



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

**FORMAÇÃO DE CÉLULAS DE MANUFATURA COM
ABORDAGEM BASEADA EM UM ALGORITMO GENÉTICO**

GLAUBER CAMARGO CAMPOS ROCHA

Orientador: Elder de Oliveira Rodrigues

TIMÓTEO
2015

GLAUBER CAMARGO CAMPOS ROCHA

**FORMAÇÃO DE CÉLULAS DE MANUFATURA COM
ABORDAGEM BASEADA EM UM ALGORITMO GENÉTICO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Computação do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais Campus Timóteo, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Computação

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO
TIMÓTEO
2015

GLAUBER CAMARGO CAMPOS ROCHA

**FORMAÇÃO DE CÉLULAS DE MANUFATURA COM
ABORDAGEM BASEADA EM UM ALGORITMO GENÉTICO**

Trabalho aprovado. Timóteo, 30 de Janeiro de 2015



Elder de Oliveira Rodrigues
Orientador



Professor
Aléssio Miranda Júnior



Professor
Douglas Nunes de Oliveira

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO
TIMÓTEO
2015

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a Deus primeiramente por ter me suprido até aqui e me dado a capacidade para finalizar este trabalho. Aos meus pais que sempre me apoiaram e me incentivaram. À minha namorada que sempre foi compreensiva com minhas ausências. E ao meu orientador que me conduziu por este caminho, me cobrou e esteve sempre disponível para me ajudar.

Resumo

O problema da formação de células de manufatura é uma aplicação da tecnologia de grupo conhecida como "Manufatura Celular" e consiste em formar blocos diagonais em uma matriz de incidência que representa quais peças passam por quais máquinas em seu processo de manufatura. O presente trabalho trata de uma solução para este problema no ambiente industrial, utilizando um algoritmo genético em conjunto com uma meta-heurística de busca local. Na literatura existem várias propostas de solução para este problema baseadas em diferentes abordagens. O objetivo principal deste trabalho é obter resultados que tenham pelo menos o mesmo desempenho que os resultados existentes, sendo capaz de lidar com restrições de quantidade de máquinas por célula, quantidade total de células, máquinas que devem ficar juntas e máquinas que devem ficar separadas.

Palavras-chave: tecnologia de grupo, célula de manufatura, algoritmo genético, busca local, restrições

Abstract

The problem of manufacture cells formation is an application of a group technology known as "Cellular Manufacture" and consists in forming diagonal blocks on an incidence matrix that represents which parts pass through which machines during their manufacturing process. The present paper is a solution to this problem in the industrial environment, using a genetic algorithm along with a local search meta-heuristic. In literature there are many proposed solutions to this problem based on different approaches. The main goal is to get results at least as good as the existing ones, being capable of deal with restrictions on number of machines by cell, total number of cells, machines that must be together and machines that must be apart.

Keywords: group technology, manufacture cell, genetic algorithm, local search, restrictions

Lista de Figuras

Figura 1 – Arranjo das Máquinas em um ambiente de Estações de Trabalho . . .	5
Figura 2 – Arranjo das máquinas em um ambiente de manufatura celular	6
Figura 3 – Matriz de Incidência e Matriz de Sequência	7
Figura 4 – Reorganização da Matriz de Incidência - ANTES	8
Figura 5 – Reorganização da Matriz de Incidência - DEPOIS	9
Figura 6 – Peça Gargalo	9
Figura 7 – Movimentos Intercelulares e Peças Gargalo	10
Figura 8 – Restrição de número de Células	11
Figura 9 – Cálculo da Eficácia do Agrupamento de uma Matriz	12
Figura 10 – Reprodução com Ponto Único	15
Figura 11 – Reprodução com Ponto Duplo	15
Figura 12 – Reprodução com Máscara	16
Figura 13 – Mutação	16
Figura 14 – Decodificação de um Indivíduo	21
Figura 15 – Formação da População	22
Figura 16 – Busca Local	23
Figura 17 – Problema 1 - Matriz Original	24
Figura 18 – Problema 1 - Resultado da Literatura	25
Figura 19 – Problema 1 - Resultado Tabu	26
Figura 20 – Problema 1 - Resultado do AG	27
Figura 21 – Problema 1 - Acompanhamento do AG	28
Figura 22 – Problema 2 - Matriz Original	29
Figura 23 – Problema 2 - Resultado da Literatura	30
Figura 24 – Problema 2 - Resultado Tabu	30
Figura 25 – Problema 2 - Resultado do AG	31
Figura 26 – Problema 2 - Acompanhamento do AG	31
Figura 27 – Problema 3 - Matriz Original	32
Figura 28 – Problema 3 - Resultado da Literatura	33
Figura 29 – Problema 3 - Resultado Tabu	33
Figura 30 – Problema 3 - Resultado do AG	34
Figura 31 – Problema 3 - Acompanhamento do AG	35
Figura 32 – Problema 4 - Matriz Original	36
Figura 33 – Problema 4 - Resultado da Literatura	37
Figura 34 – Problema 4 - Resultado Tabu	38
Figura 35 – Problema 4 - Resultado do AG	39
Figura 36 – Problema 4 - Acompanhamento do AG	40

Figura 37 – Problema 5 - Matriz Original	42
Figura 38 – Problema 5 - Resultado da Literatura	43
Figura 39 – Problema 5 - Resultado Tabu	44
Figura 40 – Problema 5 - Resultado do AG	45
Figura 41 – Problema 5 - Acompanhamento do AG	46

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Comparação de Resultados do Problema 1.	28
Tabela 2 – Comparação de Resultados do Problema 2.	31
Tabela 3 – Comparação de Resultados do Problema 3.	35
Tabela 4 – Comparação de Resultados do Problema 4.	40
Tabela 5 – Comparação de Resultados do Problema 5.	46

Lista de Abreviaturas e Siglas

ICM	Inter Cell Movement (Movimento Intercelular)
AG	Algoritmo Genético

Sumário

1 – Introdução	1
1.1 Justificativa	2
1.2 Objetivos	2
2 – Estado da Arte	3
3 – Fundamentação Teórica	5
3.1 Conceituação	5
3.2 Matriz de Incidência e Matriz de Sequência	6
3.3 Processo de Agrupamento	8
3.4 Restrições	10
3.5 Avaliação de um Agrupamento	11
3.6 Ambiente Celular: Empresa Única e Múltiplas Empresas	13
3.7 Algoritmos Genéticos	14
4 – Metodologia	18
4.1 Etapas	18
5 – Resultados	20
5.1 Adaptando o problema de formação de Células de Manufatura ao Algoritmo Genético	20
5.2 Apresentação dos resultados numéricos	23
5.2.1 Problema 1	23
5.2.2 Problema 2	29
5.2.3 Problema 3	32
5.2.4 Problema 4	36
5.2.5 Problema 5	41
6 – Conclusão	48
6.1 Trabalhos futuros	48
Referências	50

1 Introdução

Atualmente existem diversos processos produtivos que demandam a renovação de sua linha de montagem periodicamente. Isto decorre como consequência do rápido processo de evolução tecnológica pelo qual vários setores da indústria têm passado.

Indústrias que fabricam peças para computadores são um exemplo de linhas de montagem que se tornam obsoletas periodicamente, pois geralmente as máquinas capazes de desenvolver certo tipo de peça não conseguem acompanhar as inovações tecnológicas da empresa e em algum ponto não serão capazes de desenvolver o produto mais atual da mesma. Faz-se então necessária a renovação da linha de montagem e esse processo deve ser feito de forma eficiente para não impactar no processo de fabricação.

É importante que o posicionamento do maquinário no chão de fábrica ocorra de forma eficiente para que o processo de manufatura e qualidade do produto final não sejam prejudicados. Para auxiliar tal posicionamento as similaridades entre máquinas e peças podem ser estudadas e aplicadas, tal conceito é conhecido como Tecnologia de Grupo ([HERAGU; GUPTA, 1994](#)).

O foco deste trabalho é a utilização de uma técnica conhecida como Manufatura Celular, que é uma aplicação da filosofia das Tecnologias de Grupo e tem como objetivo gerar agrupamentos conhecidos como células, baseados nas similaridades dos produtos a serem fabricados ([HERAGU, 1994](#)). Idealmente, espera-se que cada célula contenha o processo completo de manufatura de determinada família de peças.

As células formadas devem se adequar às restrições físicas reais do projeto e ao mesmo tempo minimizar o movimento dos produtos entre as células, para que o modelo possa ser considerado eficiente.

Embora o trabalho não trate do assunto de Cadeias de Suprimento, a Manufatura Celular pode contribuir com uma nova organização de forma a ser estruturada como uma cadeia, onde cada célula ou conjunto de células podem ser incorporadas por uma empresa e/ou serviço de terceirização. Neste contexto, de um ponto de vista macro, é possível ver cada célula da linha de montagem como um grupo semi-independente. Desse modo a empresa pode descentralizar a produção, tornando as suas linhas de montagem menos robustas e mais especializadas. As empresas contratadas para terceirização poderão ser mais aptas para lidar com a parte do processo que lhes for atribuída, pois serão empresas focadas justamente naquela parte do processo. Isso tende a afetar positivamente a qualidade final do produto, mesmo que o tempo de movimentação do produto entre as empresas e os gastos com o traslado possam ser maiores.

1.1 Justificativa

O trabalho desenvolvido foi motivado pela crescente demanda das indústrias por formas de se reorganizarem rapidamente.

Os avanços tecnológicos dos últimos anos revolucionaram o modo como os produtos, principalmente na área de informática, são “consumidos”. Frequentemente são lançados novos produtos, com um processo de manufatura cada vez mais complexo, fato que demanda uma constante renovação das linhas de montagem, para possibilitar a produção de novas peças.

A utilização da Manufatura Celular pode gerar agrupamentos de máquinas que melhorem o processo e a qualidade final do produto, atendendo assim à demanda do mercado.

1.2 Objetivos

Este trabalho visa implementar uma solução para o problema da formação de células de manufatura utilizando um algoritmo genético em conjunto com uma heurística de busca local.

Objetiva-se implementar uma solução que permita lidar com as restrições físicas impostas pelo projeto de chão de fábrica. Os resultados finais obtidos devem ser semelhantes ou preferencialmente melhores aos já encontrados na literatura. Também é objetivo do trabalho implementar uma interface que permita a análise dos resultados e a entrada de dados de forma fácil, além de gerar um gráfico para acompanhamento do processo do algoritmo genético. É válido ressaltar que este é um objetivo secundário, porém acrescenta muito ao trabalho em termos de usabilidade.

2 Estado da Arte

A Manufatura Celular é um conceito que foi criado e implantado pela Toyota na década de 70, sendo alvo de estudo de áreas como Logística, Administração e Engenharias em geral (MONDEN, 2012).

Os indianos Heragu e Gupta contribuíram muito para os estudos na área, desenvolvendo diversos trabalhos nos anos 90. Em um dos seus trabalhos “Group Technology and Cellular Manufacturing” (HERAGU; GUPTA, 1994) eles abordaram os conceitos elementares da divisão de um chão de fábrica em células. O foco do trabalho publicado por eles não foi propor um modo de solucionar o problema de formação dos blocos diagonais e sim conceituar o tema por meio de esquemas e modelos matemáticos.

O artigo “A Tabu Search Approach to Cellular Manufacturing Systems” (ONWUBOLU; SONGORE, 2000) abordou a utilização da heurística Tabu Search para solução do problema da Manufatura Celular. Essa heurística consiste em tomar uma solução em potencial para o problema e compará-la com seus vizinhos imediatos (soluções similares) para obter uma otimização do resultado. A mesma técnica foi utilizada por Rodrigues (1997) no artigo "Problema de Especificação de Células de Manufatura na presença de Restrições de Projeto - Uma abordagem baseada em Tabu Search" e os resultados obtidos foram usados nas comparações de resultado deste trabalho.

O artigo “Research on Autonomous Management Pattern of Cellular Manufacturing” (ZHANG; LI, 2010), aborda o conceito de células de manufatura interpretadas como pequenas empresas especializadas na sua parte do processo. Essas pequenas empresas possuem autonomia nas suas decisões internas e fazem parte de uma cadeia maior, comandada por uma empresa-líder que coordena o processo de produção. Tal processo baseado em cadeias de comando é comparado com o processo de produção de uma empresa que utiliza a manufatura celular apenas nos seus setores. No artigo percebe-se as vantagens e desvantagens de cada sistema e quando é benéfico utilizar cada um. Embora o tema não seja tratado mais profundamente neste trabalho, é interessante perceber uma possível extensão para este projeto. Este tema é também abordado no trabalho “Metodologia para formação de parceria em Cadeia de Suprimentos: enfoque por similaridade entre atividades” (RODRIGUES, 2005).

Com o passar do tempo as técnicas de agrupamento foram evoluindo, graças às inovações no campo da computação. Computadores cada vez mais poderosos possibilitaram a geração de arranjos mais complexos, lidando com uma grande quantidade de variáveis e dando margem para a incorporação das mais diversas restrições, que representam as limitações físicas do projeto real. Com isso, os modelos computacionais

puderam se aproximar cada vez mais da realidade encontrada nas empresas.

Atualmente podem-se encontrar vários trabalhos utilizando técnicas de Inteligência Artificial e metas-heurísticas, como por exemplo o artigo “Um algoritmo evolutivo híbrido para a formação de células de manufatura em sistemas de produção” (TRINIDADE; OCHI, 2006). Nesse trabalho é proposto um Algoritmo Genético em conjunto com uma Heurística de Busca Local e Heurística Construtiva. Para medir a qualidade dos indivíduos utilizados no AG, foi usada a função de Eficácia do Agrupamento (KUMAR; CHANDRASEKHARAN, 1990) que também é utilizada neste trabalho.

