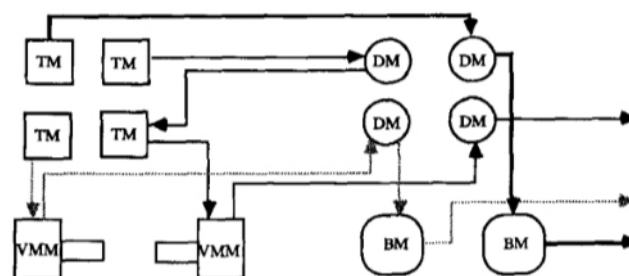
Fonte: (LORINI, 1993)

Com este ponto, é conhecido que a globalização da economia tem levado as indústrias a uma corrida contra o tempo, com propósito de produzir significativamente cada vez mais em menos tempo, sob pena de perder a disputa pela hegemonia do mercado. Deste modo, as indústrias procuram apresentar ao mercado consumidor sempre uma nova vantagem competitiva, por meio de produtos melhores ou inovadores. Vale lembrar que, aliado a isto destaca-se também a inviabilidade de manter estoques, devido a altos custos envolvidos e riscos de obsolescência dos produtos, o que obriga o processo produtivo ser mais flexível quanto a volume e variedade dos mesmos, em razão do ciclo de vida ser menor. A não consideração destes fatores no projeto de um ambiente produtivo com tantos requisitos, leva de fato a um fluxo de produção totalmente desequilibrado.

Nestas circunstâncias é possível adquirir o aumento da produtividade, utilizando técnicas aplicadas na redução do fluxo de informações necessárias para o planejamento do projeto de *layout*, o que organiza o setor produtivo. De acordo com Heragu (1994) a tecnologia de grupo é uma filosofia que tenta agrupar produtos com *design* e/ou características de fabricação similares. Sendo assim, o conceito de manufatura celular, relativamente recente, pode ser definido como uma aplicação da TG envolvendo o agrupamento das máquinas ou processos em família no princípio do compartilhamento de operações e recursos entre as mesmas.

Existe portanto uma grande e relevante diferença de um ambiente tradicional funcional de fabricação (*jobshop*) com um ambiente no qual foi aplicado a manufatura celular. Em um *jobshop*, as máquinas são tipicamente organizadas em grupos (*clusters*) de acordo com suas semelhanças funcionais, dispondo de máquinas do mesmo tipo próximas umas as outras, constituindo em um arranjo de especialização por processo (CHAN; LAM; LEE, 1999). Este conceito corresponde à modalidade de arranjo de equipamentos mais comum e antiga encontrada na maioria das instalações indústrias de manufatura, como mostra a Figura 2, onde **TM**, **DM**, **BM** e **VMM** constituem máquinas com diferentes funcionalidades, e as setas determinam o caminho das peças no processo de manufatura. Identifica-se que o fluxo de manufatura é bastante confuso, possuindo muitos movimentos entre os grupos para obtenção do produto final.

Figura 2 – Arranjo das máquinas em um *jobshop*

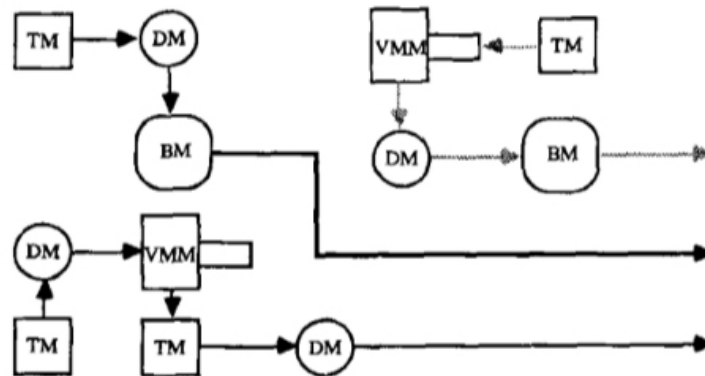


Fonte: (HERAGU, 1994)

Em contrapartida, quando se aplica a manufatura celular, os agrupamentos de máqui-

nas em grupos, passam a serem chamados de células, e são formados seguindo processos de fabricação de famílias de peças. Cada célula, portanto, possui uma função diferente, como mostra a Figura 3.

Figura 3 – Arranjo das máquinas em um ambiente de manufatura celular



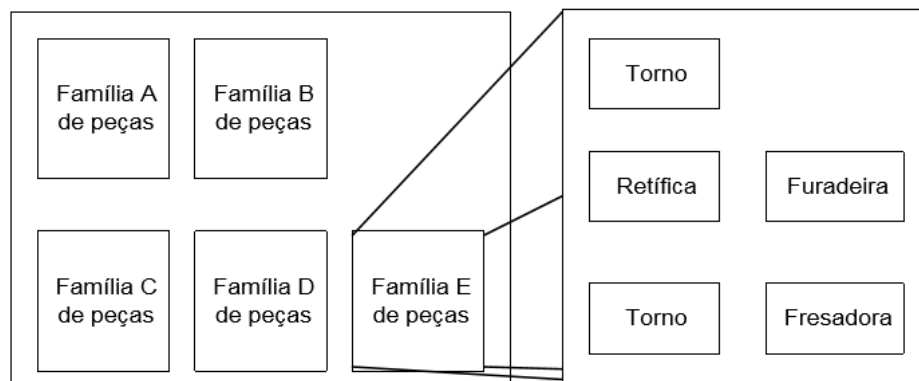
Fonte: (HERAGU, 1994)

Neste contexto, é de fácil percepção que um ambiente onde foi adotado a manufatura celular tem o fluxo de produção mais limpo e organizado. O objetivo principal na concepção de uma célula de manufatura é a criação de células de máquinas, alocando as famílias de peças para que o movimento intercelular seja minimizado. Para isso deve-se levar em conta várias restrições, por exemplo, a alocação de famílias de peças para células de máquinas respeitando a capacidade disponível das máquinas, a quantidade de máquinas em uma célula, o número total de células não excedendo o número desejado pelo usuário e diversas outras restrições existentes em um fluxo real de produção. Contudo Heragu (1994) expõe diversos benefícios, os quais aumentam a produção, sendo os principais entre eles:

- Redução do tempo de *setup*
- Redução de custos de manuseamento de materiais
- Redução do custo dos equipamentos e de trabalho
- Melhoria da qualidade do produto final
- Melhoria no fluxo de material
- Melhoria na utilização da máquina
- Melhoria na utilização do espaço
- Melhoria da moral dos funcionários

Em um senso amplo, a meta de uma célula de manufatura (Figura 4) é melhorar a eficiência de uma operação industrial minimizando o trabalho como também maximizando qualidade do produto, a utilização dos equipamentos e a flexibilidade da produção (CHAN; LAM; LEE, 1999).

Figura 4 – Layout celular dedicado à manufatura de uma família de peças



Fonte: (CHAN; LAM; LEE, 1999)

Um sistema de produção celular oferece maior adaptação à produção de pequenos lotes, mas traz algumas desvantagens consigo ao serem aplicadas em ambientes que introduzem novos produtos ou componentes muito diferentes dos convencionais de fabricação, devido ao fato que as células são formadas a partir dos existentes na fábrica. Como consequência, em alguns casos, acarreta até mesmo na criação de um novo *layout* industrial. A tarefa de modificar o *layout* envolve custos com instalações das máquinas, além do mais, para a minimização entre movimentações de peças entre células, o investimento em máquinas redundantes deve ser levado em consideração, pois acarreta, em primeiro momento, no aumento do custo do projeto.

2.2 Abordagens para células de manufatura

Nas últimas décadas, a manufatura celular vem sendo implementada em diversas indústrias. Muitos pesquisadores vêm desenvolvendo técnicas e algoritmos para auxiliar a formação de famílias de peças, associadas as respectivas tarefas nas máquinas.

Para realizar a formação de células de manufatura é necessário identificar máquinas com diferentes funcionalidades e agrupá-las, na qual é dedicada a produção de partes que possuem alto nível de similaridade entre si, sejam estas de forma geométrica e/ou de processos de fabricação. Esta abordagem se aplica em melhor situação para o caso de indústrias que possuam como foco a variedade de produto e o volume moderado de produção.

Uma das primeiras técnicas desenvolvidas, intitulada de Análise do Fluxo de Produção (BURBIDGE, 1985), constitui-se como uma importante etapa da organização de um sistema de produção, e é composta das seguintes etapas:

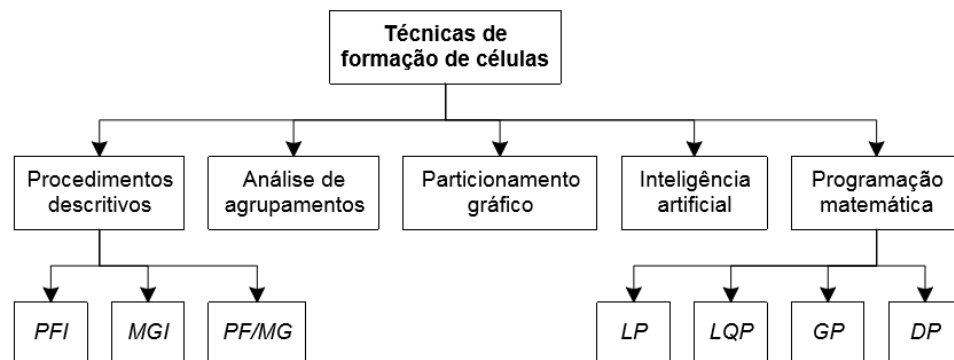
- Levantamento dos recursos de produção(máquinas, ferramentas e profissionais) disponíveis e das rotas de produção de cada parte.
- Formação de células de manufatura

- Escalonamento das operações das partes em cada célula de máquinas e projeto do *layout* físico da indústria.

Assim como a Análise de Fluxo de Produção, outras técnicas foram desenvolvidas para otimizar ao máximo a formação de células de manufaturas, com objetivo principal de redução dos gargalos de produção, causados por movimentos intercelulares (movimentação das peças entre as células de manufatura). Entretanto, destaca-se que o projeto de manufatura é uma atividade complexa devido às múltiplas restrições e objetivos conflitantes que um ambiente de produção possui, sendo caracterizado como um problema NP-completo (KING; NAKORNCHAI, 1982), ou seja, um subconjunto de NP (conjunto nas quais suas soluções podem ser encontradas e verificadas em tempo polinomial por um algoritmo não determinístico) descrito informalmente como sendo os mais difíceis problemas dentro deste conjunto, uma vez provado que este problema seja do tipo NP-completo, um algoritmo polinomial para o mesmo pode não existir.

Em geral, essas técnicas podem ser identificadas como: inspeção visual; técnicas de classificação e codificação; técnicas de Análise do Fluxo de Produção; conjunto de algoritmos teóricos; programação matemática; técnicas baseadas em custos; algoritmos genéticos e inteligência artificial (redes neurais). Várias implementações das mesmas podem ser encontradas na literatura facilmente, Selim, Askin e Vakharia (1998) as classificam em uma metodologia geral, como podemos ver na Figura 5.

Figura 5 – Classificação dos métodos de formação de células



PFI – identificação de famílias de peças

MGI – identificação de grupos de máquinas

PF/MG – agrupamentos de famílias de peças e de grupos de máquinas simultaneamente

LP – programação linear

LQP – programação linear e quadrática de números inteiros

GP – programação objetiva

DP – programação dinâmica

Fonte: (SELIM; ASKIN; VAKHARIA, 1998)

A maior parte dos problemas de formação de células visam à minimização do movimento intercelular, e outros, em menor quantidade, visam minimizar custos e/ou carga de máquina. A complexidade do problema é determinada principalmente a partir da quantidade de células e de máquinas. Outro fator, mas secundário, que agrega na complexidade é a quantidade de tipos de peças, sendo que este aumenta relativamente quando também aumenta o número de máquinas.

Segundo Rodrigues (2005) a manufatura celular ganha espaço com alguns enfoques direcionando as pesquisas para inclusão de restrições e informações como:

- Número máximo de células;
- Número máximo de máquinas por células;
- Tempo de processamento das peças nas máquinas;
- Volume de produção;
- Roteiros alternativos de planos de processos.

Os métodos que conciliam as informações e restrições acima possuem alta complexidade e são poucos difundidos na literatura. Além disso, cada método trabalha com variáveis diferentes para minimizar o custo associado ao problema de formação de células. Assim, diferenças entre as soluções encontradas passam a existir de acordo com o enfoque adotado, deste modo, torna difícil a comparação e determinação do mais adequado.

Muitas destas abordagens descritas tem sido estudada e comparada, entretanto é de se questionar o tempo de convergência que as mesmas levam para obter o resultado e/ou a qualidade da solução encontrada. Apesar destas novas técnicas, para problemas de *layouts* industriais grandes, esses métodos não são satisfatórios, pois requerem um elevado tempo computacional para a obtenção de uma solução viável. Contudo, outras abordagens vem sendo foco de inúmeras pesquisas, estas são denominadas de técnicas híbridas e normalmente são compostas por meta-heurísticas, redes neurais e algoritmos genéticos com intuito de contornar estas dificuldades.

2.3 Arranjos de máquinas

A tecnologia de grupo aplicada no contexto de manufatura celular permite identificar as famílias de peças que poderão ser produzidas em células dedicadas. Para a formação de arranjos de máquinas, ou seja, identificação de famílias de peças, o problema de células de manufatura pode ser dividido em dois estágios de análise. O qual o primeiro consiste em agrupar as máquinas com base em informações disponíveis nas rotas das peças e em um segundo momento as peças serem alocadas nos grupos de máquinas.

No estudo realizado por Burbidge (1985), um dos pioneiros em pesquisa sobre células de manufaturas, é estabelecido a conceituação da representação da matriz peça-máquina,

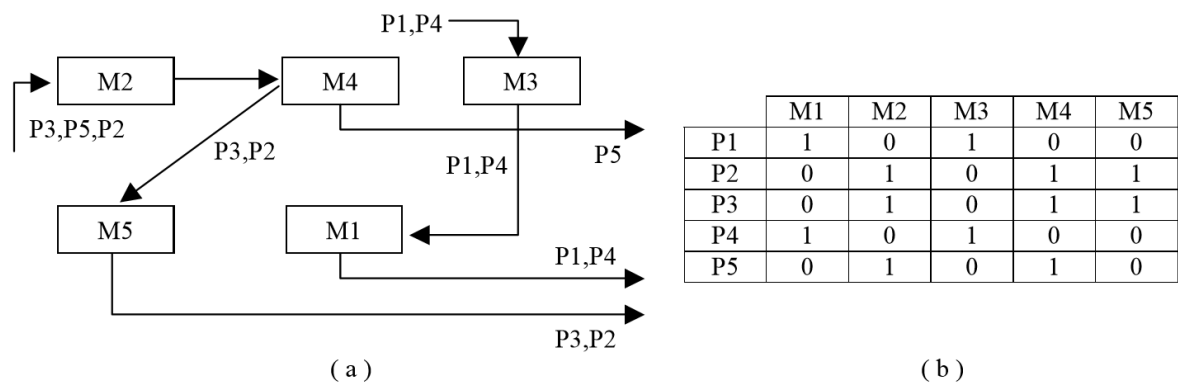
avaliando o fluxo e a sequência de produção. Tal conceito tem o nome de matriz de incidência/sequência de peças e máquinas.

2.3.1 Matriz de incidência

A matriz de incidência representa computacionalmente um grafo através de uma matriz bidimensional, onde uma das dimensões são vértices e a outra dimensão são arestas. Neste contexto, é possível demonstrar a rota das peças em suas respectivas máquinas.

Dado um grafo com os vértices simbolizados por máquinas e as arestas por peças, podemos representá-lo em uma matriz $n \times m$, como mostrado na Figura 6. Deste fato, guardam-se as informações sobre como os vértices se relacionam com cada aresta (isto é, informações sobre a incidência das peças nas máquinas).

Figura 6 – Arranjo de máquinas e sua representação por uma matriz de incidência



Fonte: (RODRIGUES, 2005)

Este é um possível arranjo das máquinas em um chão de fábrica para um sistema de fabricação. As informações referentes aos roteiros dos diferentes produtos são representadas por uma matriz onde nas colunas estão as máquinas e nas linhas os roteiros que as partes devem percorrer para finalização da produção. Para representação então, é utilizado o número 1 para indicar que uma peça passa por determinada máquina e 0 para indicar o não processamento da peça pela máquina.

2.3.2 Matriz de sequência

Podemos reparar que a literatura traz em diversos artigos e livros a matriz que relaciona peças e máquinas como uma matriz de incidência, como descrito na seção anterior. Assim sendo, em algumas situações nas quais o fluxo de produção da peça não interfira no processo como todo, este modelo torna-se o mais adequado. Não obstante, em sistemas de produções mais complexos onde a ordem pelas quais as peças passam nas máquinas são importantes, a utilização da matriz de sequência se faz necessária.

As matrizes de sequência têm como característica principal a utilização de números que representem a ordem que a peça passa pela respectiva máquina. Deste modo, se faz uso de números de 1 a N, onde N é o número total de máquinas por onde a peça passa. O roteiro

de máquinas é definido então em ordem crescente, isto é, a peça passa primeiro na máquina assinalada com o número 1 na matriz, em seguida para a próxima máquina assinalada pelo número 2 e assim por diante, até completar seu ciclo de produção demonstrado pela matriz.

A Figura 7 representa a comparação entre o modelo de matriz de incidência com uma matriz de sequência respectivamente. Notavelmente, na matriz de incidência a peça P1 deve passar pelas máquinas M1, M4 e M6, sem ao menos se importar diretamente com o fluxo de produção, isto é, a ordem na qual ela passa pelas máquinas, somente é relevante que ela passe por todas as assinaladas. Por outro lado, na matriz de sequência, a peça P1 possui um roteiro fixo que deve seguir primeiramente pela máquina M1, depois pela M4 e por último pela M6 seguindo esta exclusiva ordem. É evidente que a matriz de incidência possui maior flexibilidade, já que para a peça P1 são permitidos 6 possibilidades de roteiros diferentes, diferente da matriz de sequência que permite apenas um roteiro para a mesma.

Figura 7 – Comparação entre matriz de incidência e sequência

(a) Matriz de incidência								(b) Matriz de sequência							
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
P1	1	0	0	1	0	1	0	P1	1	0	0	2	0	3	0
P2	0	1	1	0	1	0	0	P2	0	2	3	0	1	0	0
P3	0	0	0	1	0	1	0	P3	0	0	0	2	0	1	0
P4	0	1	1	0	0	0	0	P4	0	1	2	0	0	0	0
P5	0	0	1	0	0	0	1	P5	0	0	2	0	0	0	1
P6	0	1	0	0	1	0	1	P6	0	2	0	0	3	0	1

Fonte: Elaborado pelo autor

Na utilização da matriz de sequência, há possibilidade de acontecer um movimento intercelular (ICM) extra, caso a máquina que pertença ao fluxo estiver em outra célula de manufatura e não for a última do processo, consistindo então em dois movimentos: um levando a peça para outra célula correspondente da máquina e outro para retorno da mesma para sua célula principal para continuação da produção. Entretanto, se a última máquina deste fluxo estiver em outra célula, há apenas um ICM. Como consequência disto, a formação de células de manufaturas utilizando matrizes de sequência se torna mais complexo, requerendo mais tempo computacional para processamento de uma solução viável.

2.4 Processo de agrupamento

O objetivo principal na concepção de um Sistema de Célula de Manufatura (CMS) é a criação de agrupamentos de máquinas, alocando famílias de peças visando a incorporação em sua função objetivo uma forma de minimizar o custo da movimentação de material intercelular e/ou intracelular. O processo de agrupamento consiste na reorganização da matriz que proporciona o relacionamento entre peças e máquinas do fluxo de produção. Segundo Rodrigues (2005), a identificação de grupos de máquina para formação de manufatura é realizada alternando/permutando as linhas e colunas de maneira a identificar blocos diagonais, ou seja, células. Dado uma matriz de incidência de processamento de peça-máquina, como mostrado

na Figura 8a, a finalidade então é tentar encontrar um rearranjo das linhas e colunas da matriz proporcionando uma forma diagonal de blocos, como mostrado na Figura 8b.

Figura 8 – Matriz incidência peça-máquina reordenada

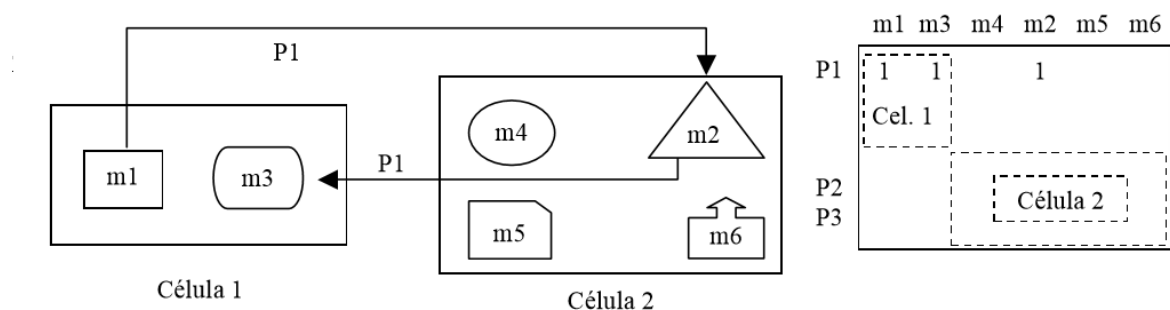
(a) Matriz incidência						(b) Matriz incidência reorganizada					
	M1	M2	M3	M4	M5		M4	M3	M1	M5	M2
P1	1	1	0	0	0	P3	1	1	0	0	0
P2	0	0	0	1	0	P7	1	1	0	0	0
P3	0	0	1	1	0	P2	1	0	0	0	0
P4	0	0	1	0	0	P4	0	1	0	0	0
P5	0	1	0	0	1	P1	0	0	1	0	1
P6	0	1	0	0	1	P8	0	0	1	1	0
P7	0	0	1	1	0	P6	0	0	0	1	1
P8	1	0	0	0	1	P5	0	0	0	1	1

Fonte: Adaptado de (CHAN; LAM; LEE, 1999)

O ideal na formação destes blocos diagonais é que nenhum 0 seja encontrado dentro do bloco e que nenhum 1 seja encontrado fora do bloco diagonal. Se for detectado algum 1 fora do mesmo haverá necessidade de formação de mais uma célula, qualificando-a como célula independente. Nesta perspectiva, este relacionamento de peça/máquina é denominado de peça gargalo e pode gerar movimento intercelular, ressaltando que toda peça gargalo gera no mínimo um ICM. De fato, o problema de peças gargalo deve ser minimizado, pois um ICM atrapalha o fluxo de produção e pode gerar gastos adicionais, sendo que, em alguns casos a melhor solução é a duplicação da máquina onde há a respectiva peça gargalo.

Para entender melhor, a Figura 9 ilustra claramente um movimento intercelular, pois nem todas as máquinas requeridas para processamento de uma peça estão disponíveis dentro de uma célula. A peça P1 precisa ser processada por duas diferentes células, uma vez que as máquinas m1 e m3 estão disponíveis na célula 1 e a máquina m2 na célula de número 2, tornando-a uma peça gargalo e gerando um movimento intercelular.

Figura 9 – Movimento intercelular

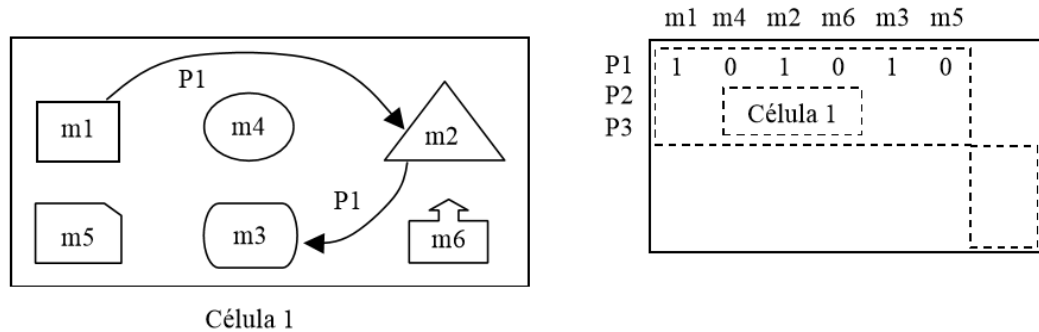


Fonte: (RODRIGUES, 2005)

Já um movimento intracelular, segundo Rodrigues (2005) se dá pelo total do número de operações com aumento do número de máquinas dentro da célula. A Figura 10 ilustra este acontecimento. Isto posto, o movimento intracelular é resultado da presença de zeros dentro

do bloco diagonal da matriz de incidência. Em resumo, este movimento só acontece quando as peças passam por máquinas sem ao menos haver necessidade do processamento.

Figura 10 – Movimento intracelular



Fonte: (RODRIGUES, 2005)

2.4.1 Avaliação do agrupamento

Após o processo de agrupamento, ou seja, rearranjar as linhas e colunas de forma que a matriz seja criada com famílias de peças e células de máquinas, se faz necessário avaliar o quão eficaz é o resultado. Para verificar a avaliação, muitas medições podem ser encontradas na literatura, em contrapartida duas medições chamam atenção e comumente podem ser encontradas com maior facilidade, podendo ser implementadas descomplicadamente, sendo elas: a eficiência do agrupamento (CHANDRASEKHARAN; RAJAGOPALAN, 1986) e eficácia do agrupamento (KUMAR; CHANDRASEKHARAN, 1990).

A eficiência do agrupamento n proposta por Chandrasekharan e Rajagopalan (1986) é definida na Equação 2.1:

$$n = qn_1 + (1 - q)n_2 \quad (2.1)$$

onde:

- n_1 é a proporção do número de 1's nos blocos diagonais para o número total de elementos nos blocos diagonais da matriz final;
- n_2 é o número de 0's nos blocos fora da diagonal para o número total de elementos nos blocos fora da diagonal da matriz final;
- q é um fator de peso.

Os 1's fora dos blocos diagonais são chamados de "elementos excepcionais", enquanto os 0's dentro dos blocos diagonais são chamados de "elementos vazios".

Embora a eficiência de agrupamento tenha sido amplamente utilizada, argumentou-se por sua baixa capacidade de discriminação em alguns casos onde se era afetado pelo tamanho da matriz. Para superar este problema, Kumar e Chandrasekharan (1990) propuseram

outra medida, a eficácia do agrupamento. Esta função permite obter um valor quantitativo que representa a qualidade do agrupamento formado, levando em consideração a quantidade de movimentos intercelulares e intracelulares. Através disto, pode ser definida pela Equação 2.2:

$$\mathcal{T} = \frac{e - e_0}{e + e_v} \quad (2.2)$$

onde:

- e representa a quantidade de 1's em toda a matriz final;
- e_0 representa a quantidade de 1's que estão fora dos blocos diagonais, ou seja os elementos excepcionais. Cada um desses equivale a uma peça gargalo;
- e_v representa a quantidade de 0's dentro dos blocos diagonais, ou seja, os elementos vazios. Cada um desses é uma máquina dentro da célula que não processa todas as peças da família de peças e portanto pode não estar sendo bem aproveitada, resultando em um movimento intracelular.

Quando a eficácia do agrupamento $\mathcal{T}$ se aproxima de 1, melhor é o resultado da matriz final. Se algum indivíduo apresentar eficácia equivalente a 1, o agrupamento foi excelente, não ocasionando nenhum movimento intercelular e intracelular. A Figura 11 exemplifica o cálculo de $\mathcal{T}$ de uma matriz final reorganizada em 3 células, onde as linhas representam as máquinas e as colunas representam as peças.

Figura 11 – Cálculo da eficácia do agrupamento

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
M1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
M2	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0
M3	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0
M4	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0
M5	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
M6	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
M7	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1
M8	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1

$$e = 29, e_0 = 4, e_v = 2$$

$$\mathcal{T} = \frac{29 - 4}{29 + 2} = 0,806$$

Fonte: Elaborado pelo autor

Ao analisar a Equação 2.2, nota-se que a quantidade de 1's fora das células tem mais peso do que a quantidade de 0's dentro dos blocos diagonais. Isso acontece para priorizar a redução das peças gargalos, evitando movimentos intercelulares.

Como eficácia do agrupamento tem sido amplamente aceita em diversos estudos recentes, é possível aplicá-la nos algoritmos meta-heurísticos e outros nas quais permitam a inserção de uma função objetivo que otimize o problema a ser trabalhado. Por conseguinte, para o problema de formação de células de manufatura é viável a utilização desta avaliação de desempenho do agrupamento na implementação do algoritmo *simulated annealing*.

2.5 Simulated annealing

Métodos meta-heurísticos tem sido foco de estudo durante muito tempo por sua capacidade computacional e eficiência em resolver problemas de otimização combinatória. O tema otimização combinatória consiste em um conjunto de problemas que podem ser resolvidos através de técnicas que encontrem valores mínimos ou máximos de uma função que normalmente possui muitas variáveis independentes dentro de um conjunto viável. Esta função geralmente é chamada de função de custo ou função objetivo e representa a medida quantitativa da qualidade de um sistema complexo, na qual depende impreterivelmente da configuração detalhada das muitas partes contidas neste sistema.

Contudo, em problemas de engenharia, logística, administração, transporte e outros, quando se consegue construir modelos matemáticos bastantes representativos destes sistemas dinâmicos, torna-se possível aplicar algumas técnicas matemáticas de otimização. Logo, elas visam a uma solução viável para o problema, de acordo os critérios de desempenho previamente definidos, ou seja, segundo suas restrições.