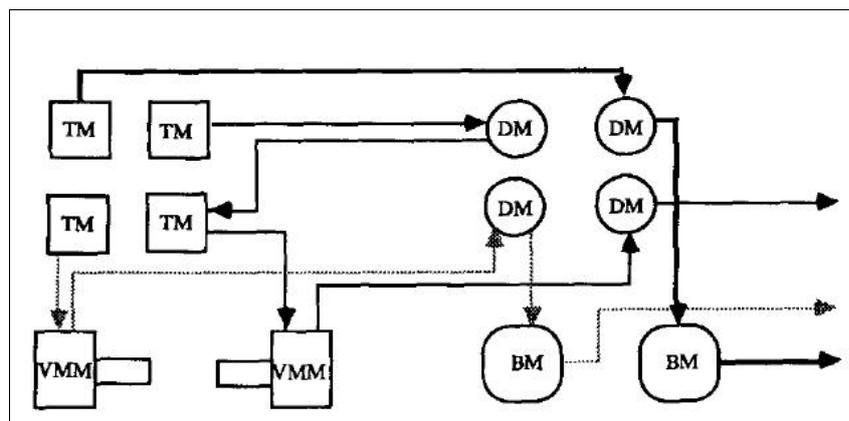
A utilização de algoritmos inteligentes e evolutivos ainda vem sendo estudada, na tentativa de conseguir elaborar agrupamentos otimizados para os problemas mais complexos, onde os algoritmos antigos possuíam um desempenho de menor qualidade quando comparado aos atuais.

3 Fundamentação Teórica

3.1 Conceituação

De acordo com [Heragu \(1994\)](#), “Tecnologia de Grupo é uma filosofia de gerenciamento que tenta agrupar produtos com design e/ou características de manufatura similares”. O posicionamento do maquinário baseado em Estações de Trabalho é uma aplicação da Tecnologia de Grupo, onde as máquinas são agrupadas de acordo com suas similaridades funcionais, ou seja, máquinas que realizam tarefas similares ficam próximas umas das outras. Em algumas situações, tal agrupamento atrapalha o fluxo das peças e torna o processo confuso, como pode ser visto na [Figura 1](#), onde TM, DM, BM e VMM representam máquinas com diferentes funções e as setas mostram o caminho das peças por essas máquinas no processo de manufatura.

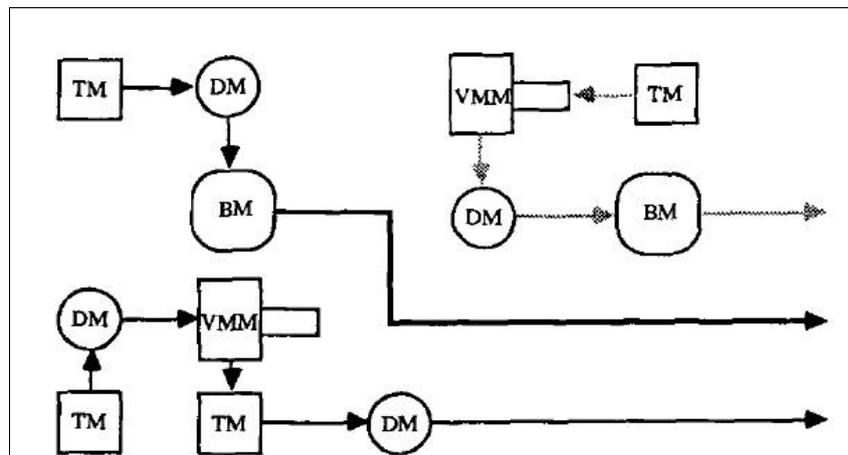
Figura 1 – Arranjo das Máquinas em um ambiente de Estações de Trabalho



Fonte: [Heragu \(1994\)](#)

Para melhorar o fluxo e simplificar o processo foram criados os Sistemas de Manufatura Celular, que são outra aplicação das Tecnologias de Grupo ([HERAGU, 1994](#)). A Tecnologia de Grupo é definida como uma filosofia de fabricação para melhorar a produtividade em sistema de produção em lote ([SRINIVASAN; NARENDRAN, 1991](#)). Nas empresas que trabalham com Manufatura Celular, as máquinas são organizadas em grupos denominados “células”, de acordo com a família de peças com as quais as mesmas trabalham. Assim cada célula fica responsável por um tipo de peça, tendo máquinas com diversas funcionalidades diferentes para atender ao fluxo completo de manufatura daquela família pela qual é responsável. A [Figura 2](#) exemplifica um arranjo de Manufatura Celular adotado no mesmo ambiente da [Figura 1](#), é bastante perceptível que o fluxo, representado pelas setas, não se interpõe em nenhum ponto e que cada fluxo completo está completamente isolado dos outros.

Figura 2 – Arranjo das máquinas em um ambiente de manufatura celular



Fonte: [Heragu \(1994\)](#)

Ainda de acordo com [Heragu \(1994\)](#), o uso da Manufatura Celular pode trazer diversos benefícios para as empresas que empregam tal recurso, entre os quais podem-se destacar:

- Redução no tempo de Setup;
- Melhoria na qualidade final das peças;
- Melhoria no fluxo de produção;

A redução do tempo de Setup é crucial para empresas que fabricam equipamentos tecnológicos, pois as suas linhas de montagem se tornam obsoletas com maior frequência e o tempo gasto para renovação das mesmas não pode ser grande, pois é um período improdutivo.

A melhora na qualidade final das peças é consequência das células especializadas, pois os empregados designados para cada célula acompanham o processo completo de fabricação da peça, sendo assim mais aptos para identificar eventuais falhas.

O fluxo de produção de determinado tipo de peça fica centrado na sua célula, dividindo assim o chão de fábrica em “clusters” bem organizados. Busca-se ter um movimento intercelular mínimo para que o fluxo seja bem direcionado dentro da célula que o contém, e não interfira no fluxo das outras células ([HERAGU, 1994](#)).

3.2 Matriz de Incidência e Matriz de Sequência

A maioria dos artigos encontrados na literatura trata a matriz que relaciona Peças e Máquinas como uma matriz de incidência. A matriz de incidência utiliza “1”s

para indicar que uma peça passa por determinada máquina e “0”s ou nulos para indicar que a peça não passa. Este modelo é adequado para algumas situações onde o fluxo de produção da peça não interfere no processo, ou seja, não existe um roteiro determinando a sequência. Porém em modelos mais complexos onde a ordem pela qual as peças passam nas máquinas é importante, faz-se necessária a utilização da Matriz de Sequência. As matrizes contêm números de 1 a **N**, onde **N** é o número total de máquinas por onde a peça passa. O roteiro de máquinas é definido em ordem crescente, ou seja, a peça em questão passa primeiro na máquina assinalada com o número 1 na matriz, depois segue para a assinalada com o número 2 e assim por diante. Nos casos onde há 0s ou nulos a peça não passa pela máquina (HERAGU, 1994).

A Figura 3 representa uma matriz de Incidência e uma de Sequência respectivamente. Percebe-se que na matriz de Incidência a peça **P1** deve passar pelas máquinas **M1**, **M4** e **M6**. Não importa a ordem na qual ela passa pelas máquinas, o importante para o processo é que ela passe por todas as assinaladas. Já na matriz de Sequência a peça **P1** deve passar pela máquina **M1**, depois pela **M4** e finalmente pela **M6**, única e exclusivamente nesta ordem. Fica claro que a matriz de Incidência é mais flexível, já que para a peça **P1** são permitidas 3! possibilidades de roteiro diferentes, ao passo que a matriz de Sequência permite apenas um roteiro.

Figura 3 – Matriz de Incidência e Matriz de Sequência

		Matriz de Incidência									Matriz de Sequência						
		M a c h i n e									M a c h i n e						
		M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆	M ₇			M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆	M ₇
P e ç a r o t e i r o	P ₁	1			1		1				1			2		3	
	P ₂		1	1		1					3	1		2			
	P ₃				1		1							1		2	
	P ₄		1	1							2	1					
	P ₅			1									2				1
	P ₆		1			1						1			3		2

Fonte: Adaptado de Heragu (1994)

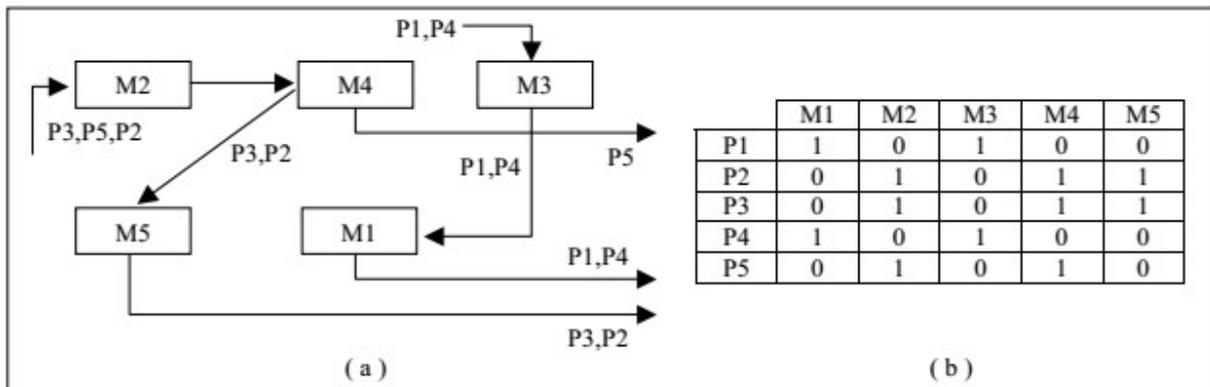
Nos casos onde a Matriz de Sequência é utilizada pode haver a possibilidade de um Movimento Intercelular (ICM) extra se a máquina que pertence ao fluxo e está em outra célula não for a última do processo. Neste caso haverá dois movimentos: um para levar a peça para outra célula e outro para retornar com ela para a sua célula principal para continuação do fluxo. Porém, se a última máquina no fluxo de produção da peça estiver em outra célula, há apenas um ICM.

Tal fato torna o processo de formação de células em Matrizes de Sequência mais complexo de ser realizado.

3.3 Processo de Agrupamento

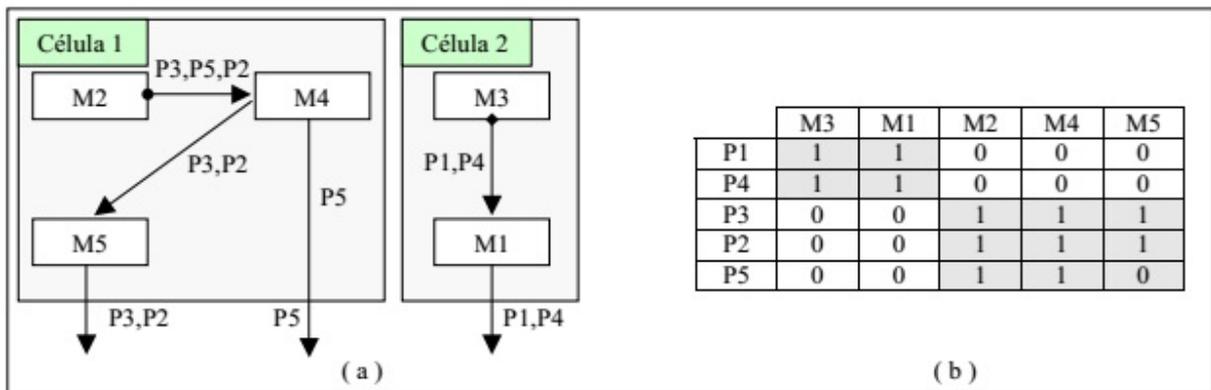
O processo de agrupamento consiste em reorganizar a matriz que relaciona as peças com as máquinas que fazem parte do processo de manufatura das mesmas. Tal reorganização deve ser feita de modo que os pontos de incidência da matriz fiquem agrupados pela extensão da diagonal principal em blocos. Cada bloco é então separado e recebe a denominação de “Célula”. A Figura 4 mostra um conjunto de máquinas com o fluxo de peças que passa por elas e a Matriz de Incidência correspondente antes da reorganização. A Figura 5 mostra o mesmo conjunto de máquinas da Figura 4 porém depois do processo de formação de blocos diagonais na Matriz de Incidência. Pode-se perceber que a estrutura da matriz permanece a mesma, apenas as linhas e colunas foram movimentadas para colocar os pontos de incidência na diagonal principal.

Figura 4 – Reorganização da Matriz de Incidência - ANTES



Fonte: Rodrigues (2005)

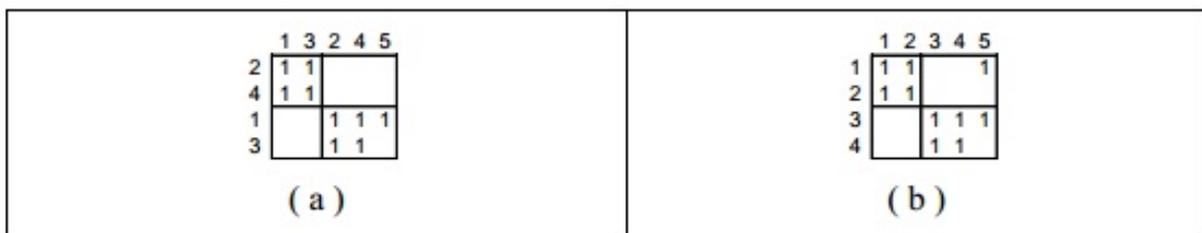
Figura 5 – Reorganização da Matriz de Incidência - DEPOIS



Fonte: Rodrigues (2005)

Em alguns casos é impossível reorganizar a matriz de modo que todos os relacionamentos Peça/Máquina fiquem dentro de algum bloco. Esses casos de relacionamentos que ficam de fora das Células são denominados peças gargalo e podem gerar Movimento Intercelular (KUSIAK, 1990). Um exemplo de peça gargalo pode ser visto na Figura 6: no lado (a) foram formadas duas células sem nenhum ICM, pois todas as peças estão contidas em alguma célula. No lado (b) também foram formadas duas células, porém a Peça 1 deve passar pelas Máquinas 1 e 2 que estão na primeira célula e pela Máquina 5 que está na segunda célula gerando o ICM.

Figura 6 – Peça Gargalo



Fonte: KUSIAK (1990)

Nem toda peça gargalo gera Movimento Intercelular. Como mostra a Figura 7, a peça P7 gera um ICM apenas, apesar de passar por duas máquinas fora da célula na qual ela está alocada. Isto acontece porque as máquinas M1 e M2 estão na mesma célula. Portanto, quando a peça P7 sair da célula na qual ela está alocada, será necessário apenas um movimento, e então ela passará pelas duas máquinas aproveitando apenas este movimento. O mesmo não ocorre com a peça P12, pois ela deve passar pelas máquinas M1 e M4 que estão em células distintas. Durante o processo, a peça P12 terá que sair da sua célula, realizar um movimento para ir para uma das duas máquinas e depois

realizar outro para ir para a outra máquina, resultando em dois ICM. Portanto, este exemplo apresenta três peças gargalo e quatro ICM.

Figura 7 – Movimentos Intercelulares e Peças Gargalo

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
P1	1	1					
P2	1	1				1	
P3	1						
P4	1	1					
P5			1	1			
P6			1				
P7	1	1	1	1			
P8			1	1			
P9				1			
P10					1	1	1
P11					1	1	1
P12	1			1	1		1
P13					1	1	1
P14					1		1

Fonte: Autor

O problema das peças gargalo deve ser minimizado, pois o ICM gera muitos gastos e atrapalha o fluxo. Em alguns casos é mais viável duplicar uma máquina onde há peça gargalo, para não haver desvios no processo. Contudo, o custo de duplicação de máquina também pode ser caro.

3.4 Restrições

Para que os resultados obtidos na forma matricial se adequem bem à realidade, faz-se necessário a incorporação das restrições físicas do projeto no processo de formação das células. Algumas restrições foram citadas por [Heragu \(1992\)](#), [Heragu e Gupta \(1994\)](#) e [Heragu \(1994\)](#):

- Limitação de quantidade de células
- Tamanho máximo das células
- Máquinas que devem ficar juntas
- Máquinas que devem ficar separadas

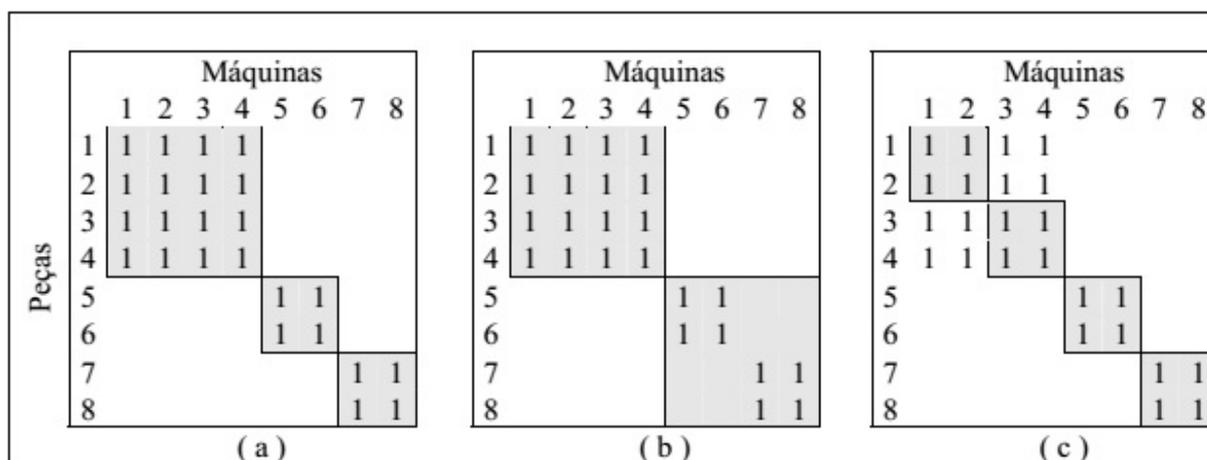
Tais restrições não devem ser ignorados na hora de realizar os agrupamentos se for desejável uma configuração próxima do real. De nada adianta um fluxo otimizado

que não pode ser implementado por extrapolar as capacidades físicas e financeiras da empresa.

É importante ressaltar que as restrições de limitação de quantidade de células e tamanho máximo das células podem ser rígidas ou flexíveis. Neste contexto, uma restrição é flexível quando estabelece um limite máximo para os resultados encontrados. Uma restrição é rígida quando o resultado só é aceito se for igual ao valor da restrição. Para exemplificar pode-se considerar uma restrição de quantidade de células flexível onde se define que o máximo será 4. Neste caso serão aceitos resultados com 4, 3 ou 2 células (considera-se que um agrupamento que possui apenas uma célula não é um agrupamento válido), porém se a restrição fosse rígida só seriam aceitos resultados com exatamente 4 células.

Na [Figura 8](#), pode-se ver um exemplo de restrição de número de células. Percebe-se que tal restrição pode influenciar diretamente na qualidade do agrupamento, pois o nível de utilização de uma célula pode se tornar ruim caso a mesma possua espaços não utilizados (0s). A Matriz (a) apresenta uma boa formação com 3 células. A matriz (b), que é restrita a ter no máximo 2 células, apresenta uma utilização inferior à da matriz (a), pois engloba 0s dentro das células. A matriz (c), que é restrita a ter no máximo 4 células e por isso acaba gerando movimentos intercelulares, inadequados ao processo de manufatura celular.

Figura 8 – Restrição de número de Células



Fonte: [Rodrigues \(2005\)](#)

3.5 Avaliação de um Agrupamento

Para avaliar o quão eficaz é um agrupamento [Kumar e Chandrasekharan \(1990\)](#) propuseram uma função conhecida como "Eficácia do Agrupamento". Esta função permite obter um valor numérico que representa a "qualidade" do agrupamento ge-

rado, levando em consideração a quantidade de Movimentos Intercelulares e o bom aproveitamento das células. A “Eficácia do Agrupamento” pode ser definida como na Equação (1):

$$\mu = \frac{N_1 - N_1^{Fora}}{N_1 + N_0^{Dentro}} \quad (1)$$

Onde:

- N_1 é a quantidade de 1s em toda a matriz;
- N_1^{Fora} é a quantidade de 1s que estão fora dos blocos diagonais. Cada um desses é uma peça gargalo;
- N_0^{Dentro} é a quantidade de 0s dentro dos blocos diagonais. Cada zero 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;

Quanto mais próximo de 1, melhor a Eficácia do Agrupamento. Se algum indivíduo apresentar Eficácia igual a 1 o agrupamento foi perfeito, pois não gerou nenhum ICM e não deixou nenhum espaço vazio dentro das células. A Figura 9 exemplifica o cálculo da Eficácia do Agrupamento de uma matriz reorganizada em 3 células.

Figura 9 – Cálculo da Eficácia do Agrupamento de uma Matriz

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

N_1	= 29	
N_0^{Dentro}	= 2	$\mu = 0.806$
N_1^{Fora}	= 4	

Fonte: Autor

Percebe-se que a quantidade de 1s fora das células tem mais peso do que a quantidade de zeros dentro das células, priorizando assim a redução das peças gargalo

implicitamente. Por exemplo: para um agrupamento de uma matriz com dez 1s, que possui dois 1s fora das células e nenhum zero dentro das células, o cálculo da Eficácia se é tratado como:

$$\mu = \frac{10 - 2}{10 + 0} = \frac{8}{10} = 0,8 \quad (2)$$

Já para uma segunda forma de agrupamento sobre a mesma matriz, agora com nenhum 1 fora das células e dois 0s dentro das células, o cálculo da Eficácia se dá como:

$$\mu = \frac{10 - 0}{10 + 2} = \frac{10}{12} = 0,833 \quad (3)$$

Portanto o segundo agrupamento é melhor já que a Eficácia do Agrupamento é maior. Apesar de eliminar os dois Movimentos Intercelulares do primeiro agrupamento, ele possui duas máquinas mal utilizadas, porém isto não faz com que ele tenha uma Eficácia pior ou igual, já que o peso dos ICM é maior.

3.6 Ambiente Celular: Empresa Única e Múltiplas Empresas

Atualmente, o estudo da manufatura celular tem contribuído para a formação/configuração de cadeias de suprimento. Esta formação/configuração pode iniciar-se por um processo de Manufatura Celular, onde cada célula pode adquirir certa autonomia. Com isso os responsáveis pela célula podem tomar decisões referentes ao processo da mesma, desde que essas decisões não influenciem no processo de manufatura como um todo. Ainda assim deve haver um setor responsável por coordenar o processo geral e avaliar a qualidade final do produto (ZHANG; LI, 2010).

Existem casos onde o processo de manufatura de determinadas células é muito complexo. Para amenizar tal adversidade pode ser formada uma aliança entre empresas, como foi estudado por Rodrigues (2005), gerenciadas por uma empresa líder que será responsável pelo produto final. Cada participante da aliança será responsável por uma célula ou grupo de células de acordo com suas especialidades. Assim a qualidade das peças tende a ser maior, pois elas serão fabricadas por uma empresa focada e especializada nesse segmento.

A terceirização dos serviços também pode ser benéfica quando se trata da renovação de uma célula, pois ao invés de ter que comprar novas máquinas, a empresa líder pode simplesmente fazer um novo contrato com uma empresa que atenda às suas necessidades.

Apesar disso, quando se trata de um ambiente multi-empresas, a coordenação do processo como um todo pode ser custosa para a empresa líder (ZHANG; LI, 2010), por ter que lidar com diferentes empresas, separadas algumas vezes por grandes distâncias.

O Movimento Intercelular deve ser evitado ao máximo, pois se uma peça tiver que viajar de uma empresa para outra para completar seu processo de manufatura, os custos se tornam muito elevados e o tempo gasto no traslado pode tornar o processo inviável.

3.7 Algoritmos Genéticos

Algoritmos Genéticos (AGs) são heurísticas de busca que se baseiam no processo de evolução natural de uma população. O tema foi tratado pela primeira vez por Holland (1992) e hoje possui diversas aplicações na Engenharia, Matemática e nas pesquisas computacionais.

Em um AG, cada possível solução para o problema é vista como um indivíduo ou cromossomo. Os indivíduos são divididos em partes conhecidas como genes (HOLLAND, 1992).

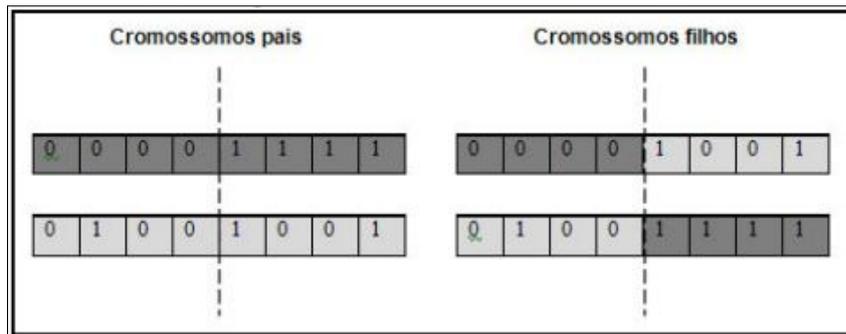
Para avaliar e ranquear estes indivíduos, é definida uma função objetivo que também é conhecida como fitness. Esta função objetivo varia de problema para problema de acordo com o que os indivíduos representam. Por exemplo, em um AG onde os indivíduos representam soluções para um problema de distâncias entre dois pontos e deseja-se obter a mínima distância possível, a função objetivo será justamente o cálculo dessa distância e os indivíduos serão ranqueados de modo com que os que possuem menor valor de fitness fiquem como os melhores da população.

Cada iteração completa do algoritmo é chamada de Geração e em cada geração é criada uma população com uma quantidade fixa de indivíduos. Ao final de cada Geração os indivíduos mais bem ranqueados são selecionados para compor parte da próxima Geração. A este processo dá-se o nome de elitismo, que consiste em preservar os melhores indivíduos de cada população.

A reprodução é o processo no qual dois indivíduos são cruzados para gerar dois novos indivíduos para a próxima geração. A idéia da reprodução é propagar as características positivas dos indivíduos mais aptos da população (ROSA; LUZ, 2009). Existem diversos métodos de reprodução, sendo os mais populares:

- Ponto Único: É definido um ponto de corte aleatório e o material genético é dividido entre os dois novos indivíduos. O primeiro indivíduo recebe parte de um dos pais e, a partir do ponto de corte, parte do outro pai, ao passo que o segundo indivíduo recebe de maneira inversa, como pode ser visto na Figura 10.