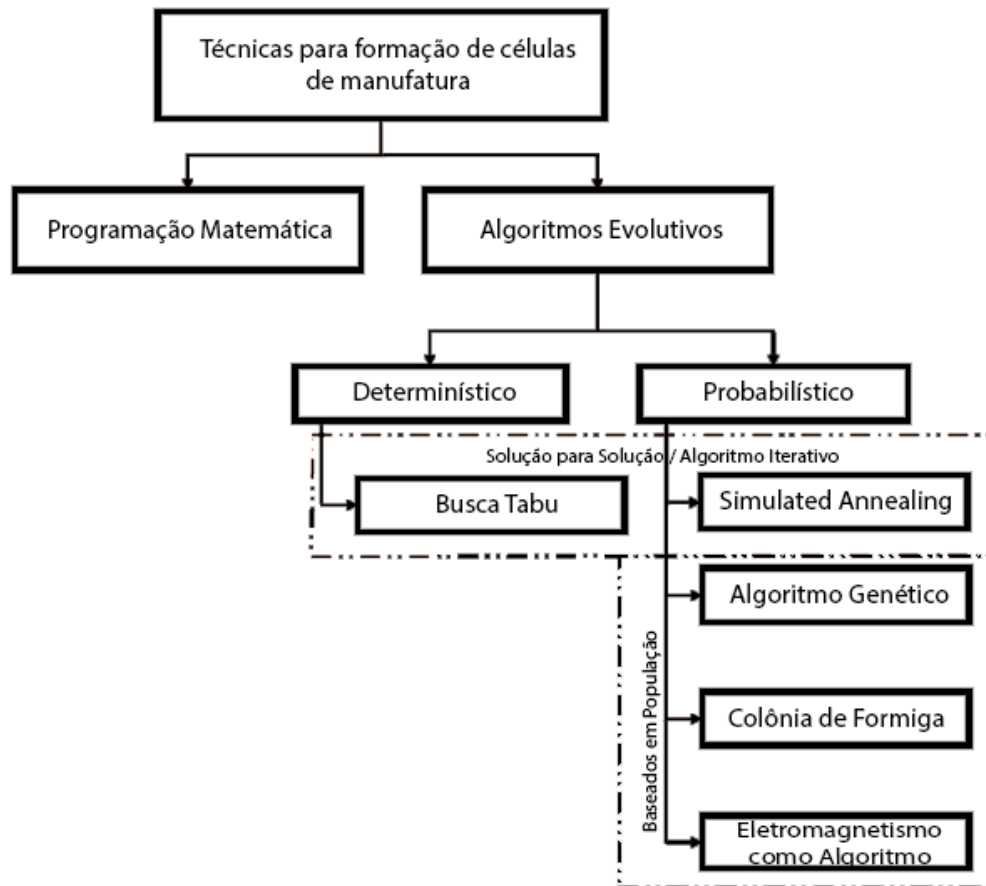
Obter uma solução ideal para alguns problemas de otimização é uma tarefa muito difícil, muitas vezes praticamente impossível, devido à obscuridade de elaborar modelos matemáticos eficientes e implementá-los utilizando algum algoritmo capaz de encontrar uma solução viável em um tempo computacional razoável. Isso ocorre porque quando um problema é extremamente grande, é necessário pesquisar através de inúmeras soluções vizinhas possíveis para obtenção de uma solução melhor. Deste fato, é comum a utilização da computação evolutiva, que em geral representa uma série de técnicas que envolvem problemas de otimização combinatória com caráter meta-heurístico. Portanto, como outras técnicas de otimização, depende do requisito básico, que é a função objetivo.

De acordo com Chen, Cotruvo e Baek (1995), o *simulated annealing* (SA) ou recozimento simulado, é um método meta-heurística, fazendo parte da classe dos algoritmos evolutivos. Como ele, existem várias outras técnicas que podem ser utilizadas, tais como algoritmos genéticos, busca tabu e algoritmo de colônia de formiga. O *simulated annealing* surgiu no contexto da mecânica estatística, proposto por Metropolis et al. (1953) e aplicado inicialmente por Kirkpatrick, Gelatt e Vecchi (1983).

Kirkpatrick, Gelatt e Vecchi (1983) em sua pesquisa apresentaram um algoritmo capaz de resolver problemas que são considerados difíceis para resolução através de métodos

comuns na otimização combinatória. A partir daí o algoritmo foi aplicado largamente em várias áreas, incluindo o problema de formação de células de manufaturas. A Figura 12 mostra alguns dos algoritmos e suas classificação para resolver este tipo de problema.

Figura 12 – Algoritmos para formação de células de manufatura



Fonte: Adaptado de (HODIYA, 2015)

Neste âmbito, o termo *annealing* representa o processo utilizado para fundir metal, onde este é aquecido a uma temperatura elevada e em seguida é resfriado lentamente, de modo que o produto final seja uma massa homogênea. Este resfriamento lento conduz à produção de metais mais estáveis, estruturalmente fortes e de menor energia interna. Durante o recozimento o material passa por vários estado possíveis. Analogamente, os estados possíveis de um metal correspondem as soluções do espaço de busca, a energia em cada estado corresponde ao valor da função objetivo e a energia mínima ou máxima corresponde ao valor de uma solução ótima local, que possivelmente pode ser uma solução ótima global.

À vista disso, o SA tenta resolver problemas de otimização do tipo minimização $\min_x f(x)$ ou de maximização $\max_x f(x)$, $x \in S$, onde S é o conjunto de soluções finitas. Neste cenário, o processo de otimização é realizado por níveis de temperatura, caracterizados pelo processo de resfriamento. Em cada nível, vários pontos na vizinhança são gerados e aplicados ao cálculo correspondente da função objetivo. Se a solução em algum ponto da vizinhança for melhor que a solução atual, então a solução gerada substitui a atual, caso contrário esta é aceita

ou rejeitada de acordo com uma probabilidade. Esta probabilidade de aceitação decresce de acordo com o nível do processo, ou equivalente, de acordo com a temperatura, podendo ser calculada através da Fórmula 2.3 abaixo:

$$P = e^{-\frac{\Delta}{T}} \quad (2.3)$$

O valor da temperatura representado por T_k , como visto, decresce de acordo com cada iteração k , ou seja, de acordo com cada ciclo do algoritmo, o que diminui a probabilidade de aceitar piores soluções comparadas com a solução atual. O decaimento da temperatura é expressado pela constante α , portanto a nova temperatura T_{k+1} é apresentada pela Fórmula 2.4, onde T_{k+1} representa a temperatura na próxima iteração, ou seja $k + 1$.

$$T_{k+1} = \alpha T_k \quad (2.4)$$

A verificação da probabilidade de aceitação é realizada primeiramente selecionando um número aleatório entre 0 a 1. Se o valor for menor ou igual ao valor de probabilidade, a nova configuração é aceita, de outra forma, é rejeitada. Ao aceitar piores soluções, a SA pode evitar ficar preso em um ponto de ótimo local. O SA repete esse processo L vezes a cada temperatura para alcançar o equilíbrio térmico, onde L é um parâmetro de controle, geralmente chamado de comprimento da cadeia de Markov (*Markov chain length*). Obviamente, durante o algoritmo, a melhor solução encontrada S^* é sempre mantida.

Em contrapartida, segundo Xambre e Vilarinho (2003) a característica mais importante desse algoritmo é a possibilidade de aceitar as piores soluções, o que pode permitir que ele escape dos mínimos locais. No entanto, o desempenho do algoritmo depende da definição de vários parâmetros de controle:

1. A temperatura inicial (T_0) de ser suficientemente grande ao ponto que na primeira iteração a probabilidade de aceitação das soluções piores deve ser, pelo menos, de 80% (KIRKPATRICK; GELATT; VECCHI, 1983).
2. A mais comumente função da redução de temperatura (taxa de resfriamento) utilizada varia entre 0,7 à 0,95.
3. O tamanho do nível de cada temperatura (L), ou comprimento da cadeia de Markov, determina o número de repetições permitidas por cada temperatura T .
4. O critério de parada deve ser definido quando o sistema atinge o nível de energia desejável.

Ainda consoante com Xambre e Vilarinho (2003), os critérios de parada na maioria dos casos se baseiam em alguns dos seguintes:

- O total de número de soluções geradas;

- A temperatura a que o nível de energia desejado é alcançado (temperatura de congelamento);
- A relação de aceitação (relação entre o número de soluções aceitas e o número de soluções geradas).

Naturalmente, cada um desses parâmetros de controle deve ser refinado especificamente de acordo com o problema. Três outras questões importantes precisam ser definidas ao adaptar o algoritmo geral para um problema específico, por conseguinte podem ser descritas como: a função objetivo, os procedimentos para a geração da solução inicial (pode ser usado algum algoritmo de identificação de *cluster*) e as técnicas de movimentações para geração das soluções vizinhas.

2.5.1 O algoritmo

O algoritmo começa com a escolha adequada de uma solução inicial, a partir daí sendo atribuída como a melhor solução e como a solução atual, após é prosseguido com o procedimento de geração das soluções vizinhas. Cada solução vizinha possui pequenas mudanças comumente geradas de acordo com os critérios do problema específico, podendo ser formada através de movimentos randômicos, como pode ser visto na Figura 13.

Figura 13 – Solução vizinha com uma pequena alteração



Fonte: Elaborado pelo autor

Deste modo, o resultado da função objetivo é alterado, sendo escolhido a melhor solução. Para problemas de minimização a melhor solução vizinha ou o novo estado gerado deve ser o menor segundo a avaliação da função objetivo, todavia, para problemas de maximização o valor maior deve ser selecionado. Considerando um problema de maximização para melhor exemplificação, se o novo estado possuir energia maior que o estado atual, esse novo estado passa a ser o estado atual, caso possua uma energia menor, a probabilidade de se mudar do estado corrente para o novo é encontrado pela fórmula 2.3, onde Δ é a variação da energia do novo estado com a energia do estado atual, sendo aceito uma solução pior para escapar de ótimos locais. Quanto menor a temperatura, menor a probabilidade de aceitação das soluções piores. Contudo, este procedimento é repetido até atingir o equilíbrio térmico. Ao atingir este equilíbrio, a temperatura sofre um decaimento expressado pela constante α . O final do

processo se dá quando a temperatura se aproxima de zero e nenhuma solução pior é mais aceita, evidenciando o possível encontro de um ótimo global.

O algoritmo a seguir apresenta os passos deste procedimento:

Algoritmo 1 Pseudo-código do simulated annealing

```

1: Selecione uma temperatura inicial  $T_0 > 0$ ;
2: Selecione uma solução inicial  $S_0$ , incie a solução atual  $S$  e melhor solução  $S^*$  igual a  $S_0$ ;
3: Inicie as constantes  $L, \alpha$ ;
4: enquanto critério de parada for falso faça
5:    $k \leftarrow 1$ ;
6:   enquanto ( $k < L$ ) faça ▷ Número de repetições permitidas a cada temperatura
7:     Gere uma solução  $S_n$  na vizinhandando de  $S$ ;
8:     Calcule  $\Delta = f(S_n) - f(S)$ ;
9:     se ( $\Delta \leq 0$ ) então
10:       $S \leftarrow S_n$ ;
11:      se ( $f(S_n) < f(S^*)$ ) então
12:         $S^* \leftarrow S_n$ ;
13:      fim-se;
14:    senão
15:       $x \leftarrow \text{random} \in [0, 1]$ ;
16:      se ( $x < e^{-\Delta/T}$ ) então
17:         $S = S_n$ ;
18:      fim-se;
19:    fim-se;
20:     $k \leftarrow k + 1$ 
21:  fim-enquanto;
22:   $T \leftarrow \alpha * T$  ▷ Redução da temperatura
23: fim-enquanto;
24: retorne  $S^*$ ; ▷ Melhor solução encontrada

```

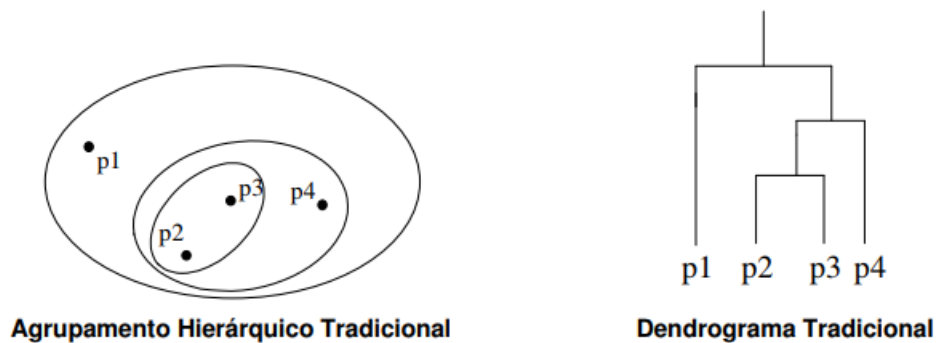
2.6 Agrupamento hierárquico (identificação de *cluster*)

A identificação de *clusters* (agrupamentos) é uma técnica primitiva, no sentido de que nenhuma suposição é feita quanto ao número de grupos ou estrutura de agrupamento. O agrupamento hierárquico é feito com base na similaridade ou distância, podendo ser usado na geração de uma solução inicial para o algoritmo *simulated annealing*. O método de agrupamento hierárquico tem o objetivo de criar uma decomposição hierárquica dos objetos/componentes a partir do conhecimento da distância entre eles. A representação gráfica dessa hierarquia é realizada por uma árvore hierárquica, também chamada de dendrograma, podendo ser visto na Figura 14, na qual apresenta a relação do agrupamento entre os objetos.

Um dendrograma é um gráfico de árvore cujos vértices de terminal ("folhas") correspondem aos objetos classificados. Resulta de uma análise estatística de determinados dados, em que se emprega um método quantitativo que ilustra o arranjo de agrupamentos derivados da aplicação de um algoritmo de agrupamento.

O processo de agrupamento hierárquico pode seguir duas estratégias básicas, aglo-

Figura 14 – Agrupamento hierárquico



Fonte: Elaborado pelo autor

merativo (*bottom-up*) e divisivo (*top-down*), ambos processados de maneira iterativa. Os algoritmos aglomerativos consideram cada objeto como um *cluster* separado no início, e esses são fundidos em *clusters* maiores durante a análise, com base em medidas entre grupos ou outras (por exemplo, homogeneidade). No último passo, todos os objetos são amalgamados em um único agrupamento trivial. A estratégia dos métodos divisivos prossegue da maneira oposta: o processo de *cluster* começa com todos os objetos em um único *cluster* maior, que é dividido no primeiro passo em duas partes. Cada um deles é ainda subdividido no próximo passo, e as subdivisões podem ser continuadas de maneira similar até que cada *cluster* tenha um único objeto (embora as divisões possam ser presas anteriormente a uma regra de parada) (MANNING; RAGHAVAN; SCHUTZE, 2008, capítulo 17).

Para este estudo, irão ser retratados alguns dos métodos aglomerativos mais utilizados. Os métodos divisivos não se aplicam neste problema, devido ao fato da necessidade de junção dos objetos em um ou mais agrupamentos. Portanto, os métodos descritos vão de encontro com as abordagens para a geração de uma solução inicial para a implementação da meta-heurística de *simulated annealing* com foco no problema de formação de células de manufatura.