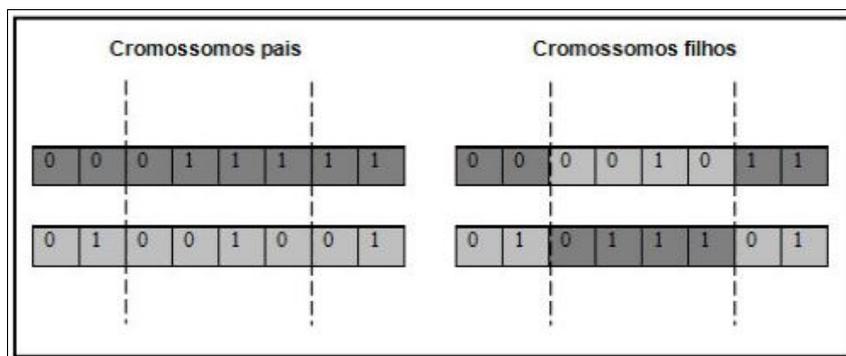
Figura 10 – Reprodução com Ponto Único



Fonte: ROSA e LUZ (2009)

- Ponto Duplo: São definidos dois pontos de corte aleatórios e o material genético é dividido entre os dois novos indivíduos de forma intercalada, como pode ser visto na Figura 11.

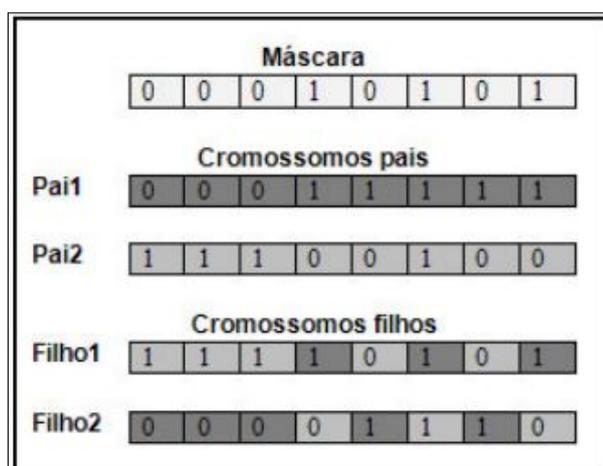
Figura 11 – Reprodução com Ponto Duplo



Fonte: ROSA e LUZ (2009)

- Máscara: É definida uma máscara de 1s e 0s aleatoriamente. Onde o valor da máscara for 1, um dos indivíduos recebe genes de um dos pais e onde o valor da máscara for 0, este mesmo indivíduo recebe genes do outro pai. O outro indivíduo recebe o material genético de forma inversa. Um exemplo do uso de máscaras para a reprodução pode ser visto na Figura 12.

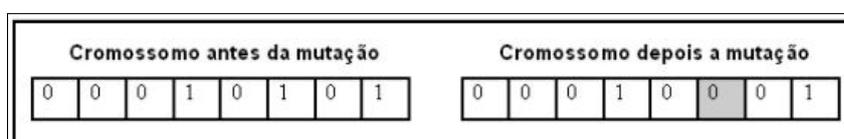
Figura 12 – Reprodução com Máscara



Fonte: ROSA e LUZ (2009)

A mutação é um operador que serve para impedir a convergência prematura de um AG. A convergência ocorre quando, devido ao processo de refinamento do AG, os indivíduos tendem a ficar muito semelhantes ou até mesmo iguais. Isto acontece porque o AG prioriza os indivíduos com melhor fitness, passando-os de geração para geração. Deste modo os indivíduos vão se tornando similares e ao se cruzar indivíduos similares há grandes chances de se obter filhos semelhantes aos pais. Com o passar das gerações pode ocorrer que todos os indivíduos da população se tornem iguais e o AG fique preso nessa solução. Para evitar isto o operador de mutação insere material genético novo, tomando indivíduos aleatoriamente e modificando algum de seus genes para que possa haver variedade. A figura [Figura 13](#) mostra um indivíduo sofrendo uma mutação.

Figura 13 – Mutação



Fonte: ROSA e LUZ (2009)

Os indivíduos gerados na reprodução e na mutação são inseridos na próxima geração. O algoritmo segue até que um indivíduo ótimo seja gerado ou até que o número máximo de gerações seja alcançado. Neste caso, o indivíduo mais bem ranqueado é selecionado como solução do problema.

Pode-se resumir um AG nos seguintes passos:

1. É gerada uma população inicial de indivíduos aleatórios;

2. Cada indivíduo da população atual é ranqueado de acordo com sua aptidão para solução ótima do problema. Se um indivíduo perfeito for encontrado o AG é encerrado (ROSA; LUZ, 2009);
3. Os melhores indivíduos da população atual são copiados na próxima população pelo Elitismo;
4. São selecionados indivíduos para serem "pais", dando prioridade para os indivíduos mais bem avaliados. Estes indivíduos são então cruzados, gerando um novo par de indivíduos que herdam suas características e são inseridos na próxima população;
5. O operador de mutação é aplicado em alguns indivíduos da população principal e os indivíduos gerados são alocados na próxima população (CATARINA; BACH, 2003);
6. Se o número máximo de gerações ainda não foi atingido a próxima população se torna a atual e o AG volta ao Passo 2.

É importante perceber que esta abordagem toma indivíduos aleatórios como solução inicial e aplica sobre eles um processo de seleção natural na tentativa de refinar os resultados e obter uma solução ótima ou tão próxima da ótima quanto possível.

4 Metodologia

O desenvolvimento deste trabalho teve como base uma série de etapas que envolveram desde o estudo e compreensão dos conceitos da Manufatura Celular até o desenvolvimento de um Algoritmo Genético para solução do problema em questão.

4.1 Etapas

As etapas presentes na construção do projeto foram as seguintes:

1. Estudo dos conceitos de Manufatura Celular. Uma das principais partes do trabalho foi o conhecimento dos processos de manufatura celular. Nesse aspecto os artigos "Group Technology and Cellular Manufacturing"([HERAGU, 1994](#)) e "Research on Autonomous Management Pattern of Cellular Manufacturing"([ZHANG; LI, 2010](#)) foram de suma importância. O primeiro por abordar o tema de uma forma mais conceitual e o segundo por introduzir uma nova perspectiva sobre o tema: o ambiente multi-empresas.
2. Estudo de algoritmos para solução do problema. Nesta etapa do processo, o enfoque foram artigos que propunham soluções para o problema de Manufatura Celular. Vale a pena destacar Tabu Search, Busca Local, Redes Neurais e Algoritmos Genéticos como soluções bastante exploradas. Pôde-se perceber que os algoritmos híbridos (que combinam duas ou mais Heurísticas) foram os que obtiveram os melhores resultados computacionais, como pode ser visto nos artigos "Um algoritmo evolutivo híbrido para a formação de células de manufatura em sistemas de produção"([TRINDADE; OCHI, 2006](#)), "An evolutionary algorithm for manufacturing cell formation"([GONÇALVES; RESENDE, 2004](#)) e "Algoritmo genético construtivo aplicado ao projeto de células de manufatura"([FILHO; LORENA, 2001](#)).
3. Estudo de algoritmos genéticos. Após a fase de estudo de soluções, foi decidido a implementação de um Algoritmo Genético, portanto foi necessária essa etapa extra para uma compreensão aprofundada acerca dessa heurística. Um artigo importante foi "Conceitos Básicos de Algoritmos Genéticos: Teoria e Prática"([ROSA; LUZ, 2009](#)) que trata dos conceitos gerais dos Algoritmos Genéticos.
4. Adaptação do problema. O estudo dos Algoritmos Genéticos trouxe a percepção de que seria necessário um esforço a mais para adaptar o problema de Manufatura Celular para que um Algoritmo Genético pudesse ser utilizado no mesmo.

Com base no artigo "An evolutionary algorithm for manufacturing cell formation"(GONÇALVES; RESENDE, 2004) foram definidas as regras para a adaptação.

5. Codificação. A linguagem escolhida para a codificação foi C#. Nessa etapa foram aplicadas as regras definidas na etapa anterior para adaptar o problema ao AG. O AG foi construído de forma a ser parametrizável e com o objetivo de fazer a divisão das máquinas em Células de Manufatura. Para a divisão das peças nas Células, foi utilizada a Busca Local.
6. Comparação de resultados. Para averiguar se a implementação obteve bons resultados foi feita uma comparação dos resultados obtidos pela mesma com os resultados já existentes na literatura. O parâmetro de comparação a ser utilizado foi a quantidade de movimentos intercelulares e de peças gargalo.
7. Conclusão. Com os resultados em mãos definidos os pontos fortes e fracos da implementação, bem como as possíveis extensões para o trabalho.

5 Resultados

Antes de iniciar a discussão das comparações de resultados e desempenho do algoritmo, será realizada uma descrição da adaptação do problema ao AG, já que, para que bons resultados possam ser obtidos, deve haver uma boa adaptação do problema proposto ao modelo do algoritmo.

5.1 Adaptando o problema de formação de Células de Manufatura ao Algoritmo Genético

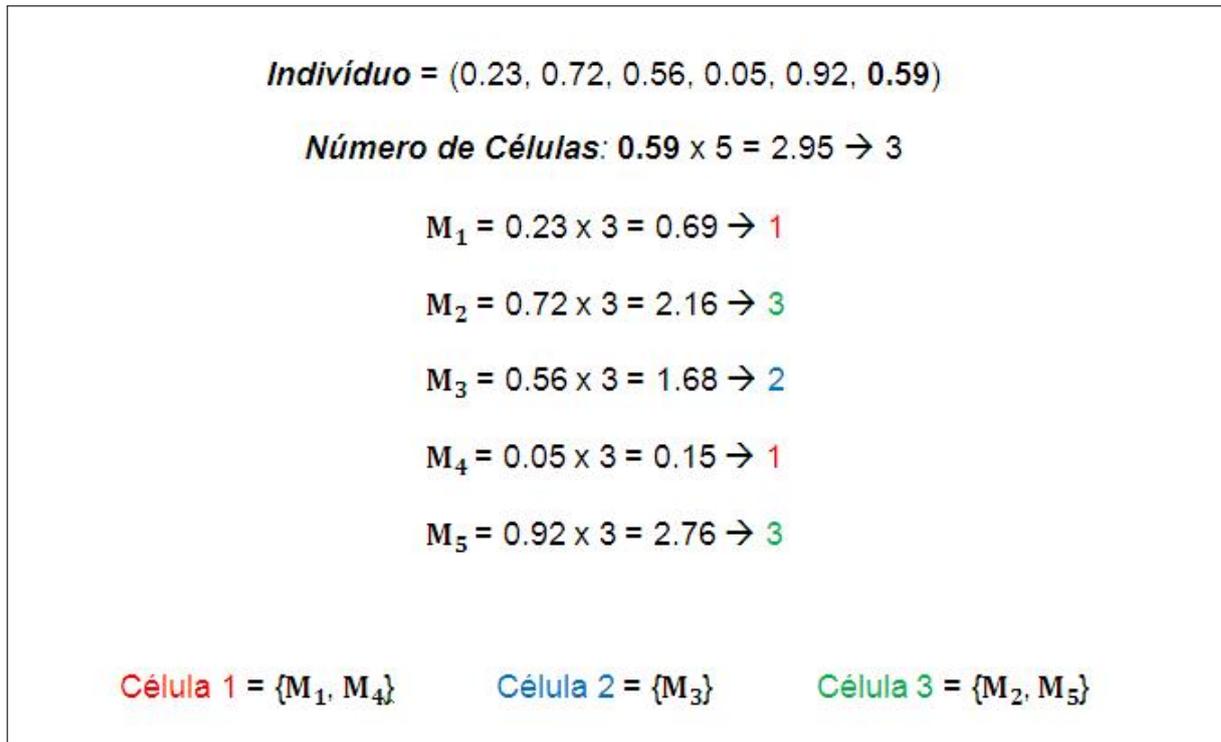
Baseado no artigo de [Gonçalves e Resende \(2004\)](#), o problema foi adaptado para que cada indivíduo fosse representado por um vetor de $M+1$ números entre 0.1 e 1, onde M representa a quantidade de máquinas. Cada valor no vetor representa em qual célula a máquina está e o índice representa o número da máquina. A última posição do vetor define a quantidade de células que a solução terá.

Para decodificar um indivíduo, o primeiro passo é descobrir quantas células terá a solução do problema, multiplicando o valor na posição $M+1$ por M e arredondando o resultado para o próximo inteiro maior do que ele. Deste modo são obtidos valores entre 1 e M para a quantidade de células, o que é aceitável pois um problema de agrupamento pode ter no mínimo 1 célula e no máximo M células para que o resultado seja válido.

Cada gene do indivíduo é então multiplicado pelo valor encontrado no passo acima e arredondado para o próximo inteiro maior do que o resultado, obtendo assim valores entre 0 e a quantidade de células. O valor obtido significa em qual célula a máquina em questão está.

A [Figura 14](#) é um exemplo de decodificação de um indivíduo que representa uma solução para um problema com 5 máquinas. O número de células é obtido entre 1 e a quantidade de máquinas e depois é utilizado para decodificar em qual célula cada máquina está.

Figura 14 – Decodificação de um Indivíduo



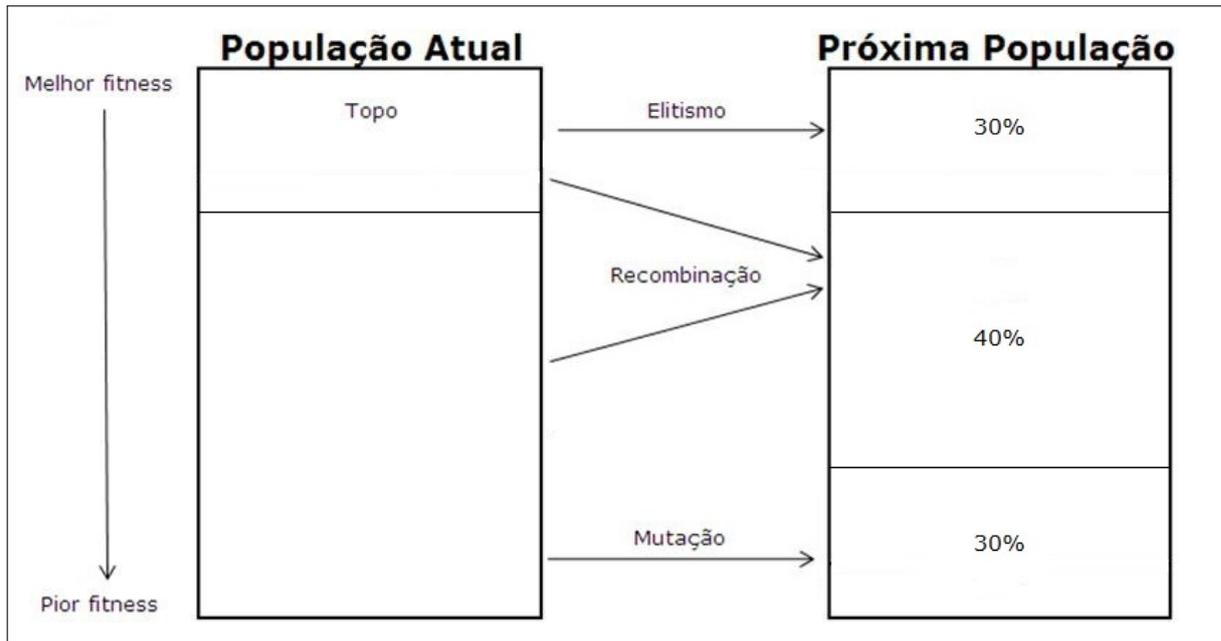
Fonte: Autor

Os indivíduos são avaliados com a função "Eficácia do Agrupamento", que foi detalhada na seção [Seção 3.5](#). Como foi dito, o peso dos 0s dentro das células é menor do que o peso dos 1s fora delas, portanto implicitamente está sendo trabalhada na função objetivo a redução dos movimentos intercelulares e das peças gargalo.

A [Seção 3.7](#) trata sobre Algoritmos Genéticos e fornece uma explicação mais detalhada sobre os operadores de mutação e recombinação. Na adaptação, as recombinações são feitas utilizando Máscaras e a mutação é feita em apenas um gene de cada indivíduo selecionado aleatoriamente. Foi decidido que apenas um gene seria modificado por questões de refinamento, pois em determinado ponto do algoritmo deseja-se incluir novos genes para evitar a convergência, porém sem variar muito os indivíduos que já existem para aproveitar melhor a carga genética que está sendo refinada desde o começo do AG.

A cada geração é formada uma nova população, onde 30% dos indivíduos são cópias dos melhores indivíduos da população anterior, passados adiante pelo Elitismo; 30% são indivíduos da população anterior que sofreram mutação e 40% são indivíduos filhos formados com a recombinação. A [Figura 15](#) mostra essa composição:

Figura 15 – Formação da População



Fonte: Autor

O algoritmo Genético apenas define os agrupamentos de máquinas, ficando a cargo da Busca Local definir em qual célula cada peça se encaixará. Para isto, o algoritmo utiliza a [Equação \(1\)](#) simulando a alocação de cada peça em cada célula formada. Na célula onde a peça obtiver a melhor Eficácia, ocorrerá a alocação da mesma.

Na [Figura 16](#) é possível ver um exemplo de como a Busca Local trabalha, indicando em qual célula cada peça se encaixa melhor e possibilitando assim a avaliação do indivíduo gerado. Supondo uma matriz que possui sete máquinas que foram agrupadas em três células, toma-se uma peça da mesma como exemplo, no caso, a peça **P3** que passa pelas máquinas **M4**, **M5** e **M6**. A seguir tenta-se alocar a peça na primeira célula, calculando a Eficácia obtida. É importante notar que as variáveis N_1 , N_1^{Fora} e N_0^{Dentro} são referentes apenas à linha em questão, portanto:

- N_1 representa a quantidade de máquinas pela qual a peça que está sendo testada passa;
- N_1^{Fora} representa a quantidade de máquinas fora da célula pelas quais a peça deve passar;
- N_0^{Dentro} representa a quantidade de zeros dentro da célula na qual a máquina está sendo testada;

Figura 16 – Busca Local

P3 = {M4, M5, M6}								
	M1	M2	M4	M3	M7	M5	M6	
P3	0	0	1	0	0	1	1	$\mu = \frac{3-2}{3+2} = \frac{1}{5} = 0,2$
P3	0	0	1	0	0	1	1	$\mu = \frac{3-3}{3+2} = \frac{0}{5} = 0$
P3	0	0	1	0	0	1	1	$\mu = \frac{3-1}{3+0} = \frac{2}{3} = 0,667$

Fonte: Autor

Percebe-se pelos resultados encontrados que a peça **P3** obteve uma eficácia melhor na terceira célula, portanto a peça é alocada nela. O processo segue até que todas as peças tenham sido alocadas em alguma célula.

5.2 Apresentação dos resultados numéricos

Esta seção tratará de cinco problemas da literatura e a aplicação do AG implementado nos mesmos. Para cada um dos problemas foi feita uma comparação dos resultados baseado na quantidade de ICM, tendo em vista que esta é a medida qualitativa utilizada pelos autores dos cinco problemas. A eficácia dos resultados também foi calculada manualmente para que se fosse possível uma discussão de resultados mais completa. Estes foram apresentados em forma de matriz, gráfico e tabela comparativa.

Para realização dos testes foram utilizadas restrições no intuito de obter resultados com a mesma quantidade de células dos resultados da literatura, possibilitando assim a comparação. O tempo de execução não foi considerado, já que há uma grande diferença de hardware entre o computador utilizado neste trabalho e os computadores informados nos artigos das comparações.

5.2.1 Problema 1

Para o Problema 1 será mostrada a matriz 41x30 proposta por [Chow \(1993\)](#), [Figura 17](#). A [Figura 18](#) é o resultado obtido por [Chow \(1993\)](#) por meio da abordagem KBS (Knowledge Based System), a [Figura 19](#) é o resultado obtido por [Rodrigues \(1997\)](#) pelo método Tabu e a [Figura 20](#) é o resultado obtido pelo AG implementado, acompanhado do gráfico da [Figura 21](#) que exhibe o desenvolvimento do AG durante as 500 gerações para as quais ele foi configurado.

Figura 17 – Problema 1 - Matriz Original

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18	M19	M20	M21	M22	M23	M24	M25	M26	M27	M28	M29	M30	
P1	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	1	1	
P2	0	0	0	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	
P3	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	1	1	
P4	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	1	0	0	0	0	
P5	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	
P6	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	
P7	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	0	0	0	0	
P8	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	1	0	
P9	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	1	0
P10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
P11	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	
P12	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
P13	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
P14	0	0	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
P15	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	1	0	0	0
P16	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	1	0	0	0	0
P17	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
P18	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
P19	0	0	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
P20	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
P21	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	1	1
P22	0	0	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	1
P23	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
P24	0	0	0	1	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
P25	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
P26	0	0	0	0	0	1	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
P27	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	1	0	0	0	0	
P28	0	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
P29	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
P30	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	1	0
P31	1	0	1	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
P32	1	1	1	0	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
P33	1	1	0	0	0	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
P34	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
P35	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	0	0
P36	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
P37	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	0	0	0	0	0
P38	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	1	0	0	0	0	0
P39	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
P40	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P41	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

Fonte: Chow (1993)

Figura 18 – Problema 1 - Resultado da Literatura

	1	2	11	12	13	21	22	24	4	8	9	19	20	27	28	29	30	3	10	23	5	6	7	14	15	16	17	18	25	26
1 0	1		1			1	1																							
1 1		1		1																										
1 2		1		1		1	1											1	1	1										
1 8		1																							1					
1 9				1	1																									
2 0				1															1											
2 4				1					1																					
2 5					1				1																					
3 1	1						1	1										1		1										
3 2	1	1					1	1										1												
3 3	1	1	1				1																							
3 8					1					1																				
3 9	1	1	1	1				1										1	1	1										
4 0				1		1	1											1												
4 1	1	1	1																											
0 1										1		1	1			1	1													
0 3										1		1	1	1			1	1												
0 7									1																			1		
0 8									1				1	1																
0 9									1								1													
1 3									1								1													
1 4									1																				1	
1 5									1				1																	
2 1									1			1	1	1			1	1												
2 2									1			1	1				1													
2 8									1																		1			
2 9									1								1													
3 0									1			1					1													
3 5									1							1														
0 2																			1	1										
2 3				1			1												1	1	1									
0 4																									1				1	
0 5																								1						
0 6																								1						
1 6																								1					1	
1 7																								1				1		
2 6																								1						
2 7																								1				1		
3 4																								1				1		
3 6																								1				1		
3 7																								1				1		

Fonte: Adaptado de Chow (1993)

Figura 19 – Problema 1 - Resultado Tabu

	13	24	4	5	6	7	14	15	16	17	18	25	26	1	2	3	10	11	12	21	22	23	8	9	19	20	27	28	29	30		
1 9	1																		1													
2 5	1		1																													
3 8	1	1																														
0 4							1					1																				
0 5				1			1																									
0 6					1					1																						
0 7			1								1																					
1 4												1											1									
1 5			1																								1					
1 6						1						1	1																			
1 7				1																												
1 8							1								1																	
2 4			1																1													
2 6					1		1																									
2 7						1						1	1																			
2 8			1								1																					
3 4				1		1						1																				
3 5			1																												1	
3 6				1		1						1																				
3 7							1	1																								
0 2																	1															
1 0														1				1		1	1											
1 1															1			1														
1 2																1	1	1		1	1	1	1									
2 0																	1		1													
2 3																	1	1		1		1	1									
3 1																		1			1	1	1									
3 2																		1				1	1									
3 3																			1			1										
3 9																			1	1	1	1	1	1	1	1						
4 0																				1		1	1	1								
4 1																				1												
0 1																								1		1	1			1		
0 3																								1		1	1		1	1		
0 8																								1				1	1			
0 9																								1						1		
1 3																									1				1	1		
2 1																									1		1	1		1		
2 2																										1	1	1				
2 9																									1				1			
3 0																										1				1		

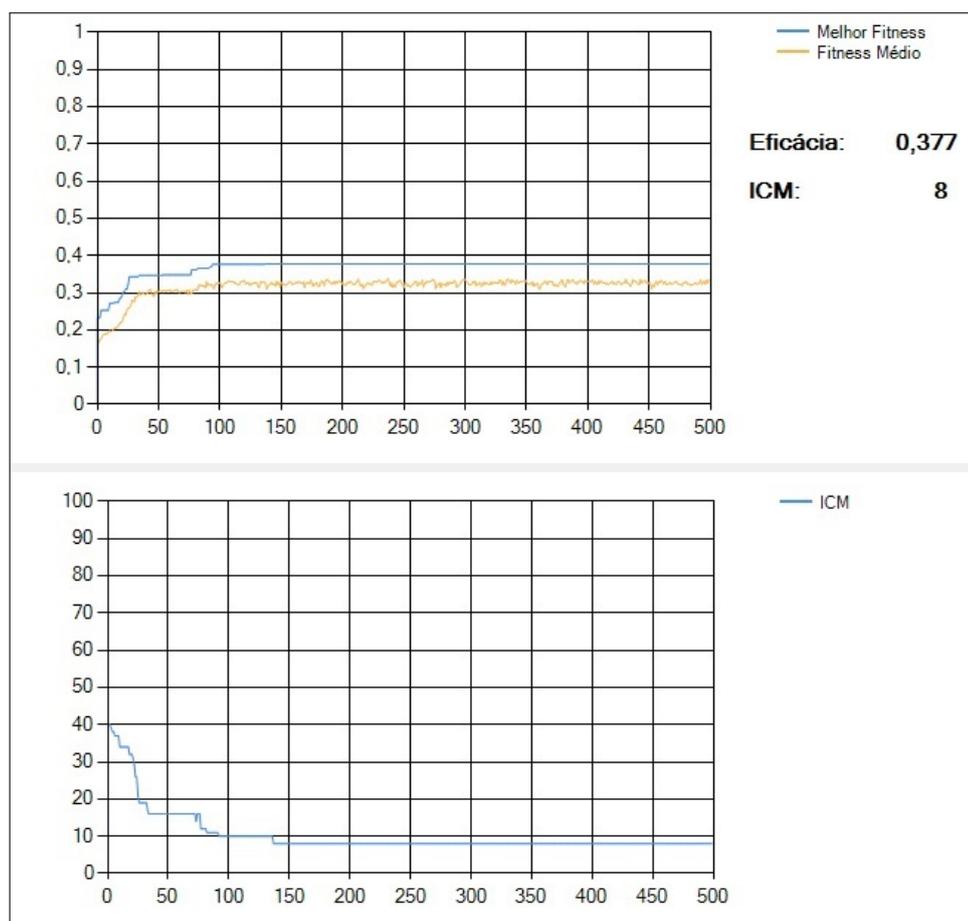
Fonte: Adaptado de Rodrigues (1997)

Figura 20 – Problema 1 - Resultado do AG

	M5	M7	M14	M15	M17	M18	M25	M26	M4	M6	M13	M16	M24	M27	M8	M9	M19	M20	M28	M29	M30	M1	M2	M3	M10	M11	M12	M21	M22	M23
P4	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	0	0	0	0
P5	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	0	0
P16	0	1	0	0	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
P17	1	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
P18	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
P27	0	1	0	0	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
P34	1	1	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	0	0
P36	1	1	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	0	0	0
P37	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
P6	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
P7	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	0	0
P15	0	0	0	0	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
P19	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	1	0	0	0
P24	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	1	0	0	0
P25	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
P26	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	0	0	0
P28	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
P35	0	0	0	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
P38	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
P1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
P8	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
P9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P14	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
P21	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	0	0	0	0
P22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P29	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
P30	0	0	0	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
P2	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
P10	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	1	0	1	1
P11	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	0	0	0
P12	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	1	1	1
P20	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	1	0	0	0
P23	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	1	1	1
P31	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	1	0	0	1	1
P32	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	0	0	1	1
P33	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	1	0
P39	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	1	1	0	1
P40	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	1	1	1
P41	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

Fonte: Autor

Figura 21 – Problema 1 - Acompanhamento do AG



Fonte: Autor

Tabela 1 – Comparação de Resultados do Problema 1.