2.6.1 Métodos aglomerativos

De acordo com as diferentes medidas que podem ser adotadas no métodos aglomerativos para a formação resultante de um único *cluster*, podem-se realizar subdivisões entre estes métodos. Neste contexto, alguns métodos hierárquicos comumente utilizados podem ser classificados como métodos gráficos (método de ligação única, ligação completa e ligação média) e métodos geométricos (método de Ward e método centroide).

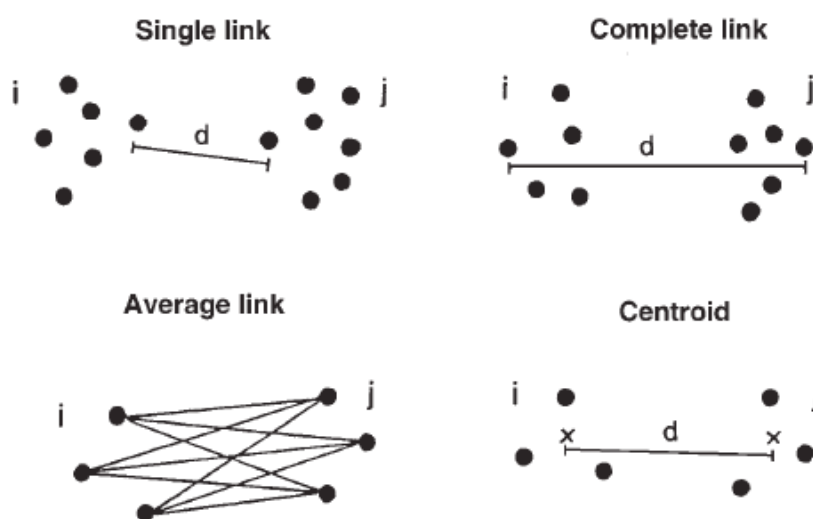
Consoante com Gan, Ma e Wu (2007, capítulo 7), resumidamente os métodos aglomerativos mais utilizados podem ser descritos como:

- Ligação única (*single linkage*): define-se a distância entre dois *clusters* como sendo a distância mínima entre um objeto único no primeiro *cluster* e para qualquer objeto único no segundo *cluster*. Com base nesta definição de distância, em cada estágio do processo

combina-se os dois *clusters* que possuem a menor distância de ligação única, resultando em um maior.

- Ligação completa (*complete linkage*): define-se a distância entre dois *clusters* como sendo a distância máxima entre qualquer objeto único no primeiro *cluster* e qualquer objeto único no segundo *cluster*. Com base nesta definição de distância, em cada etapa do processo combina-se os dois *clusters* que possuem a menor distância de ligação completa.
- Ligação média (*average linkage*): inicialmente, funciona da mesma maneira que os métodos anteriores, ou seja, parte do princípio em agrupar os pontos (objetos) mais semelhantes. Define-se a distância entre dois *clusters* como sendo a distância média entre os objetos no primeiro *cluster* e os objetos no segundo *cluster*. Com base nesta definição de distância, em cada etapa do processo combina-se os dois *clusters* que possuem a menor distância de ligação média.
- Método centroide (*centroid method*): no método centroide, a distância entre dois *clusters* é definida como a distância entre os dois vetores médios dos respectivos *clusters*. Em cada etapa do processo, combina-se os dois *clusters* que têm a menor distância de centro.
- Método de Ward (*Ward's method*): Este método não define diretamente uma medida de distância entre dois objetos ou clusters. Deste modo, em cada estágio, esses dois *clusters* se juntam, de forma a minimizar a perda de informações associadas a cada fusão. Normalmente, a perda de informação é quantificada em termos de um critério de soma de erros de quadrados, então o método de Ward é frequentemente referido como o método da "variação mínima".

Figura 15 – Gráfico representativo dos métodos aglomerativos



Fonte: Adaptado de (PODANI, 2000, capítulo 5, p. 142)

Para facilitar o entendimento, no Quadro 1, são fornecidas as fórmulas matemáticas das distâncias entre dois *clusters*, onde mostra a medição associada aos *clusters* 1 e 2, sendo que X_i e Y_j representam os objetos dos respectivos *clusters*.

Quadro 1 – Fórmulas matemáticas da distância dos objetos entre dois *clusters*

Ligação Única	$d_{12} = \min_{i,j} d(X_i, Y_j)$	É a distância entre os objetos mais próximos de dois clusters.
Ligação Completa	$d_{12} = \max_{i,j} d(X_i, Y_j)$	É a distância entre os objetos mais afastados de dois clusters.
Ligação Média	$d_{12} = \frac{1}{kl} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^l d(X_i, Y_j)$	Envolve a análise das distâncias entre todos os objetos e as médias de todas distâncias.
Método Centroide	$d_{12} = d(\bar{x}, \bar{y})$	Envolve encontrar a localização média do vetor para cada um dos clusters e tomar a distância entre os dois centroides.

Fonte: Elaborado pelo autor

3 Procedimentos metodológicos

Este trabalho se fundamenta no estudo da filosofia de tecnologia de grupos com ênfase na técnica de formação de células de manufatura. A abordagem adotada para resolução dos problemas está alicerçada pelo uso da matriz de incidência, abrangendo a o uso da meta-heurística *simulated annealing* para gerar uma solução eficaz, levando em conta o processo de geração das soluções vizinhas, atribuição de máquinas, atribuição de peças e da geração da solução inicial fornecida através de um método de agrupamento aglomerativo de ligação única.

Os procedimentos metodológicos podem ser organizados na seguinte sequência:

1. Estudo sobre conceitos de tecnologia de grupos, com foco em processos de manufatura celular, implementada através de matriz de incidência compostas por máquinas e peças;
2. Estudo das abordagens de resolução do problema de manufatura celular, reunindo vários trabalhos publicados relacionados ao problema;
3. Estudo sobre a abordagem *simulated annealing*.
4. Adaptação do problema de manufatura celular para a implementação de um algoritmo de acordo com as restrições a serem adotadas;
5. Projeto e implementação de uma solução inicial viável para o uso da mesma como entrada para o *simulated annealing*;
6. Implementar o algoritmo proposto pela meta-heurística *simulated annealing* correlacionado com o processo de atribuição de máquina e peças nos quais caracterizam o processo de formação de células de manufatura.
7. Comparação dos resultados obtidos com os diferentes métodos contidos na literatura, para validação do algoritmo *simulated annealing* em um problema de otimização combinatoria, explicitando de acordo com as restrições adotadas.

3.1 Revisão da literatura

A revisão de literatura adotada neste trabalho consiste em um primeiro momento na realização do levantamento bibliográfico dos conceitos abordados sobre tecnologia de grupo e manufatura celular, visando técnicas que propõe soluções para otimizar a função objetivo que compõe a organização de máquinas e peças em um *layout* industrial de acordo com suas devidas restrições.

A literatura base deste trabalho foi proposta por Wu, Chang e Chung (2008), que consiste no uso da meta-heurística *simulated annealing* para o projeto de manufatura celular. Apresentando em seu artigo uma maneira de utilizar técnicas para realizar a separação de

peças em famílias e agrupar as máquinas em células. Neste trabalho portanto, somente irá ser aplicado o *simulated annealing* para resolução do problema descrito através da matriz de incidência.

Contudo, para a adaptação do algoritmo *simulated annealing* vários trabalhos sobre geração de uma solução inicial viável tornaram de extrema importância, apesar da escolha pelo método aglomerativo de ligação única, é possível aplicar outro método de agrupamento aglomerativo para gerar uma solução inicial factível.

3.2 Adaptação do problema e restrições

Como a proposta de implementação de uma meta-heurística é utilizada para a solução deste problema, pode-se nesta abordagem explorar alguns aspectos contidos nesta estrutura. De tal maneira é possível que seja construído uma solução levando em consideração algumas restrições para otimização da estrutura de manufatura celular.

As restrições principais de projetos tratadas são: uma máquina somente pode estar em uma única célula de manufatura, número máximo de células de manufatura.

Para a adaptação, vários contadores e critérios de parada foram adotados. Deste modo, algoritmo proposto tem início com uma solução inicial e uma série de movimentos que garantem a geração das soluções vizinhas. O processo principal caminha para uma solução ótima até que os critérios de parada sejam atendidos ou até que chegue a uma temperatura de congelamento característica desta meta-heurística. Para evitar ficar parado em uma solução de ótimo local o algoritmo movimenta lentamente, respeitando a função objetivo para um valor que agregue na solução e com uma certa probabilidade para aceitação de soluções piores. Torna-se evidente que o resultado do algoritmo varia de acordo com as restrições propostas. Deste modo, se o número de células a serem formadas for definido inicialmente, isto afetará as soluções obtidas.

3.3 Comparação e avaliação dos resultados

O desempenho do *simulated annealing* para formação de células de manufatura será testado a partir de diversos problemas reais contidos na literatura, juntamente com isso, será necessário realizar uma comparação dos resultados de acordo com algumas das implementações distintas que podem ser encontradas na literatura, levando em conta os movimentos intercelulares e as peças gargalos. Para cada um desses problemas serão apresentados a solução da literatura e a solução através do algoritmo proposto. Os resultados serão mostrados em forma de matriz para melhor visualização. Contudo, esta comparação é difícil de ser realizada, posto que os métodos abordados tratam e englobam restrições de sistema de formas distintas.

4 Desenvolvimento e implementação

Este capítulo expõe os detalhes do projeto e da implementação do *simulated annealing* para otimização combinatória, fazendo com que ela seja modelada de tal forma a resolver o problema de manufatura celular a fim de encontrar uma solução viável. Deste modo, o capítulo explica todos os detalhes técnicos e formulações para matriz de incidência. Contudo, também salienta o processo do uso da função objetivo como sendo a eficácia do agrupamento a ser maximizada, além de deixar claro quais as restrições irão compor o modelo.

4.1 Formulação do sistema de manufatura celular

Sistemas de manufatura celulares se destinam a processar peças similares dentro da mesma célula de produção, a fim de minimizar o movimento de peças de uma célula para outra durante o processo de produção. Considerando a matriz de incidência contendo um conjunto de máquinas disponíveis no chão de produção com um conjunto de peças a serem fabricadas, o objetivo por conseguinte, é agrupar as máquinas com similaridade em células e peças similares em famílias de peças. A fim de que os movimentos intercelulares e intracelulares sejam reduzidos, aumentando por conseguinte a eficácia do agrupamento.

Vistos os conceitos sobre o *simulated annealing* apresentados na sessão 2.5, se faz necessário definir cada um dos parâmetros de controle e algumas questões importantes para adaptar o algoritmo geral para o problema de formação de células de manufatura. Primeiramente é imprescindível escolher a técnica para gerar a solução inicial, após isso a função objetivo e por fim as movimentações para geração das soluções vizinhas. Os próximos tópicos irão discorrer detalhadamente sobre os respectivos assuntos.

4.1.1 Solução Inicial

Como o problema de células de manufatura considera o agrupamento de peças e máquinas, uma abordagem de solução inicial intuitiva é decompor todo o problema em dois sub-problemas que lidam com atribuição de peças e outro com a atribuição de máquinas, respectivamente. Quando a atribuição de peças é determinada em primeiro lugar, seguida de uma adequada atribuição de máquinas, a conclusão da geração de uma solução inicial é, portanto, completada (WU; CHANG; CHUNG, 2008).

4.1.1.1 Atribuição em família de peças

Para realizar a atribuição de peças se faz necessário a utilização de alguma técnica que permita esta formação, deste modo, neste estudo o coeficiente de similaridade baseado nesta identificação será utilizado.

De acordo com Dimopoulos e Mort (2000) encontrar o ótimo agrupamento de máquinas e peças não é uma tarefa fácil, uma vez que é possível obter um elevado número de

combinações, mesmo para pequenas instâncias. O uso de coeficientes de similaridade enfoca a busca de uma solução ótima para regiões do espaço de busca onde se tem mais atração, especificadamente o coeficiente de Jaccard.

O coeficiente de Jaccard, inicialmente foi utilizado por McAuley (1972), conforme a definição, representa o grau de igualdade entre duas máquinas em termos de peças processadas ou de peças em termos de máquinas pertencentes a incidência na fabricação, denotado por S_{ij} . Como o objetivo é realizar a atribuição de peças o termo S_{ij} será exposto como a similaridade entre a peça i com a peça j .

Um grande número de coeficientes de similaridade foram propostos na literatura. Alguns deles foram utilizados no problema de formação de células de manufatura, como o coeficiente de Jaccard e o coeficiente de similaridade de correspondência relativa proposto por Islam e Sarker (2000). Os métodos que se baseiam na formação de células de manufatura dependem exclusivamente na utilização das medidas de similaridade em conjunto com algoritmos de agrupamentos aglomerativos.

Neste âmbito, este trabalho utiliza o coeficiente de Jaccard. Para melhor explicação é utilizado uma tabela de contingência (Tabela 1) para descrever a formulação do coeficiente.

Tabela 1 – Tabela de contingência 2x2

Peça i	Peça j	
	1	0
1	a	b
0	c	

Fonte: Elaborado pelo autor

Consoante com a tabela de contingência, as constantes descritas podem ser definidas como:

- a representa o número de combinações de 1-1 da peça i com a peça j , ou seja, o número de máquinas que processam ambas as peças;
- b representa o número de combinações de 1-0, ou seja, o número de máquinas que processam a peça i mas não a peça j ;
- c as combinações de 0-1, ou seja, o número de máquinas que não processam a peça i mas processam a peça j .

Isto posto, o coeficiente de similaridade é definido de acordo com a Equação 4.1:

$$S_{ij} = \frac{a_{ij}}{a_{ij} + b_{ij} + c_{ij}} \quad (4.1)$$

Deste modo, o coeficiente de dissimilaridade denotado por D_{ij} pode ser expresso na forma de complemento de S_{ij} , expressado na Equação 4.2:

$$D_{ij} = 1 - S_{ij} \quad (4.2)$$

Após o processamento dos coeficientes de similaridades, a organização pode ser expressa em uma matriz de similaridade, representando cada elemento como a semelhança entre duas peças. Posteriormente, organizando a similaridade para cada par de peças, pode-se gerar a atribuição inicial de peças usando o algoritmo de agrupamento aglomerativo de ligação única (*single linkage*) para processar os valores contidos na matriz. O resultado é expresso em diagrama de árvore, ou dendrograma, que manifesta a hierarquia de semelhanças. Melhor exemplificando, considere a matriz de incidência exposta na Tabela 2a e sua matriz resultante dos coeficientes de similaridade (Tabela 2b), onde as linhas são as máquinas e as colunas as peças.