	Nº de Células	Pçs Gargalo	ICM	Eficácia
Literatura	4	13	13	0.293
Tabu	4	7	7	0.316
AG	4	8	8	0.377

Conforme a [Tabela 1](#), verifica-se que o resultado encontrado pelo método Tabu apresentou menor quantidade de ICM, porém o AG obteve a maior Eficácia. Isso se dá devido ao fato do AG ter como objetivo a Eficácia do Agrupamento, portanto mesmo que a redução do ICM seja trabalhada de forma implícita, o fato do processo de refinamento não tomá-lo como objetivo principal pesa no resultado final em favor da Eficácia. Pode-se perceber pela [Figura 21](#) que o indivíduo com maior Eficácia foi encontrado pelo AG em torno da 100ª geração, porém o indivíduo com menor ICM foi

encontrado em torno da 140ª geração, evidenciando que, apesar da Eficácia influenciar no ICM, os indivíduos que apresentarem maior Eficácia não terão necessariamente o melhor ICM. Percebe-se também que a quantidade de ICM do AG foi menor que a de [Chow \(1993\)](#), mesmo este tendo como objetivo a redução do ICM e o AG não.

5.2.2 Problema 2

Para o Problema 2 será mostrada a matriz 20x10 proposta por [SRINIVASAN et al. \(1990\)](#), [Figura 22](#). A [Figura 23](#) é o resultado obtido por [SRINIVASAN et al. \(1990\)](#) por meio da abordagem p-median, a [Figura 24](#) é o resultado obtido por [Rodrigues \(1997\)](#) pelo método Tabu e a [Figura 25](#) é o resultado obtido pelo AG implementado, acompanhado do gráfico da [Figura 26](#) que exibe o desenvolvimento do AG durante as 500 gerações para as quais ele foi configurado.

Figura 22 – Problema 2 - Matriz Original

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

Fonte: [SRINIVASAN et al. \(1990\)](#)

Figura 23 – Problema 2 - Resultado da Literatura

	2	3	4	1	6	5	9	7	8	10
0 2	1	1								
0 3	1	1								
0 5	1	1								
0 8	1	1								
1 0	1	1								
0 1			1	1	1					
0 4			1	1	1					
0 7			1	1	1					
2 0						1	1			
1 8						1	1			
1 7						1	1			
1 5						1	1			
1 4						1	1			
1 3						1	1			
0 6								1	1	1
0 9								1	1	1
1 1								1	1	1
1 2								1	1	1
1 6								1	1	1
1 9								1	1	1

Fonte: Adaptado de [SRINIVASAN et al. \(1990\)](#)

Figura 24 – Problema 2 - Resultado Tabu

	5	9	7	8	10	1	4	6	2	3
1 3	1	1								
1 4	1	1								
1 5	1	1								
1 7	1	1								
1 8	1	1								
2 0	1	1								
0 6			1	1	1					
0 9			1	1	1					
1 1			1	1	1					
1 2			1	1	1					
1 6			1	1	1					
1 9			1	1	1					
0 1						1	1	1		
0 4						1	1	1		
0 7						1	1	1		
0 2									1	1
0 3									1	1
0 5									1	1
0 8									1	1
1 0									1	1

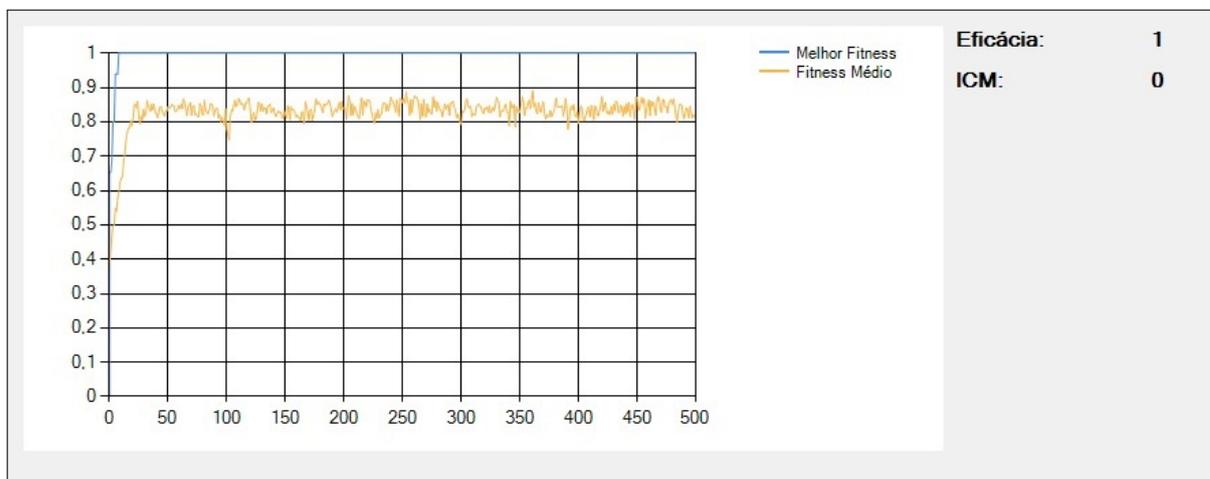
Fonte: Adaptado de [Rodrigues \(1997\)](#)

Figura 25 – Problema 2 - Resultado do AG

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

Fonte: Autor

Figura 26 – Problema 2 - Acompanhamento do AG



Fonte: Autor

Tabela 2 – Comparação de Resultados do Problema 2.

	Nº de Células	Pçs Gargalo	ICM	Eficácia
Literatura	4	0	0	1.0
Tabu	4	0	0	1.0
AG	4	0	0	1.0

Conforme a [Tabela 2](#), verifica-se que o Problema 2 possui solução ótima, onde a Eficácia é igual a 1, e que todos os três algoritmos conseguiram chegar à mesma. Ao se comparar as [Figura 23](#), [Figura 24](#) e [Figura 25](#) percebe-se que os agrupamentos gerados foram idênticos, mudando apenas a ordem dos mesmos dentro da matriz. De acordo com a [Figura 26](#), o AG convergiu em cerca de 10 gerações para a solução ótima (com Eficácia igual a 1) gerando um indivíduo sem ICM e sem zeros dentro das células. Mais uma vez fica evidenciado que a busca da maior Eficácia reduz implicitamente o ICM, pois o resultado com Eficácia ótima zerou a quantidade de ICM.

5.2.3 Problema 3

Para o Problema 3 será mostrada a matriz 22x11 proposta por [Cheng et al. \(1996\)](#), [Figura 27](#). A [Figura 28](#) é o resultado obtido por [Cheng et al. \(1996\)](#) por meio da abordagem Truncated Tree Search, a [Figura 29](#) é o resultado obtido por [Rodrigues \(1997\)](#) pelo método Tabu e a [Figura 30](#) é o resultado obtido pelo AG implementado, acompanhado do gráfico da [Figura 31](#) que exibe o desenvolvimento do AG durante as 500 gerações para as quais ele foi configurado.

Figura 27 – Problema 3 - Matriz Original

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

Fonte: [Cheng et al. \(1996\)](#)

Figura 28 – Problema 3 - Resultado da Literatura

	1	4	5	10	7	8	9	11	2	3	6
0 1	1	1	1	1							
0 2	1	1	1	1							
0 3	1	1	1	1							
1 1	1	1		1						1	
1 5	1	1	1	1							
1 6	1	1	1	1							
2 0	1	1	1								
2 1	1	1	1								
2 2	1	1	1								
0 7			1	1							
0 4					1		1	1			
0 9					1	1	1	1			
1 4					1	1	1				
1 7					1	1	1	1			
1 8			1		1	1	1	1			
0 6					1	1					1
1 0						1		1			
0 5			1		1				1	1	1
1 2			1		1				1	1	1
0 8			1						1		1
1 3					1					1	
1 9					1				1	1	1

Fonte: Adaptado de [Cheng et al. \(1996\)](#)

Figura 29 – Problema 3 - Resultado Tabu

	1	4	5	10	3	7	8	9	11	2	6
0 1	1	1	1	1							
0 2	1	1	1	1							
0 3	1	1	1	1							
0 7			1	1							
1 1	1	1		1							1
1 5	1	1	1	1							
1 6	1	1	1	1							
2 0	1	1	1								
2 1	1	1	1								
2 2	1	1	1								
0 4					1		1	1			
0 5			1		1		1			1	1
0 6					1	1	1				
0 9					1	1	1	1			
1 0						1			1		
1 2			1		1		1			1	1
1 3					1		1				
1 4						1	1	1			
1 7						1	1	1	1		
1 8			1			1	1	1	1		
1 9					1		1			1	1
0 8				1						1	1

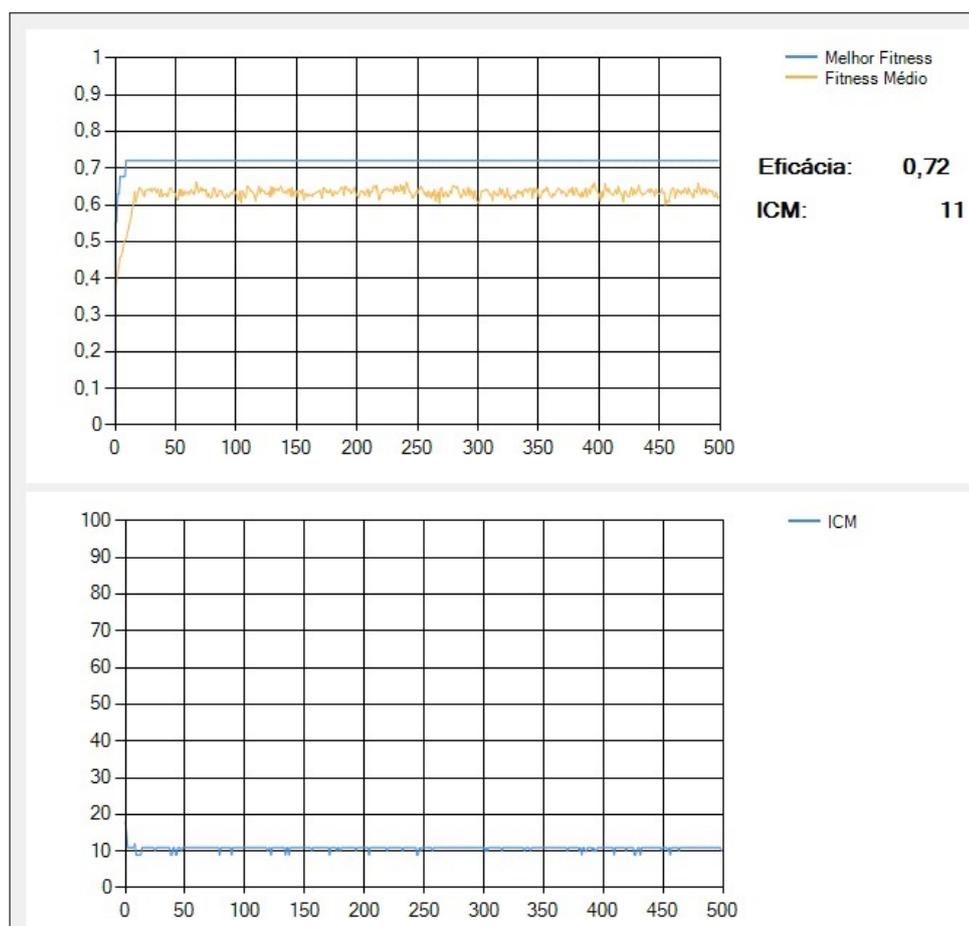
Fonte: Adaptado de [Rodrigues \(1997\)](#)

Figura 30 – Problema 3 - Resultado do AG

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

Fonte: Autor

Figura 31 – Problema 3 - Acompanhamento do AG



Fonte: Autor

Tabela 3 – Comparação de Resultados do Problema 3.

	Nº de Células	Pçs Gargalo	ICM	Eficácia
Literatura	3	8	10	0.731
Tabu	3	6	8	0.620
AG	3	10	11	0.720

Conforme a Tabela 3, percebe-se que o resultado com menor ICM foi a solução Tabu. Pela Figura 31 é possível notar que a quantidade de ICM do AG variou entre 13 e 8, chegando a se igualar ao resultado de Cheng et al. (1996), porém o resultado final foi 11. O AG convergiu para o menor fitness possível rapidamente (em cerca de 10 gerações) e o seu fitness médio se manteve estável, em torno de 0.650, mostrando que os indivíduos variaram pouco, ficando presos em um intervalo de soluções e não conseguindo sair dele. A Eficácia encontrada pelo AG foi bastante satisfatória, tendo

em vista que o resultado da literatura obteve uma Eficácia maior mas mesmo assim a Eficácia do AG foi maior que a da solução Tabu, que obteve a menor quantidade de ICM.

5.2.4 Problema 4

Para o Problema 4 será mostrada a matriz 30x16 proposta por [SRINIVASAN et al. \(1990\)](#), [Figura 32](#). A [Figura 33](#) é o resultado obtido por [SRINIVASAN et al. \(1990\)](#) por meio da abordagem p-median, a [Figura 34](#) é o resultado obtido por [Rodrigues \(1997\)](#) pelo método Tabu e a [Figura 35](#) é o resultado obtido pelo AG implementado, acompanhado do gráfico da [Figura 36](#) que exibe o desenvolvimento do AG durante as 500 gerações para as quais ele foi configurado.

Figura 32 – Problema 4 - Matriz Original

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

Fonte: [SRINIVASAN et al. \(1990\)](#)

Figura 33 – Problema 4 - Resultado da Literatura

	1	4	7	8	11	12	2	13	3	6	9	15	5	10	14	16
0 2		1	1	1	1	1										
0 4	1	1	1	1		1	1		1							
0 7	1	1	1	1	1	1										1
0 9	1	1		1	1											
1 2	1		1	1	1	1										
1 8	1	1	1	1	1	1	1							1		
2 2	1	1	1	1		1										
3 0	1	1	1		1			1				1				
0 1							1									
0 3								1					1			
1 0							1	1								
1 6							1									
1 7								1								
2 0						1	1	1								
0 5	1									1	1					
1 3								1	1							
1 9						1					1					
2 3									1	1	1	1				
2 5		1							1	1	1	1				
2 7									1	1	1	1			1	1
2 8				1					1		1					
2 9							1		1	1		1				
0 6													1	1	1	1
0 8													1	1	1	1
1 1					1								1	1	1	
1 4													1	1	1	1
1 5													1	1	1	1
2 1													1	1	1	
2 4													1	1		1
2 6												1	1	1		1

Fonte: Adaptado de [SRINIVASAN et al. \(1990\)](#)

Figura 34 – Problema 4 - Resultado Tabu

	1	4	7	8	11	12	2	3	6	9	13	15	5	10	14	16
0 2		1	1	1	1	1										
0 4	1	1	1	1		1	1	1								
0 7	1	1	1	1	1	1										1
0 9	1	1		1	1											
1 2	1		1	1	1	1										
1 8	1	1	1	1	1	1	1							1		
1 9						1				1						
2 0						1	1				1					
2 2	1	1	1	1		1										
3 0	1	1	1		1							1	1			
0 1							1									
1 0							1				1					
1 6							1									
0 3											1				1	
0 5	1									1		1				
1 3									1		1					
1 7											1					
2 3									1	1	1		1			
2 5			1						1	1	1		1			
2 7									1	1	1		1		1	1
2 8				1					1		1					
2 9									1	1		1	1			
0 6													1	1	1	1
0 8													1	1	1	1
1 1					1								1	1	1	
1 4													1	1	1	1
1 5													1	1	1	1
2 1													1	1	1	
2 4													1	1		1
2 6													1	1	1	1

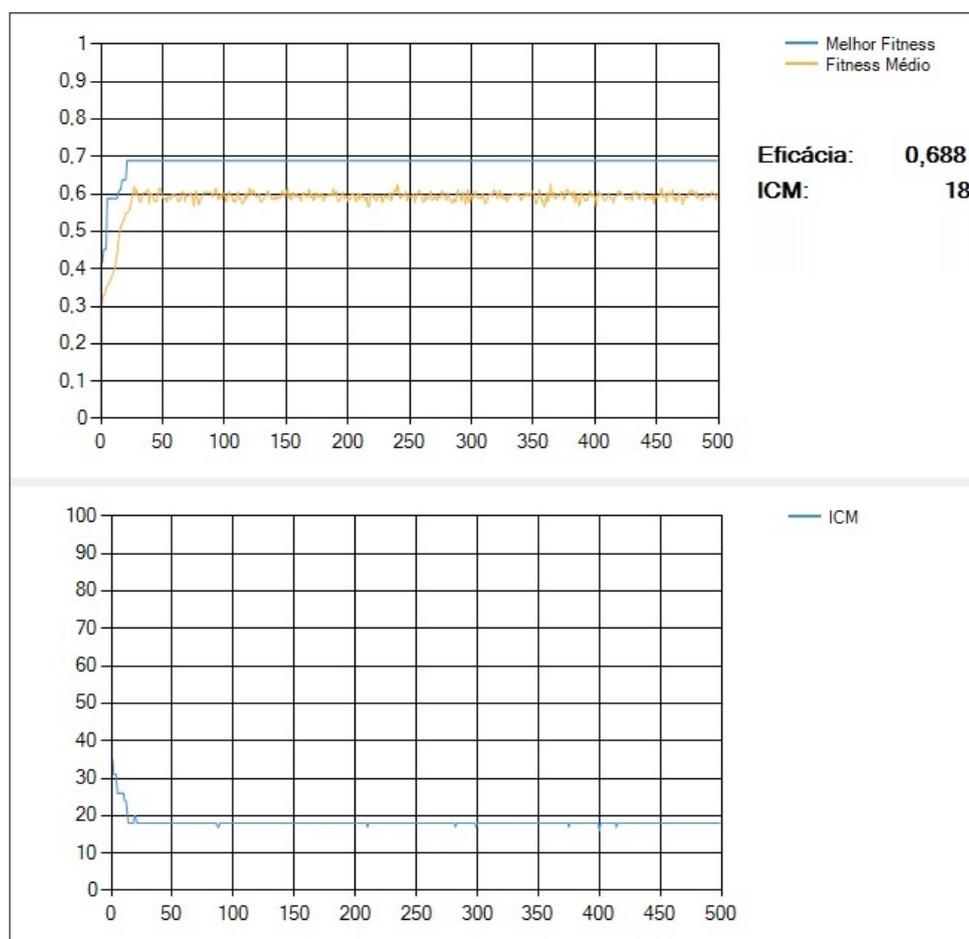
Fonte: Adaptado de Rodrigues (1997)

Figura 35 – Problema 4 - Resultado do AG

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

Fonte: Autor

Figura 36 – Problema 4 - Acompanhamento do AG



Fonte: Autor

Tabela 4 – Comparação de Resultados do Problema 4.

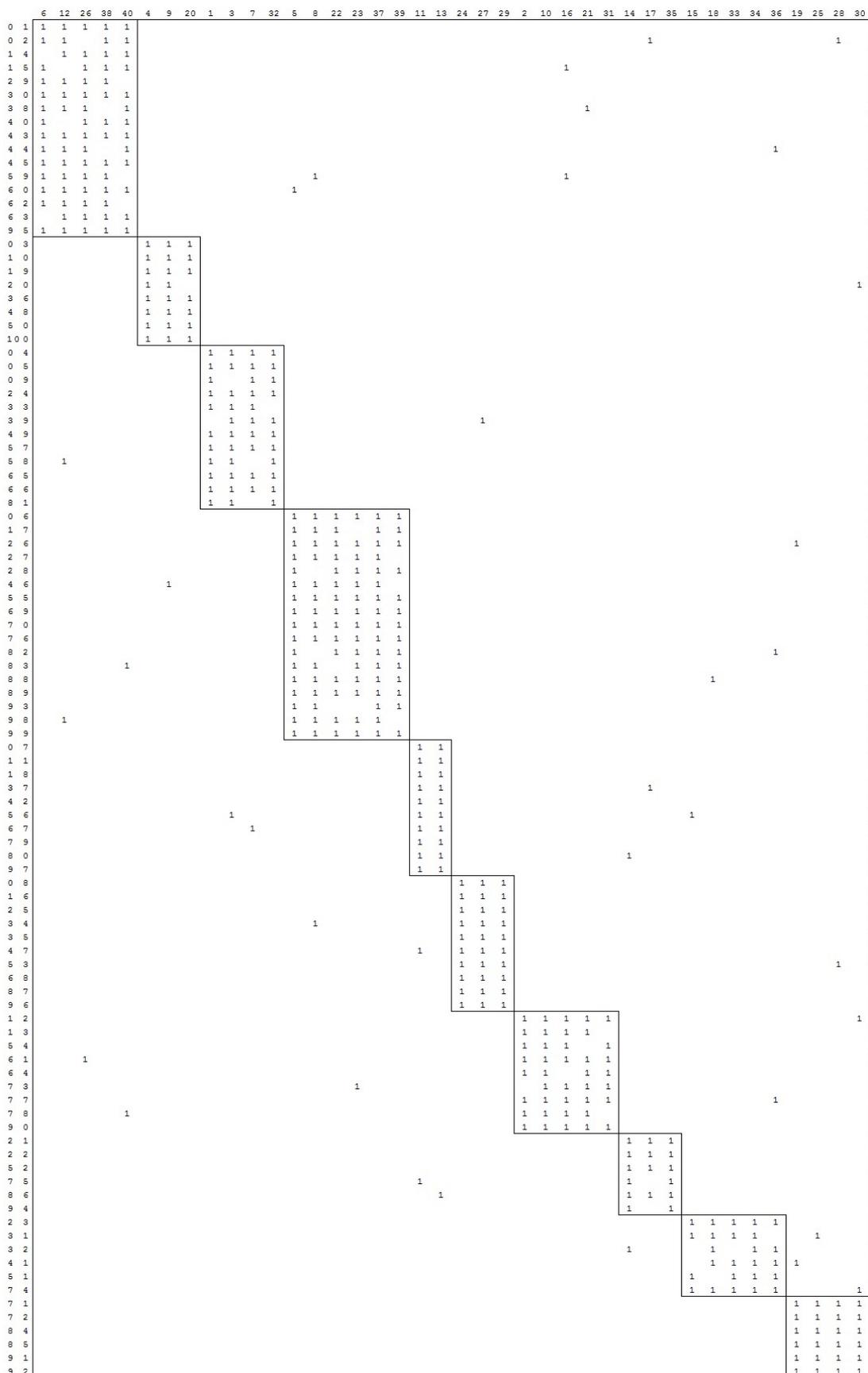
	Nº de Células	Pçs Gargalo	ICM	Eficácia
Literatura	4	15	18	0.678
Tabu	4	14	17	0.610
AG	4	14	18	0.688

Conforme a [Tabela 4](#), percebe-se que o AG encontrou a mesma quantidade de peças gargalo que o algoritmo de [SRINIVASAN et al. \(1990\)](#), porém a quantidade de ICM do AG foi maior. Isso se deve ao fato de que algumas peças gargalo geram mais de um ICM, e o AG não foi programado para reduzir diretamente o ICM. Percebe-se também que o AG obteve a maior Eficácia de todas, convergindo para seu melhor resultado em menos de 20 gerações e que depois disso a quantidade de ICM variou pouco. Novamente o método Tabu apresentou a menor quantidade de ICM.

5.2.5 Problema 5

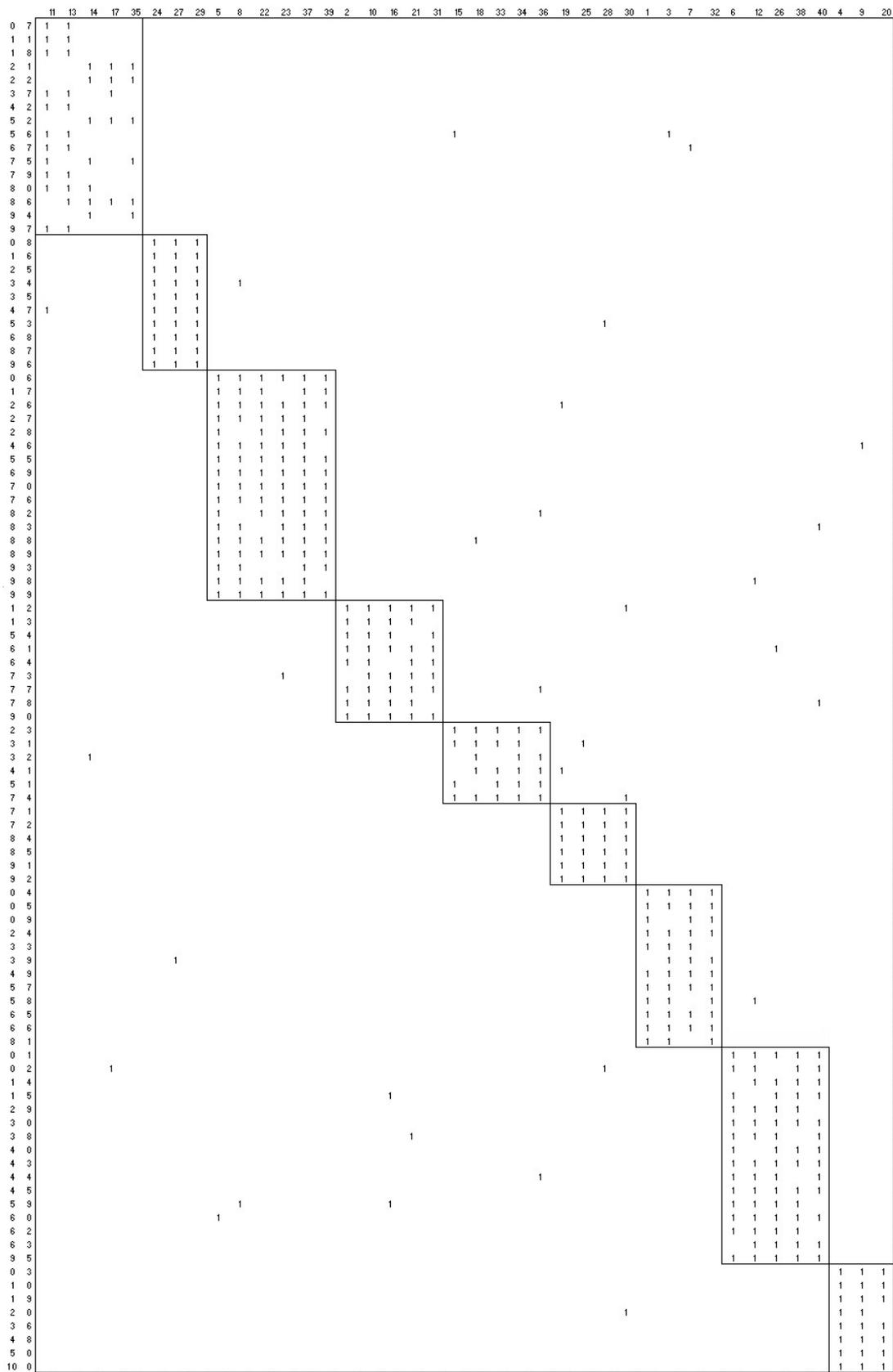
Para o Problema 5 será mostrada a matriz 100x40 proposta por [Chandrasekharam e Rajagopalan \(1987\)](#), [Figura 37](#). A [Figura 38](#) é o resultado obtido por [Chandrasekharam e Rajagopalan \(1987\)](#) por meio da abordagem ZODIAC, a [Figura 39](#) é o resultado obtido por [Rodrigues \(1997\)](#) pelo método Tabu e a [Figura 40](#) é o resultado obtido pelo AG implementado, acompanhado do gráfico da [Figura 41](#) que exibe o desenvolvimento do AG durante as 500 gerações para as quais ele foi configurado.