Tabela 2 – Um exemplo de cálculo dos coeficientes de similaridade

(a) Matriz de incidência máquinas/peças

	P1	P2	P3	P4	P5
M1	1	0	0	1	0
M2	0	1	1	0	1
M3	1	0	0	0	0
M4	0	1	1	0	0
M5	0	0	0	1	0

(b) Matriz de similaridade

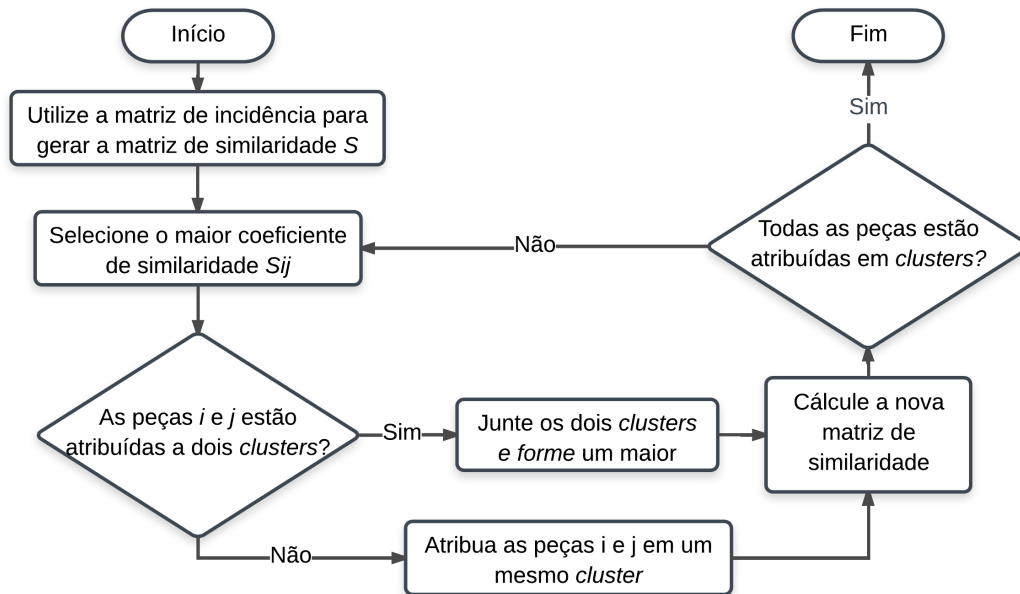
	P1	P2	P3	P4	P5
P1	-	0	0	0,33	0
P2		-	1	0	0,5
P3			-	0	0,5
P4				-	0
P5					-

Fonte: (WU; CHANG; CHUNG, 2008)

Como já descrito, após o cálculo da matriz de similaridade entre as partes, torna-se possível gerar a atribuição inicial das partes seguindo o método aglomerativo de ligação única. Este método consiste em agrupar as peças em *clusters* de acordo com a distância (Sessão 2.6.1), que para o problema de formação de células de manufatura é definido como a similaridade entre as mesmas. A distância entre dois *clusters* é definida como a distância entre os objetos mais próximos destes *clusters*, de acordo com cada iteração o método tende a convergir para um *cluster* maior, na qual conterá todas as partes. Com base nesta definição de distância, em cada estágio do processo combina-se os dois *clusters* que possuem a menor distância de ligação única. O método enfatiza fortemente a separação em *clusters*, portanto um pequeno *cluster* inicial pode facilmente atrair os outros objetos, um a um, nas etapas de agrupamento, levando ao chamado efeito de cadeia.

Visto este objetivo, o método de ligação única pode ser simplesmente implementado seguindo alguns passos básicos. A Figura 16 ilustra em um fluxograma o algoritmo, o resultado é a formação de um dendrograma que permitirá a formação das células de manufaturas iniciais.

Figura 16 – Fluxograma do método ligação única para matriz de similaridade



Fonte: Adaptado de (MURUGAN; SELLADURAI, 2011)

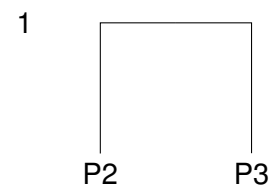
Em conformidade com o passos descritos através do fluxograma exposto na Figura 16, a separação em *clusters* da matriz de similaridade exposta na Tabela 2b é expressada na Figura 17:

Figura 17 – Exemplo de formação *cluster* inicial

(a) Maior similaridade, cria-se um *cluster* com P2 e P3

	P1	P2	P3	P4	P5
P1	-	0	0	0,33	0
P2		-	1	0	0,5
P3			-	0	0,5
P4				-	0
P5					-

(b) *Cluster* inicial



Fonte: Elaborado pelo autor

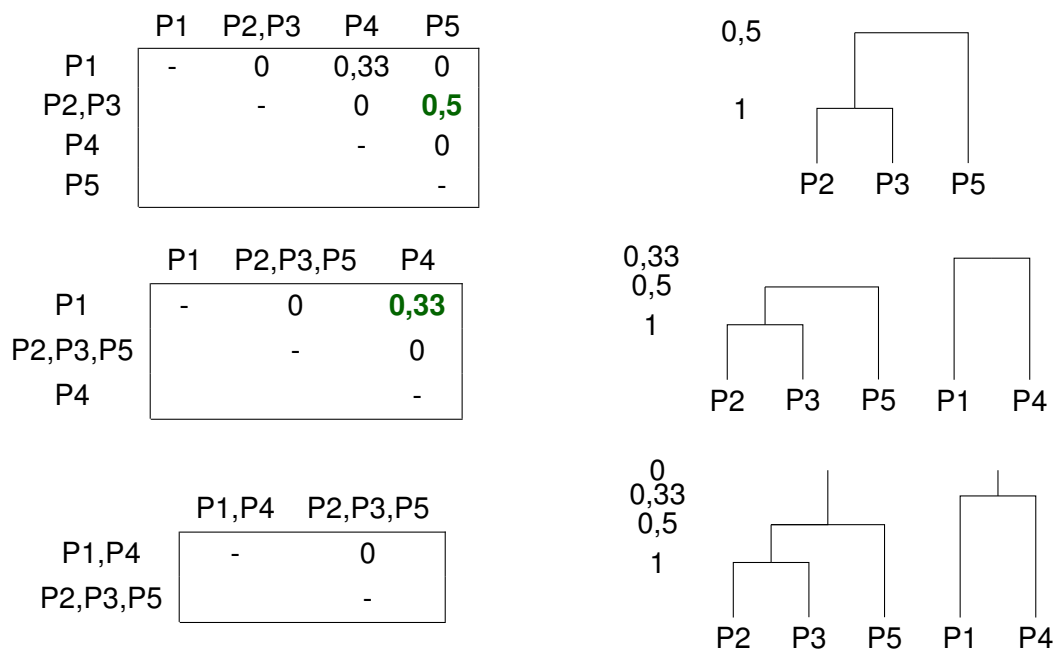
O *cluster* inicial é formado através da junção das peças que possuem maior similaridade, isso posto, o cálculo da nova matriz de similaridade deve ser feito. Para realizar a atualização basta obter a distância máxima composta por $\max[\text{similaridade}(P2, P3), k]$, sendo k pertencente ao conjunto de todas as peças disponíveis no sistema de fabricação. Como por exemplo para $k = P5$, tem-se:

$$\max[\text{similaridade}(P2, P3), P5]$$

$$\max[\text{similaridade}(P2, P5), (P3, P5)] = \max[(0, 5; 0, 5)] = 0, 5$$

Com a atualização da matriz de similaridade o algoritmo prossegue até que seja agrupado todas as peças, como a Figura 18 ilustra.

Figura 18 – Exemplo de agrupamento gerado pela matriz de similaridade



Fonte: Elaborado pelo autor

O maior coeficiente na matriz da Figura 2b é 1, indicando que as peças P2 e P3 devem ser atribuídas à mesma célula, ou seja a célula 1. Procedendo com o segundo maior coeficiente na matriz, com valor de 0,5, aparecendo em pares (P2, P5) e (P3, P5). A peça P5 é assim atribuída à célula 1 com as demais peças P2 e P3. O coeficiente restante é de 0,33 no par (P1, P4). Uma vez que estas duas partes não têm qualquer relação com nenhuma peça na célula 1, elas devem ser atribuídas a uma nova célula, como mostrado no agrupamento final gerado pelo algoritmo de ligação única, ilustrado pela Figura 18. Pode acontecer de três ou mais células serem formadas inicialmente, isso varia de acordo com o arranjo de peças e suas similaridades, devendo respeitar a restrição de quantidade de células máximas.

Portanto, o resultado final da atribuição de peças é mostrado na Tabela 3:

Tabela 3 – Atribuição de peças

	Célula 1			Célula 2	
	P2	P3	P5	P1	P4
M1	0	0	0	1	1
M2	1	1	1	0	0
M3	0	0	0	1	0
M4	1	1	0	0	0
M5	0	0	0	0	1

Fonte: Elaborado pelo autor

4.1.1.2 Atribuição de máquinas

Segundo os critérios estabelecidos pelo cálculo da eficácia de agrupamento (Equação 2.2), para realizar a atribuição de máquinas, preteritamente deve-se levar em conta o número de elementos vazios (0's dentro das célula a ser verificado) e a quantidade de elementos excepcionais (1's fora da célula a ser verificado), visto que estes estão exclusivamente ligados a sua formulação.

Os processos de formação de células de manufatura que consideram estes dois elementos fundamentais tem grandes possibilidades de gerar boas soluções, consequentemente com bons valores de eficácia do agrupamento. Isto faz com que técnica de atribuição de máquinas leve em conta estes aspectos primordiais. Em harmonia com Wu, Chang e Chung (2008), a exposição desta técnica pode ser descrita em três passos, viabilizando que seja realizado a complementação da solução inicial gerada pela atribuição de peças já efetuada. O resultado portanto, assegura um agrupamento de células com uma boa eficácia, na qual é empregada para a implementação do algoritmo *simulated annealing*. Os passos a seguir explicitam este processo de atribuição:

Passo 1 Ler os resultados fornecidos pela atribuição de peças.

Passo 2 Para cada máquina, encontre a célula para a qual a atribuição da máquina resultará na menor soma de número de elementos excepcionais e vazios. Se ocorrer um empate, atribua a máquina a uma célula com o menor número de vazios.

Passo 3 Repita o **Passo 2** até que todas as máquinas sejam assinaladas a uma célula.

Utilizando os resultados da atribuição de peças mostrado na Tabela 3 o procedimento de atribuição de máquinas segue fornecendo a soma do números dos elementos vazios e excepcionais para cada combinação máquina-célula. As máquinas são atribuídas as células que resultam a menor soma (Tabela 4a), deste modo, para o problema de formação de células de manufatura a solução inicial completa pode ser obtida, como ilustrado na Tabela 4b.

Tabela 4 – Solução inicial com duas células de manufatura

(a) Atribuição de máquinas

	Célula 1	Célula 2
	v+e	v+e
M1	3+2	0+0
M2	0+0	2+3
M3	3+1	1+0
M4	1+0	2+2
M5	3+1	1+0

(b) Resultado das atribuições

	P2	P3	P5	P1	P4
M2	1	1	1	0	0
M4	1	1	0	0	0
M1	0	0	0	1	1
M3	0	0	0	1	0
M5	0	0	0	0	1

Fonte: Elaborado pelo autor

4.1.2 Função objetivo e restrições adotadas

Com finalidade de obter resultados na forma matricial adequados à realidade de uma organização industrial, faz-se necessário a incorporação de algumas restrições físicas para o projeto de formação das células de manufatura. É importante ressaltar que cada restrição pode influenciar diretamente na qualidade do agrupamento, deste modo, algumas notações devem ser introduzidas para o melhor entendimento, descritas no Quadro 2.

Quadro 2 – Quadro de notações

Variável	Descrição
C	Número ótimo de células a ser encontrado
C_{max}	Número máximo de células
$\mathcal{T}$	Eficácia do agrupamento (utilizado como função objetivo)

Fonte: Elaborado pelo autor

As restrições adotadas vão de acordo com:

- Cada máquina é pertencente a uma única célula de manufatura. Não é possível realizar duplicamentos de máquinas.
- O número ótimo C de células de manufatura é desconhecido inicialmente, variando de 2 à C_{max} , de acordo com as definições do requisitante. Quando C_{max} não é definido o algoritmo tem de convergir para o melhor agrupamento automaticamente.

Considerando as restrições acima, o problema de geração de um sistema de células de manufatura pode ser descrito através da adoção de uma função objetivo que avalie o valor da qualidade do agrupamento formado, levando em consideração a quantidade de movimentos intercelulares e intracelulares. Deste modo, é utilizado a função de eficácia do agrupamento $\mathcal{T}$ proposta por Kumar e Chandrasekharan (1990), na qual é melhor explorada na Sessão 2.4.1 e obtida através da Equação 2.2. Esta função vai de acordo com o propósito de minimização dos movimentos intercelulares e intracelulares, pois em sua formulação estes dois fatores são cruciais para o cálculo.

4.1.3 Geração da soluções vizinhas

Uma das partes mais importante para a convergência do algoritmo SA é a geração de suas soluções vizinhas a cada iteração, partindo da solução atual atribuída. De acordo com as técnicas de movimentações propostas por Wu, Chang e Chung (2008) a vizinhança de soluções é definida como um conjunto de soluções factíveis que podem ser alcançadas a partir de um movimento simples ou transação, fazendo com que melhore a solução atual e caminhe para um ponto ótimo.

Wu, Chang e Chung (2008) propõem duas técnicas para realizar as movimentações a fim de encontrar a vizinhança de soluções, a primeira delas é nomeada de movimento único.

Este movimento contempla a movimentação da peça j de sua célula atual k (célula de origem) para uma nova célula (célula destino), denotado por $M_1(k', j)$. O resultado que obter aumento no valor da função objetivo é selecionado, sendo expresso na Equação 4.3:

$$M_1(k', j) = \max\{obj^{(k', j)} - obj^{(atual)}, \forall k' \in K, k' \neq k, \forall j \in J\} \quad (4.3)$$

onde K representa o conjunto de células e J o conjunto de partes no cenário corrente.

A segunda técnica é chamada de movimento de troca. Esta operação corresponde ao mesmo que realizar dois movimentos únicos dependentes. Se a parte j é movimentada de sua célula de origem k para uma célula destino k' (primeiro movimento único), então uma parte j' pertencente ao conjunto das peças atribuídas a célula destino, deve preteritamente ser movimentada para a célula k , o que corresponde ao segundo movimento único, caracterizando o movimento de troca (Equação 4.4).

$$M_2(k', j)(k, j') = \max\{obj^{(k', j)(k, j')} - obj^{(atual)}, \forall k' \in K, k' \neq k, \forall j \in J, \forall j' \in J_k\} \quad (4.4)$$

Estes dois tipos de movimentos são utilizados interativamente no algoritmo proposto para orientar a busca da solução. Ambos os movimentos desempenham diferentes papéis no processo de melhoria da solução. Até certo ponto, o movimento único consegue gerar soluções melhores, mais factíveis, portanto, faz-se necessário utilizar o movimento de troca para trazer perturbação à busca de solução, o que gera mais esforço computacional.

4.2 Simulated annealing para formação de células de manufatura

O algoritmo proposto começa a partir de uma solução inicial e uma série de movimentos para geração das soluções vizinhas, que podem ser realizados com as técnicas descritas nos tópicos anteriores. O processo de *annealing* caminha para uma solução ótima até que os critérios de parada sejam atendidos ou até que chega a uma temperatura de congelamento. Para evitar ficar parado em uma solução de ótimo local o algoritmo movimenta lentamente, respeitando a função objetivo, para um valor que agregue na solução e com uma certa probabilidade para soluções piores, que neste caso, para soluções que possuem menor eficácia do agrupamento.

Torna-se evidente que o resultado do algoritmo varia de acordo com as restrições propostas, deste modo, se o número de células a serem formadas for definido inicialmente, isto afetará as soluções de agrupamento obtidas. O número de células que resulta na melhor eficácia de agrupamento é gerado automaticamente. No entanto, a flexibilidade é preservada

para que esta restrição seja respeitada, com isso pode ser especificado o número de células máximas C_{max} .

Para retratar o algoritmo aplicado a este problema, considere as notações já definidas na Tabela 2 e as descritas no Quadro 3.

Quadro 3 – Quadro de notações para o *simulated annealing*

Variável	Descrição
S	Solução atual
S^n	Melhor solução vizinha
S^*	Melhor solução encontrada no número atual de células
S^{**}	Melhor solução encontrada no momento
T_0	Temperatura inicial
T_f	Temperatura final
α	Taxa de resfriamento
L	Comprimento da cadeia de Markov (representa o equilíbrio térmico)
D	Contador para chamar o movimento de troca
k	Contador da iteração
$contTemp$	Contador de iterações para cada temperatura
$contPreso$	Contador para evitar ficar parado em uma solução pior
$contIgual$	Contador para evitar ficar parado em uma solução igual
$check$	Comparação para $contIgual$, faz parte de um dos critérios de parada

Fonte: Elaborado pelo autor

Deste modo, o algoritmo pode ser descrito através dos seguintes passos:

Passo 1 Gerar a solução inicial S utilizando os métodos de atribuição de peças através do agrupamento de ligação única e atribuição de máquinas, considerando os elementos vazios e excepcionais.

Passo 2 Inicialize $S^{**} = S^* = S$ e defina C_{max} , caso não definido, o algoritmo converge automaticamente para o número de células ótimos, de acordo com a eficácia do agrupamento.

Passo 3 Inicialize os parâmetros do *simulated annealing*, sendo eles: T_0 , T_f , α , L , D . Simultaneamente inicialize os contadores que ajudam o algoritmo a caminhar para a solução ótima, portanto $k = contTemp = contPreso = contIgual = 0$.

Passo 4 Enquanto $contTemp < L$ e $contPreso < L/2$ repita o passos 4.1 a 4.7:

Passo 4.1 Gere as novas atribuições de peças através das soluções vizinhas aplicando o movimento único para cada peça e célula.

Passo 4.2 Realize o movimento de troca se k for múltiplo de D , agregando as soluções vizinhas.

Passo 4.3 Leia o conjunto de soluções vizinhas e realize o a atribuição de máquinas usando. A solução que agregue melhor valor na função objetivo é selecionada e atribuída a S^n .

Passo 4.4 Se $f(S^n) > f(S^*)$, então $S^* = S^n$, $S = S^n$, $contIgual = 0$, $contTemp = contTemp + 1$.

Passo 4.5 Senão, se $f(S^n) = f(S^*)$, então $S = S^n$, $contIgual = contIgual + 1$.

Passo 4.6 Senão, obtenha a variação da solução, sendo $\Delta = f(S^n) - f(S)$. Selecione um número randômico X no intervalo de 0 a 1. Se $e^{(\Delta/T)} > X$, aceite a solução pior $S = S^n$, $contPreso = 0$. Caso contrário $contPreso = contPreso + 1$.

Passo 4.7 $contTemp = contTemp + 1$.

Passo 5 Se $T_k \leq T_f$ ou $contIgual \geq check$, vá para o Passo 6, caso contrário, $T_{k+1} = T_k * \alpha$, $contPreso = contIgual = 0$, $k = k + 1$ e repita o Passo 3.

Passo 6 Se $f(S^*) > f(S^{**})$, então faça $S^{**} = S^*$, $C = C + 1$, incremente a quantidade de células contidas na solução atual S e vá para o Passo 2, caso contrário, retorne a melhor solução e calcule os movimentos intercelulares e as peças gargalos da mesma.

5 Testes e análise dos resultados

O presente capítulo trata da descrição dos dados e da discussão dos resultados, sendo primeiramente definido os parâmetros padrões para captação dos mesmos. Como amplamente conhecido em todas aplicações do algoritmo SA, as configurações dos parâmetros afetam de forma crítica a eficiência e eficácia da solução. Após isto é demonstrado a análise dos resultados obtidos.

5.1 Parâmetros do *simulated annealing*

O algoritmo SA possui quatro parâmetros que precisam ser definidos inicialmente para seu funcionamento adequado. Os parâmetros são: temperatura inicial (T_0), temperatura final (T_f), taxa de resfriamento (α) e comprimento da cadeia de Markov (L).

A mais comumente função da redução de temperatura (taxa de resfriamento) utilizada varia entre 0,7 à 0,95, portanto para o presente algoritmo foi utilizado $\alpha = 0,7$, resultando em um decaimento relativamente lento. Segundo Kirkpatrick, Gelatt e Vecchi (1983), a temperatura inicial (T_0) deve ser suficientemente grande ao ponto que na primeira iteração a probabilidade de aceitação das soluções piores deve ser, pelo menos, de 80%, portanto conclui-se que a temperatura inicial que melhor comportou nos problemas testados foi de 20. O tamanho do nível de cada temperatura (L), ou comprimento da cadeia de Markov, determina o número de repetições permitidas por cada temperatura T , definido então como sendo 10. A temperatura final foi ajustada em 0,002 e por fim um novo parâmetro (D) proposto por Wu, Chang e Chung (2008), na qual representa a taxa de invocação da troca de movimentos foi ajustado para 12.

5.2 Análise dos resultados

Na realização da análise, os resultados foram coletados a partir de cinco problemas da literatura através da aplicação do algoritmo SA proposto. Para cada um dos problemas é realizado a comparação dos resultados baseados na quantidade de ICM's, peças gargalos e eficácia do agrupamento. Os resultados foram apresentados em forma de matriz, gráfico e uma tabela comparativa. Em alguns problemas, o resultado da literatura propôs um agrupamento que tinha um número de células máximas, portanto foram utilizadas restrições no intuito de obter resultados com a mesma quantidade de células, possibilitando assim a comparação. Nestes casos, o resultado sem esta restrição também será demonstrado, fazendo com que o algoritmo converta automaticamente para um número ótimo de células.

Para a tabela comparativa, serão utilizados quatro perspectivas de resultados. O primeiro resultado é obtido através da literatura, na qual de acordo com o problema será comparado com a solução atingida pelo autor. A segunda comparação será realizada com os resultados da pesquisa proposta por Rodrigues (1997), onde é aplicado o algoritmo de busca tabu. Já a terceira comparação será realizada com os resultados expostos no trabalho pro-

posto por Rocha (2015), na qual foi utilizado o algoritmo genético. Por fim, na última linha da tabela, serão mostrados os resultados obtidos pelo algoritmo SA proposto.

O gráfico a ser mostrado retrata o processo de evolução da função objetivo, resultando em diferentes valores de eficácia do agrupamento correlacionado com decaimento da temperatura. Caso aconteça o equilíbrio térmico e algoritmo não apresente melhora na função objetivo, o critério de parada é atingido, por conseguinte, o melhor resultado obtido é retornado.

5.2.1 Problema 1

Este problema relata um chão de fábrica descrito por Srinivasan, Narandran e Mahadevan (1990), contendo 10 máquinas e 20 peças (Tabela 5), resolvido através da abordagem *P-Median*. Para o SA, não foi especificado o número de células máximo, portanto o algoritmo convergiu automaticamente para o número C de células (Tabela 6).

Tabela 5 – Matriz de incidência: Problema 1

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20
M1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M2	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M3	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M4	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0	1
M6	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M7	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0
M8	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0
M9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0	1
M10	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0

Fonte: (SRINIVASAN; NARANDRAN; MAHADEVAN, 1990)

Tabela 6 – Resultado do *simulated annealing*: Problema 1

	P1	P4	P7	P2	P3	P5	P8	P10	P6	P9	P11	P12	P16	P19	P13	P14	P15	P17	P18	P20
M1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M4	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M6	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M2	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M3	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M7	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
M8	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
M10	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
M5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
M9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1

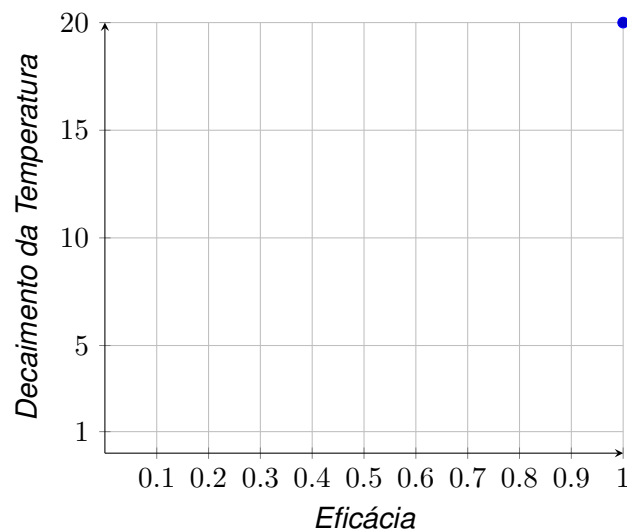
Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 7 – Comparação dos resultados: Problema 1

Algoritmo	Qtd. de Células	Peças Gargalo	ICM	Eficácia
<i>P-Median</i>	4	0	0	1
Busca Tabu	4	0	0	1
AG	4	0	0	1
SA	4	0	0	1

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 19 – Gráfico eficácia por decaimento da temperatura: Problema 1



Fonte: Elaborado pelo autor

De acordo com o resultado obtido, verifica-se que o problema possui solução ótima, onde a eficácia do agrupamento é igual a 1, fazendo com que os agrupamentos gerados não possuam nenhum movimento intercelular e intracelular. A Tabela 7 demonstra este resultado juntamente com os obtidos em diferentes abordagens. Todos as abordagens comparadas resultaram em um mesmo agrupamento.

Na Figura 19, nota-se que a solução inicial atingida pelo método de agrupamento aglomerativo de ligação única foi suficientemente boa e garantiu a solução ótima na primeira iteração do algoritmo SA, evitando que o mesmo precise do processo de decaimento da temperatura. Devido a estas circunstâncias, para este problema, o algoritmo realizou perturbações para obtenção das soluções vizinhas através da solução inicial realizando o movimento único e a troca de movimento, consequentemente, aceitando as soluções piores de acordo com a probabilidade aleatória até que o equilíbrio térmico fosse alcançado. Como não houve melhoras na função objetivo, foi atingido o critério de parada e o melhor resultado obtido foi retornado.

5.2.2 Problema 2

Este problema relata um chão de fábrica descrito por Cheng, Madan e Motwani (1996) onde contém 11 máquinas e 22 peças (Tabela 8), resolvido através da abordagem *Truncated Tree Search*. Para o SA, não foi especificado o número de células máximo, portanto o algoritmo convergiu automaticamente para o número C de células (Tabela 9).

Tabela 8 – Matriz de incidência: Problema 2

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20	P21	P22
M1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1
M2	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
M3	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
M4	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1
M5	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1
M6	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
M7	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0
M8	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0
M9	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0
M10	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0
M11	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0

Fonte: (CHENG; MADAN; MOTWANI, 1996)

Tabela 9 – Resultado do *simulated annealing*: Problema 2

	P1	P2	P3	P7	P11	P15	P16	P20	P21	P22	P4	P9	P10	P14	P17	P18	P8	P5	P12	P19	P13	P6
M1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M4	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M5	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M10	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0
M7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1
M9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
M11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0
M2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0
M3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
M6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0
M8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1

Fonte: Elaborado pelo autor

O resultado obtido garantiu uma solução factível no período de decaimento da temperatura, onde a eficácia do agrupamento máxima foi de 0,72. Os 1's em vermelho representam que as peças P7, P20, P9, P10, P14, P18, P8, P5, P12 e P6 caracterizadas como peças gargalos vão gerar ICM's. Deste modo, a Tabela 10 demonstra o presente resultado juntamente com os obtidos em diferentes abordagens. Nota-se que algoritmo SA alcançou a mesma quantidade de peças gargalos e ICM's em comparação com a abordagem do AG proposta por Rocha (2015), garantindo a mesma eficácia do agrupamento.

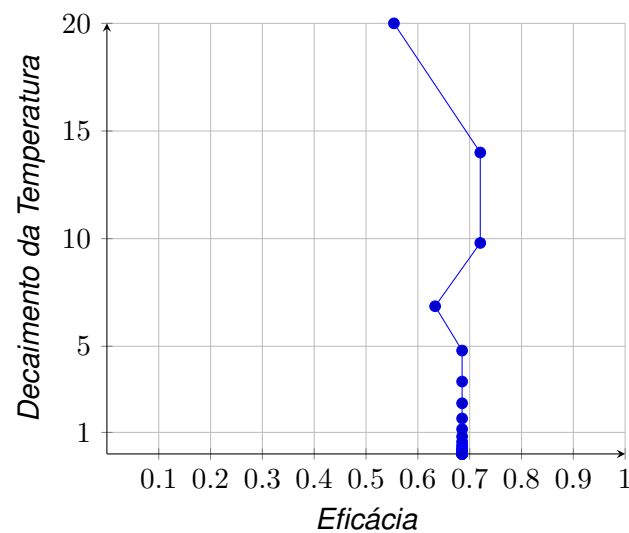
É notável que como a função objetivo adotada foi a função de eficácia, o melhor re-

Tabela 10 – Comparação dos resultados: Problema 2

Algoritmo	Qtd. de Células	Peças Gargalo	ICM	Eficácia
<i>Truncated Tree Search</i>	3	8	10	0,731
Busca Tabu	3	6	8	0,620
AG	3	10	11	0,720
SA	3	10	11	0,720

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 20 – Gráfico eficácia por decaimento da temperatura: Problema 2



Fonte: Elaborado pelo autor

sultado não garantiu o menor número de movimentos intercelulares e de peças gargalos, isto acontece porque a mesma avalia a qualidade do agrupamento formado como um todo, também levando em consideração a quantidade de movimentos intracelulares, ou seja, em alguns casos a mesma pode acabar gerando um ICM para diminuir um movimento intracelular, assinalado pelos 0's contidos dentro das células. Neste contexto, a abordagem de busca tabu proposta por Rodrigues (1997) obteve menores números de ICM's e peças gargalos, mas ao mesmo tempo a menor eficácia do agrupamento.

Na Figura 20, nota-se que a solução inicial atingida pelo método de agrupamento aglomerativo de ligação única não garantiu uma solução ótima, portanto foi necessário o processo de decaimento da temperatura. A solução inicial obtida foi expressa através de um agrupamento de duas célula de manufatura, com eficácia de 0,55. Com o passar das iterações foi incrementado o número de células e verificado que houve melhoras na eficácia.

Nestas circunstâncias, para este problema, o algoritmo realizou perturbações para obtenção das soluções vizinhas através das soluções correntes obtidas em cada temperatura, realizando o movimento único e a troca de movimento, consequentemente, aceitando as soluções piores de acordo com a probabilidade aleatória até que o equilíbrio térmico (L) fosse

alcançado. Quando o equilíbrio é alcançado faz se necessário a atualização da temperatura através do decaimento α , até que o algoritmo chegue em seu critério de parada estabelecido pela temperatura mínima de congelamento, expressada por $T_f = 0,0002$. Graficamente é possível reparar que no primeiro decaimento da temperatura ($T = 14$) a melhor solução já tinha sido alcançada e que não houve melhoras na função objetivo, deste modo, o melhor resultado obtido foi retornado ao ser atingido o critério de parada.

5.2.3 Problema 3

Este problema relata um chão de fábrica descrito por Srinivasan, Narandran e Mahadevan (1990) onde contém 16 máquinas e 30 peças (Tabela 11), resolvido através da abordagem *P-Median*, assim como o Problema 5.2.1. Para o SA, foi especificado o número de células máximo sendo igual a 4. O resultado será expresso com esta restrição (Tabela 12) e sem a mesma, convergindo automaticamente para o número C de células (Tabela 13).

Tabela 11 – Matriz de incidência: Problema 3

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20	P21	P22	P23	P24	P25	P26	P27	P28	P29	P30	
M1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	
M2	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
M3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	
M4	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	
M5	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	
M6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	
M7	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	
M8	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
M9	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	
M10	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
M11	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
M12	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M13	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
M14	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
M15	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1
M16	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0

Fonte: (SRINIVASAN; NARANDRAN; MAHADEVAN, 1990)

Tabela 12 – Resultado do *simulated annealing* com $C_{max} = 4$: Problema 3

	P23	P29	P25	P27	P5	P19	P28	P6	P8	P11	P14	P15	P21	P24	P26	P4	P22	P18	P2	P7	P12	P9	P30	P10	P20	P17	P1	P16	P13	P3	
M3	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	
M6	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
M9	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
M15	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
M5	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
M10	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
M14	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
M16	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
M1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	
M4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	
M7	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	
M8	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	
M11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	
M12	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	
M2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0
M13	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 13 – Resultado do *simulated annealing* sem restrição de células: Problema 3

	P5	P28	P19	P6	P8	P11	P14	P15	P21	P24	P26	P4	P22	P18	P2	P7	P12	P9	P30	P17	P13	P3	P1	P16	P10	P20	P23	P25	P27	P29
M9	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0
M5	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
M10	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M14	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
M16	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
M1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
M8	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M11	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M12	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
M13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1
M2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
M3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1
M6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
M15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 14 – Comparação dos resultados: Problema 3

Algoritmo	Qtd. de Células	Peças Gargalo	ICM	Eficácia
<i>P-Median</i>	4	15	18	0,678
Busca Tabu	4	14	17	0,610
AG	4	14	18	0,688
SA ($C_{max} = 4$)	4	15	18	0,688
SA	6	17	25	0,703

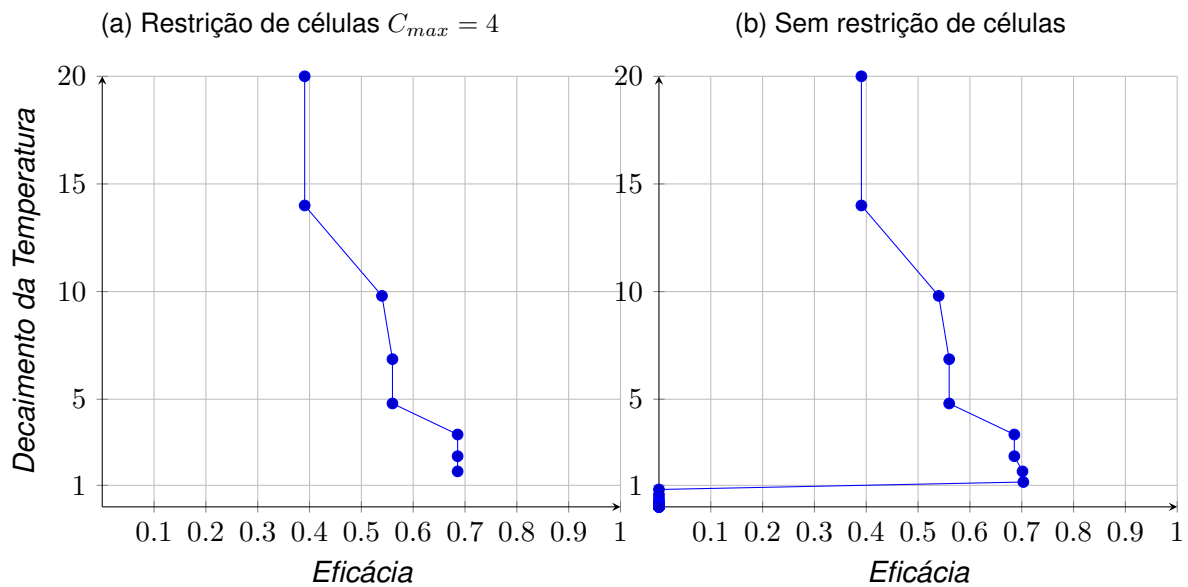
Fonte: Elaborado pelo autor

Para o resultado obtido na Tabela 12, na qual a restrição de células máximas foi fixada em 4, pode-se garantir uma solução factível no período de decaimento da temperatura, onde a eficácia do agrupamento máxima foi de 0,688. Os 1's em vermelho representam que as peças P29, P25, P27, P5, P19, P28, P11, P26, P4, P18, P7, P30, P20, P13 e P3, caracterizadas como peças gargalos, vão gerar no mínimo um ICM. Já para o algoritmo SA sem aplicação da restrição de células máximas (Tabela 13), foi possível obter a convergência para uma maior eficácia com 6 células, sendo de 0,703, tendo as peças P5, P28, P19, P11, P26, P4, P18, P7, P30, P13, P3, P10, P20, P23, P25, P27 e P29 como peças gargalos, geradoras de ICM's.

Com estes resultados, novamente torna-se perceptível que a função objetivo adotada não garantiu o menor número de movimentos intercelulares e de peças gargalos, como já descrito no Problema 5.2.2, mas sim garantindo o melhor agrupamento como um todo, por isto, para este problema foi gerado duas soluções viáveis para demonstração. O segundo agrupamento gerado resultou em uma melhor eficácia, no entanto com a solução tendo o número de peças gargalos e ICM's maiores, como pode ser visto na comparação realizada pela Tabela 14.

Analogamente, de acordo com o gráfico exposto na Figura 21a, representando o resul-

Figura 21 – Gráfico eficácia por decaimento da temperatura: Problema 3



Fonte: Elaborado pelo autor

tado obtido na Tabela 12, o algoritmo SA convergiu para a melhor solução sem realizar todo processo de decaimento da temperatura, portanto não foi necessário atingir a temperatura final mínima. Deste modo, houve a estabilidade das soluções. Como a restrição de células estava ativa, não foi possível gerar soluções vizinhas incrementando o número de células, contudo o algoritmo atingiu a estabilidade térmica e o critério de parada de estagnação da solução foi atingido.

Já para a solução exposta no gráfico da Figura 21b, na qual representa o resultado obtido na Tabela 13, todo o processo de decaimento da temperatura foi realizado, portanto o critério de parada para este caso foi atingido quando a temperatura do processo chegou a temperatura final. Nas últimas iterações, ou seja, próximo a temperatura final, o algoritmo não encontrou mais soluções factíveis, válidas, manifestada pela eficácia do agrupamento igual a 0.

5.2.4 Problema 4

Este problema relata um chão de fábrica descrito por Chow e Hawaleshka (1993) onde contém 30 máquinas e 41 peças (Tabela 15), resolvido através da abordagem *Knowledge Based System* (KBS). Para o SA, não foi especificado o número de células máximas, portanto o algoritmo convergiu automaticamente para o número C de células (Tabela 16).

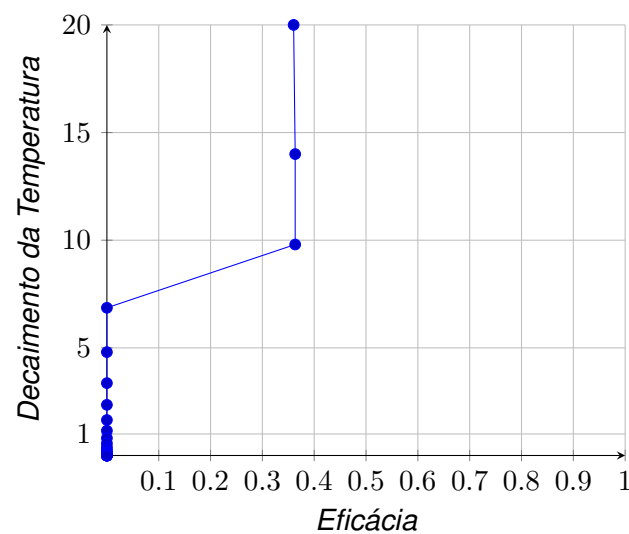
Para este problema, a meta-heurística SA não obteve resultados bons se comparado aos demais resultados obtidos nas diferentes abordagens dispostas na Tabela 17. De acordo com o resultado obtido, verifica-se que o problema possui uma solução factível, onde a eficácia do agrupamento é igual a 0,364. Ao comparar com a abordagem de busca tabu e de algoritmos genéticos, o SA obteve um aumento de cerca de 275% nos movimentos intercelulares,

Tabela 17 – Comparação dos resultados: Problema 4

Algoritmo	Qtd. de Células	Peças Gargalo	ICM	Eficácia
KBS	4	13	13	0,293
Busca Tabu	4	7	7	0,316
AG	4	8	8	0,377
SA	4	17	22	0,364

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 22 – Gráfico eficácia por decaimento da temperatura: Problema 4



Fonte: Elaborado pelo autor

gerado agrupamentos considerados inválidos, onde a eficácia é igual a 0. O algoritmo termina então quando é atingido o critério de parada da temperatura final mínima de congelamento, retornando a melhor solução encontrada.

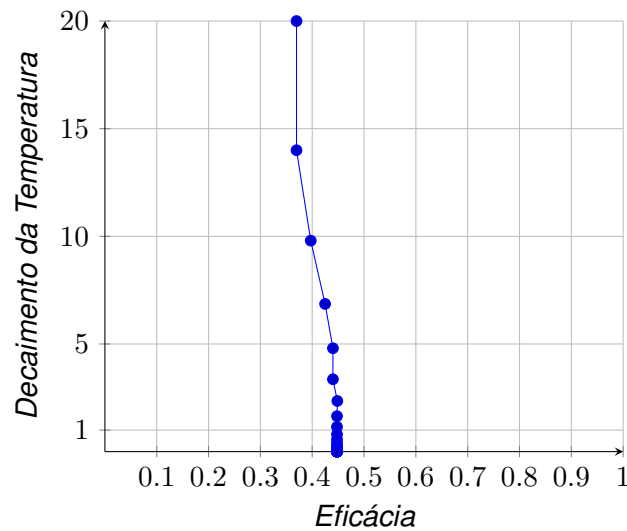
É de se questionar a qualidade deste agrupamento, pois sua eficácia é maior do que a abordagem proposta pela literatura (CHOW; HAWALESHKA, 1993) e da busca tabu (RODRIGUES, 1997), mas visivelmente a solução disposta possui muitas peças gargalos e ICM's, que atrapalham diretamente no fluxo de produção. Portanto, mesmo que a redução dos ICM's sejam trabalhados de forma implícita, o fato do cálculo da eficácia não o torna como objetivo principal e não garante totalmente sua redução, como já dito nos problemas anteriormente apresentados.

5.2.5 Problema 5

Este problema relata um chão de fábrica descrito por Srinivasan e Narendran (1991) onde contém 24 máquinas e 40 peças (Tabela 18), resolvido através da abordagem GRAFICS. Para o SA, inicialmente não foi especificado o número de células máximo, portanto o algoritmo

P30, P38, P39, P19, P15, P34, P22, P3, P10, P4, P27, P4, P12, P6, P35, P1, P37, P5, P16, P9 e P33. Totalizando 33 peças gargalos e gerando 57 ICM's.

Figura 23 – Gráfico eficácia por decaimento da temperatura (sem restrição de células): Problema 5



Fonte: Elaborado pelo autor

De acordo com o gráfico exposto na Figura 23, nota-se que foi necessário o decaimento da temperatura, sendo que o valor da melhor eficácia foi encontrado nas últimas iterações. O algoritmo termina quando é atingido o critério de parada da temperatura final, retornando a melhor solução encontrada.

Aplicando a restrição $C_{max} = 7$, é possível obter a solução apresentada na Tabela 20:

Tabela 20 – Resultado do *simulated annealing* com $C_{max} = 7$: Problema 5

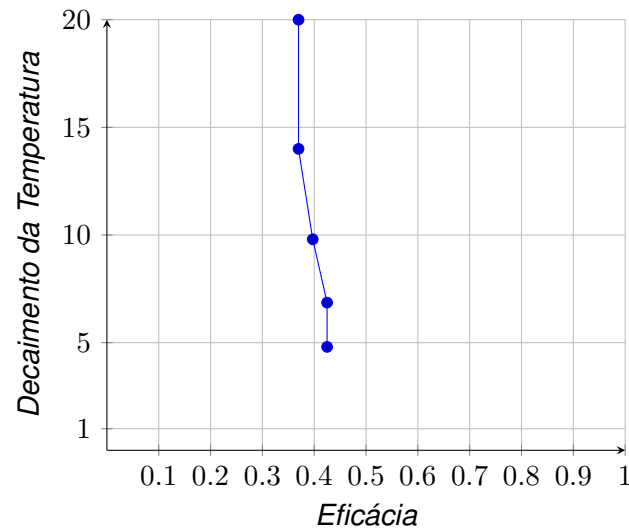
	P7	P17	P29	P31	P9	P33	P2	P8	P11	P25	P28	P32	P22	P40	P14	P36	P13	P21	P5	P16	P26	P30	P37	P38	P39	P1	P19	P15	P23	P3	P10	P34	P18	P4	P27	P24	P20	P12	P6	P35			
M1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
M17	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
M4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
M14	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
M20	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
M24	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
M2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
M19	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	
M23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
M6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
M8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
M15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	
M16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
M22	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
M3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	
M11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M21	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M10	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
M12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
M18	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
M5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
M9	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
M13	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	

Fonte: Elaborado pelo autor

Para o resultado obtido na Tabela 20, na qual a restrição de células máximas foi fixada em 7, pode-se garantir uma solução factível no período de decaimento da temperatura, onde

a eficácia do agrupamento máxima foi de 0,425. As peças gargalos foram: P7, P17, P31, P9, P33, P11, P32, P22, P40, P14, P36, P13, P21, P5, P16, P26, P30, P38, P39, P1, P19, P15, P3, P10, P34, P4, P27, P24, P20, P12, P6 e P35. Totalizando 32 peças gargalos e gerando ao todo 49 ICM's.

Figura 24 – Gráfico eficácia por decaimento da temperatura ($C_{max} = 7$): Problema 5



Fonte: Elaborado pelo autor

De acordo com o gráfico exposto na Figura 24, nota-se que foi necessário poucos decaimentos da temperatura, deste modo, o melhor resultado obtido foi retornado ao ser atingido o critério de parada da estagnação da solução, pois não havia como incrementar o número de células para gerar novas soluções vizinhas.

Aplicando a restrição $C_{max} = 6$, é possível obter a solução apresentada na Tabela 21:

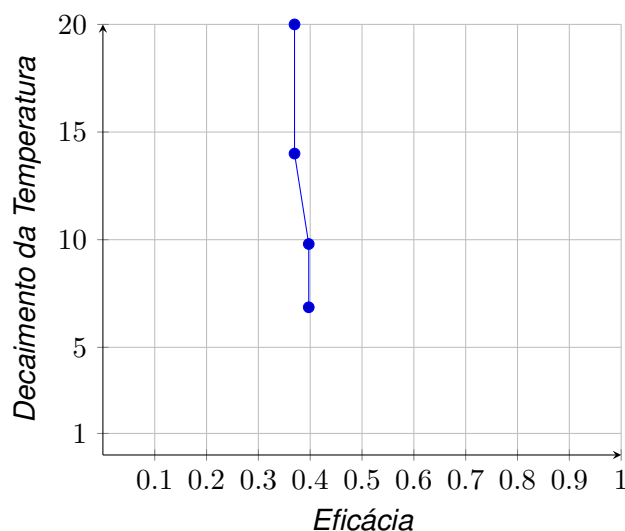
Tabela 21 – Resultado do *simulated annealing* com $C_{max} = 6$: Problema 5

	P7	P17	P20	P29	P31	P9	P2	P8	P11	P25	P28	P32	P34	P22	P33	P40	P6	P35	P14	P36	P13	P5	P16	P26	P30	P37	P38	P39	P1	P19	P12	P15	P23	P3	P10	P21	P18	P4	P27	P24			
M1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
M10	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
M17	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
M4	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	
M7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
M14	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
M20	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M24	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
M2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
M5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	
M9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
M19	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	
M6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	
M8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
M15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	
M16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
M22	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
M3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
M11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
M13	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
M21	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	
M23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
M12	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
M18	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0

Fonte: Elaborado pelo autor

Para o resultado obtido na Tabela 21, na qual a restrição de células máximas foi fixada em 6, pode-se garantir uma solução factível no período de decaimento da temperatura, onde a eficácia do agrupamento máxima foi de 0,397. As peças gargalos foram: P7, P17, P20, P31, P9, P11, P32, P34, P22, P33, P6, P35, P14, P36, P13, P5, P16, P26, P30, P38, P39, P1, P19, P12, P15, P10, P21, P4, P27 e P24. Totalizando 30 peças gargalos e gerando ao todo 45 ICM's.

Figura 25 – Gráfico eficácia por decaimento da temperatura ($C_{max} = 6$): Problema 5



Fonte: Elaborado pelo autor

Como no resultado anterior, o gráfico exposto na Figura 25, nota-se que foi necessário um número menor de decaimentos da temperatura, deste modo, o melhor resultado obtido foi retornado ao ser atingido o critério de parada da estagnação da solução.

As comparações são mostradas na Tabela 22:

Tabela 22 – Comparação dos resultados: Problema 5

Algoritmo	Qtd. de Células	Peças Gargalo	ICM	Eficácia
GRAFICS	9	37	59	0,476
SA	9	33	57	0,448
Busca Tabu ($C_{max} = 7$)	7	32	50	0,403
SA ($C_{max} = 7$)	7	32	49	0,425
Busca Tabu ($C_{max} = 6$)	6	35	49	0,368
SA ($C_{max} = 6$)	6	30	45	0,397

Fonte: Elaborado pelo autor

6 Conclusão

Este capítulo expõe a conclusão dos resultados computacionais encontrados na aplicação da meta-heurística *simulated annealing* para otimização combinatória. Também expressa resumidamente possíveis melhoras para futuras adaptações quando aplicadas neste mesmo problema estudado.

6.1 Considerações finais

O presente trabalho empreendeu uma análise comparativa de domínio na aplicação do *simulated annealing* em conjunto com resultados obtidos por outras abordagens dispostas na literatura. Os resultados computacionais obtidos da execução dos testes, mostraram que o algoritmo proposto, na maioria dos casos, conseguiu convergir para melhores valores de eficácia do agrupamento ao se comparar com os agrupamentos resultantes das outras abordagens. O bom resultado vai de encontro primeiramente com as adaptações do algoritmo para suportar a atribuição de peças em famílias de peças, formadas através da construção da matriz de similaridade de peças, que foi encontrada por intermédio do coeficiente de Jaccard e processada através do algoritmo de agrupamento hierárquico de ligação única. O segundo ponto a ser levado em consideração é a atribuição de máquinas, onde acontece a alocação das mesmas em uma célula de manufatura com a menor soma dos elementos vazios e excepcionais, sendo estes elementos cruciais para o cálculo da função objetivo. Em contrapartida, é de se questionar a qualidade dos agrupamentos obtidos, pois a eficácia mesmo sendo maior, tem a solução final normalmente com muitas peças gargalos, fazendo com que seja gerado vários movimentos intercelulares, os quais atrapalham diretamente o fluxo de produção. Portanto, mesmo que a redução dos movimentos intercelulares sejam trabalhados de forma implícita, o fato da função objetivo ser a eficácia do agrupamento não o torna como objetivo principal e não garante totalmente sua minimização.

É importante ressaltar que esta meta-heurística tem característica probabilística, ou seja, é possível obter resultados melhores ou piores em diferentes execuções devido o fato da verificação da probabilidade de aceitação de soluções piores, o que pode permitir que ele escape dos mínimos locais. Este processo probabilístico faz parte de sua otimização, acontecendo de fato várias vezes em cada nível de temperatura, sendo diversos pontos na vizinhança gerados e aplicados ao cálculo correspondente da função objetivo. Esta probabilidade de aceitação decresce de acordo com cada iteração, ou equivalente, de acordo com a temperatura. No entanto, em todos os testes realizados, o mesmo valor final da eficácia foi encontrado. Em alguns casos não foi necessário todo o processo de otimização disposto pelo decaimento da temperatura, sendo o critério de parada de estagnação da solução responsável por retornar o melhor agrupamento.

6.2 Trabalhos futuros

Os resultados deste trabalho sugerem algumas direções promissoras para geração de trabalhos futuros. De forma geral, estas direções vão de encontro com possíveis adaptações do algoritmo proposto. Deste modo, podem ser listadas como:

- Adaptação do algoritmo para suportar mais restrições de sistema, fazendo com que as mesmas sejam associadas a fatores reais em um cenário de produção, como por exemplo, restrições do tipo de quantidade de máquinas por células, máquinas que não podem permanecer na mesma célula e máquinas que devem trabalhar em uma mesma célula de manufatura.
- Fornecer uma adaptação no conjunto de processamento do algoritmo, fazendo com que o mesmo processe não somente a matriz de incidência de máquinas-peças e sim a matriz de sequência, onde a mesma tem o objetivo de fornecer dados sobre a ordem que a peça passa por sua respectiva máquina.
- Escolher um método diferente para formação inicial das células de manufatura, gerando uma nova comparação com a solução resultante provida de um agrupamento aglomerativo hierárquico.
- Prover um novo modelo para a função objetivo, partindo de um sistema matemático de programação linear inteira para substituição da função de eficácia do agrupamento, levando em consideração em maior parte os movimentos intercelulares.

Referências

- BURBIDGE, J. L. *Production Flow Analysis*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1985. 34–42 p. ISBN 978-3-642-82580-4. Citado nas páginas 12, 19 e 21.
- CHAN, C.-Y.; LAM, F.-W.; LEE, C.-P. Considerations for using cellular manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 96, n. 1–3, p. 182 – 187, 1999. ISSN 0924-0136. Citado nas páginas 17, 18, 19 e 24.
- CHANDRASEKHARAN, M. P.; RAJAGOPALAN, R. An ideal seed non-hierarchical clustering algorithm for cellular manufacturing. *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, v. 24, n. 2, p. 451–463, 1986. Citado na página 25.
- CHEN, C.-L.; COTRUVO, N. A.; BAEK, W. A simulated annealing solution to the cell formation problem. *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, v. 33, n. 9, p. 2601–2614, 1995. Citado na página 27.
- CHENG, C.-H.; MADAN, M.; MOTWANI, J. Designing cellular manufacturing systems by a truncated tree search. *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, v. 34, n. 2, p. 349–361, 1996. Citado na página 50.
- CHOW, W. S.; HAWALESKA, O. A novel machine grouping and knowledge-based approach for cellular manufacturing. *European Journal of Operational Research*, v. 69, n. 3, p. 357 – 372, 1993. ISSN 0377-2217. Cellular Manufacturing Systems. Citado nas páginas 54, 55 e 56.
- DÍAZ, J. A.; LUNA, D. E.; ZETINA, C. A. A hybrid algorithm for the manufacturing cell formation problem. *Journal of Heuristics*, v. 19, n. 1, p. 77–96, 2013. ISSN 1572-9397. Citado na página 13.
- DIMOPOULOS, C.; MORT, N. Evolving similarity coefficients for the solution of cellular manufacturing problems. In: *Proceedings of the 2000 Congress on Evolutionary Computation. CEC00 (Cat. No.00TH8512)*. [S.l.: s.n.], 2000. v. 1, p. 617–624 vol.1. Citado na página 37.
- GAN, G.; MA, C.; WU, J. *Data Clustering: Theory, Algorithms, and Applications*. [S.l.]: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2007. Citado na página 32.
- HERAGU, S. S. Group technology and cellular manufacturing. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, v. 24, n. 2, p. 203–215, Feb 1994. ISSN 0018-9472. Citado nas páginas 17 e 18.
- HODIYA, A. L. *A Mathematical Model and a Simulated Annealing Algorithm for an Integrated Facility Layout and Cell Formation*. 2015. Dissertação (Mestrado) — The University of Guelph, Guelph, Ontario, Canada, 2015. Citado na página 28.
- ISLAM, K. M. S.; SARKER, B. R. A similarity coefficient measure and machine-parts grouping in cellular manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, v. 38, n. 3, p. 699–720, 2000. Citado na página 38.
- KING, J. R.; NAKORNCHAI, V. Machine-component group formation in group technology: review and extension. *International Journal of Production Research*, v. 20, n. 2, p. 117–133, 1982. Citado nas páginas 13 e 20.

- KIRKPATRICK, S.; GELATT, C. D.; VECCHI, M. P. Optimization by simulated annealing. *Science*, American Association for the Advancement of Science, v. 220, n. 4598, p. 671–680, 1983. ISSN 0036-8075. Citado nas páginas 27, 29 e 47.
- KUMAR, C. S.; CHANDRASEKHARAN, M. P. Grouping efficacy: a quantitative criterion for goodness of block diagonal forms of binary matrices in group technology. *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, v. 28, n. 2, p. 233–243, 1990. Citado nas páginas 25 e 43.
- LIT, P. D.; FALKENAUER, E.; DELCHAMBRE, A. Grouping genetic algorithms: An efficient method to solve the cell formation problem. *Mathematics and Computers in Simulation*, v. 51, n. 3–4, p. 257 – 271, 2000. ISSN 0378-4754. Citado na página 12.
- LORINI, F. J. *Tecnologia de Grupo e Organização da Manufatura*. Florianópolis, Santa Catarina: Editora da UFSC, 1993. Citado na página 16.
- MANNING, C. D.; RAGHAVAN, P.; SCHUTZE, H. *Introduction to Information Retrieval*. New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2008. ISBN 0521865719, 9780521865715. Citado na página 32.
- MCAULEY, J. Machine grouping for efficient production. *Production Engineer*, v. 51, n. 2, p. 53–57, February 1972. ISSN 0032-9851. Citado na página 38.
- METROPOLIS, N. et al. Equation of state calculations by fast computing machines. *The Journal of Chemical Physics*, AIP, v. 21, n. 6, p. 1087–1092, 1953. Citado na página 27.
- MURUGAN, M.; SELLADURAI, V. Formation of machine cells/part families in cellular manufacturing systems using an art-modified single linkage clustering approach - a comparative study. v. 5, p. 199–212, 01 2011. Citado na página 40.
- PODANI, J. *Introduction to the exploration of multivariate biological data*. [S.l.]: Backhuys Publishers, 2000. ISBN 9789057820670. Citado na página 33.
- ROCHA, G. C. C. *Formação de Células de Manufatura com Abordagem Baseada em um Algoritmo Genético*. 2015. Dissertação (Tese de Graduação) — Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Timóteo, Minas Gerais, 2015. Citado nas páginas 48 e 50.
- RODRIGUES, E. de O. *Problema de Especificação de Células de Manufatura na presença de Restrições de Projeto - Uma Abordagem baseada em Tabu Search*. 1997. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Espírito Santo, Vitória, Espírito Santo, 1997. Citado nas páginas 47, 51, 56 e 57.
- RODRIGUES, E. de O. *Metodologia para Formação de Parceria em Cadeia de Suprimentos: Enfoque por Similaridade entre Atividades*. 2005. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2005. Citado nas páginas 21, 22, 23, 24 e 25.
- SELIM, H. M.; ASKIN, R. G.; VAKHARIA, A. J. Cellular manufacturing systems: Design, analysis and implementation cell formation in group technology: Review, evaluation and directions for future research. *Computers & Industrial Engineering*, v. 34, n. 1, p. 3 – 20, 1998. ISSN 0360-8352. Citado na página 20.
- SRINIVASAN, G.; NARANDRAN, T. T.; MAHADEVAN, B. An assignment model for the part-families problem in group technology. *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, v. 28, n. 1, p. 145–152, 1990. Citado nas páginas 48 e 52.

SRINIVASAN, G.; NARENDHAN, T. T. Grafics — a nonhierarchical clustering algorithm for group technology. *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, v. 29, n. 3, p. 463–478, 1991. Citado nas páginas 56 e 57.

WU, T.-H.; CHANG, C.-C.; CHUNG, S.-H. A simulated annealing algorithm for manufacturing cell formation problems. *Expert Systems with Applications*, v. 34, n. 3, p. 1609 – 1617, 2008. ISSN 0957-4174. Citado nas páginas 35, 37, 39, 42, 43 e 47.

XAMBRE, A. R.; VILARINHO, P. M. A simulated annealing approach for manufacturing cell formation with multiple identical machines. *European Journal of Operational Research*, v. 151, n. 2, p. 434 – 446, 2003. ISSN 0377-2217. Meta-heuristics in combinatorial optimization. Citado na página 29.