Figura 38 – Problema 5 - Resultado da Literatura



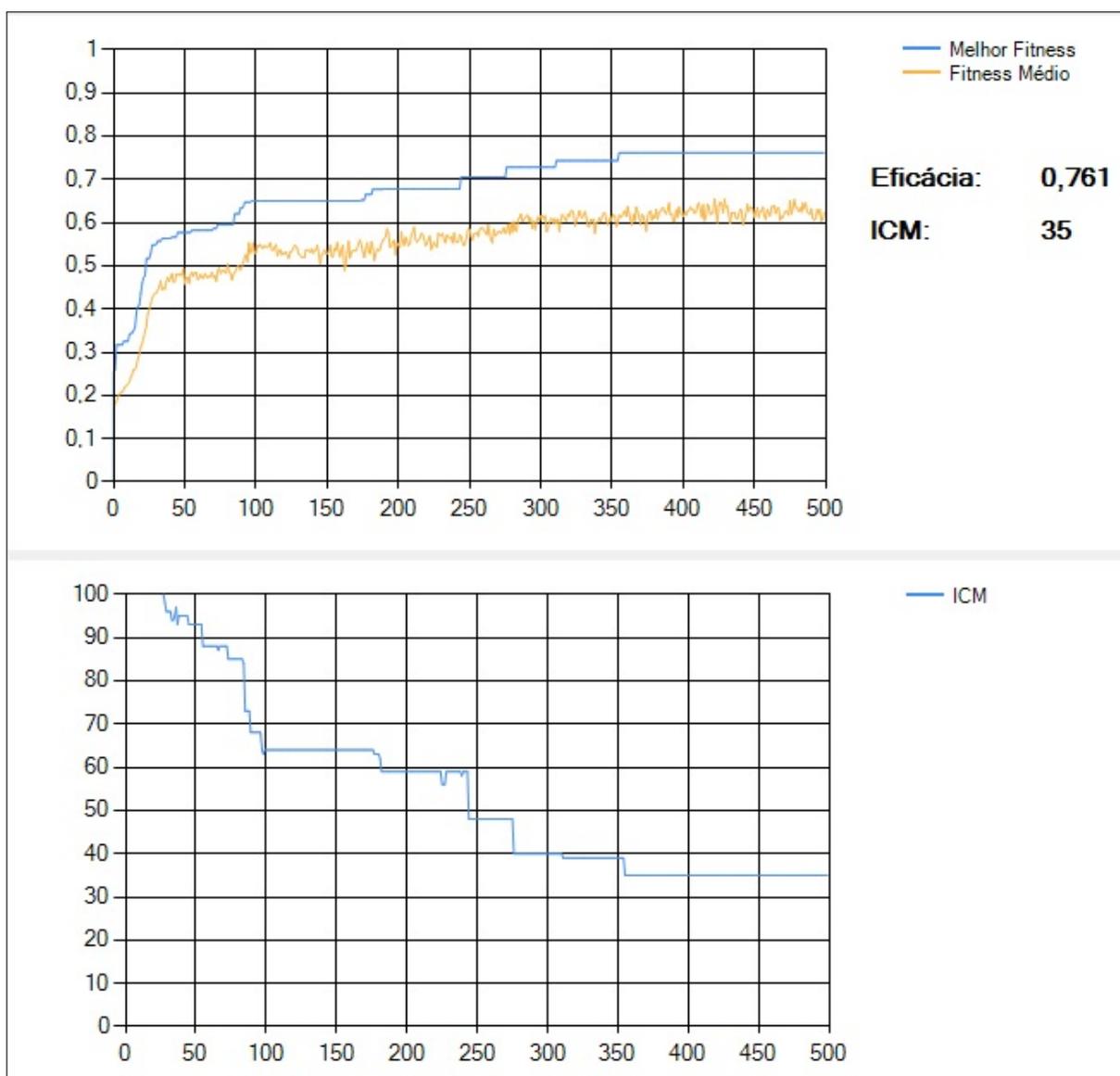
Fonte: Adaptado de Chandrasekharam e Rajagopalan (1987)

Figura 39 – Problema 5 - Resultado Tabu



Fonte: Adaptado de Rodrigues (1997)

Figura 41 – Problema 5 - Acompanhamento do AG



Fonte: Autor

Tabela 5 – Comparação de Resultados do Problema 5.

	Nº de Células	Pçs Gargalo	ICM	Eficácia
Literatura	10	33	36	0.840
Tabu	9	29	32	0.788
AG	9	32	35	0.761

A matriz do Problema 5 apresenta uma grande quantidade de máquinas e peças, sendo um problema bastante complexo. Percebe-se pela [Figura 41](#) que o AG demorou

cerca de 350 gerações para convergir até o seu melhor resultado. É interessante notar o Elitismo atuando no AG, pois como os melhores indivíduos são transferidos de geração para geração, o gráfico de melhor fitness é sempre crescente, mostrando que ou o AG obtém um resultado melhor na próxima geração ou ele conserva o melhor resultado da geração atual, nunca depreciando os resultados. Apesar da solução de [Chandrasekharam e Rajagopalan \(1987\)](#) possuir 10 células e a solução Tabu possuir 9, é possível perceber que o AG obteve um resultado intermediário entre os dois em termos de ICM, porém ficou aquém em termos de Eficácia, sugerindo que talvez a implementação não seja ideal para trabalhar com problemas deste porte ou categoria.

6 Conclusão

Com base nos resultados obtidos pode-se perceber que o desempenho do algoritmo desenvolvido foi bom em termos de ICM, obtendo resultados melhores ou iguais aos da Literatura em 80% das vezes e melhores ou iguais ao Tabu em 20% das vezes. Em relação à Eficácia o AG se destacou, obtendo resultados melhores ou iguais aos da Literatura em 60% das vezes e melhores ou iguais ao Tabu em 80% das vezes. Tal fato decorre como reflexo da escolha da função objetivo ser baseada na Eficácia e não na redução de ICM, fazendo com que todo o processo de seleção do AG se baseie em conseguir indivíduos com melhor Eficácia e chegue até a descartar indivíduos com ICM mais baixo, como ocorreu no Problema 3. É interessante notar que o AG foi melhor do que a Literatura em relação ao ICM grande parte das vezes mesmo este não sendo o seu foco, e que na Eficácia ele superou o Tabu e a Literatura na maioria das vezes como era de se esperar. Também é importante dizer que por se tratar de uma heurística, o AG nem sempre chega aos mesmos resultados, podendo obter resultados melhores ou piores em diferentes execuções.

Pode-se dizer que a grande vantagem da implementação realizada neste trabalho é a apresentação visual dos resultados (que facilita o entendimento e a visualização de como os agrupamentos ficaram) e a capacidade do sistema de lidar com restrições rígidas e flexíveis, possibilitando gerar os agrupamentos de forma direcionada pelo usuário. Outro fator de destaque é a apresentação dos gráficos de acompanhamento do AG, que tornam possível uma análise do seu desenvolvimento e de como as restrições afetam seu desempenho.

6.1 Trabalhos futuros

A implementação de um algoritmo capaz de lidar com matrizes de sequência seria uma possível extensão deste trabalho. A estrutura do algoritmo genético poderia ser mantida, com algumas alterações pontuais na função de avaliação (que deve levar em consideração os movimentos inter celulares mais complexos), na geração dos indivíduos e na Busca Local. A composição da população, a reprodução e a mutação poderiam ser mantidas inalteradas.

A adaptação do AG para que tenha como função objetivo a redução do ICM também seria interessante, possibilitando uma comparação mais palpável com os resultados da literatura.

Uma outra extensão interessante seria um estudo da formação de parceria entre empresas, como descrito na seção [Seção 3.6](#). Trabalhos que lidam com a formação

dessas cadeias de suprimento geralmente são mais complexos, sendo indicados para Mestrados e Doutorados. O trabalho desenvolvido por [Rodrigues \(2005\)](#) seguiu essa linha de pesquisas.

Referências

- CATARINA, A. S.; BACH, S. L. **Estudo do efeito dos parâmetros genéticos sobre a solução otimizada e sobre o tempo de convergência em algoritmos genéticos com codificações binária e real**. 2003. Disponível em: <<http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciTechnol/article/view/2169>>. Acesso em: 25 de novembro de 2014. Citado na página 17.
- CHANDRASEKHARAM, M. P.; RAJAGOPALAN, R. Zodiac: An algorithm for concurrent formation of part-families and machine-cells. **International Journal of Production Research**, v. 25, p. 835–850, 1987. Citado 4 vezes nas páginas 41, 42, 43 e 47.
- CHENG, C. H.; MADAN, M. S.; MOTWANI, J. Designing cellular manufacturing systems by a truncated tree search. **International Journal of Production Research**, v. 34, p. 349–361, 1996. Citado 3 vezes nas páginas 32, 33 e 35.
- CHOW, W. S. A novel machine grouping and knowledge-based approach for cellular manufacturing. **European Journal of Operational Research**, v. 69, p. 357–372, 1993. Citado 4 vezes nas páginas 23, 24, 25 e 29.
- FILHO, G. R.; LORENA, L. A. N. **Algoritmo Genético Construtivo aplicado ao projeto de células de manufatura**. 2001. Disponível em: <<http://www.lac.inpe.br/~lorena/sbpo98/agc-cell.pdf>>. Acesso em: 19 de Janeiro de 2015. Citado na página 18.
- GONÇALVES, J. F.; RESENDE, M. G. C. **An evolutionary algorithm for manufacturing cell formation**. 2004. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835204001172>>. Acesso em: 25 de novembro de 2014. Citado 3 vezes nas páginas 18, 19 e 20.
- HERAGU, S. S. A heuristic algorithm for identifying machine cells. information and decision technologies. 1992. Citado na página 10.
- HERAGU, S. S. Group technology and cellular manufacturing. **IEEE Transactions**, v. 18, p. 171–184, 1994. Citado 6 vezes nas páginas 1, 5, 6, 7, 10 e 18.
- HERAGU, S. S.; GUPTA, Y. P. A heuristic for designing cellular manufacturing facilities. **International Journal of Production Research**, v. 32, p. 125–140, 1994. Citado 3 vezes nas páginas 1, 3 e 10.
- HOLLAND, J. H. **Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control and Artificial Intelligence**. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1992. Citado na página 14.
- KUMAR, K. R.; CHANDRASEKHARAN, M. P. **Grouping efficacy: A quantitative criterion for goodness of block diagonal forms of binary matrices in group technology**. 28. ed. [S.l.: s.n.], 1990. 233–243 p. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 11.
- KUSIAK, A. Intelligent manufacturing systems. **Intelligent Manufacturing Systems**, 1990. Citado na página 9.

MONDEN, Y. Toyota production system - an integrated approach to just-in-time. v. 4, 2012. Citado na página 3.

ONWUBOLU, G. C.; SONGORE, V. A tabu search approach to cellular manufacturing systems. **Computers and Industrial Engineering**, v. 39, p. 125–144, 2000. Citado na página 3.

RODRIGUES, E. de O. **Problema de Especificação de Células de Manufatura na presença de Restrições de Projeto - Uma abordagem baseada em Tabu Search**. 1997. Citado 11 vezes nas páginas 3, 23, 26, 29, 30, 32, 33, 36, 38, 41 e 44.

RODRIGUES, E. de O. **Metodologia para formação de parceira em cadeia de suprimentos : enfoque por similitude entre atividades**. 2005. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000374466>>. Acesso em: 03 de dezembro de 2014. Citado 6 vezes nas páginas 3, 8, 9, 11, 13 e 49.

ROSA, T. O.; LUZ, H. S. **Conceitos Básicos de Algoritmos Genéticos: Teoria e Prática**. 2009. Disponível em: <<http://tinyurl.com/ylouf6>>. Acesso em: 03 de dezembro de 2014. Citado 5 vezes nas páginas 14, 15, 16, 17 e 18.

SRINIVASAN, G.; NARENDRAN, T. T. Graphics- a nonhierarchical clustering algorithm for group technology. **International Journal of Production Research**, v. 29, p. 463–478, 1991. Citado na página 5.

SRINIVASAN, G.; NARENDRAN, T. T.; MAHADEVAN, B. An assignment model for the part-families problem in group technology. **International Journal of Production Research**, v. 28, p. 145–152, 1990. Citado 5 vezes nas páginas 29, 30, 36, 37 e 40.

TRINDADE Áthila R.; OCHI, L. S. **Um algoritmo evolutivo híbrido para a formação de células de manufatura em sistemas de produção**. 2006. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0101-74382006000200005&script=sci_arttext>. Acesso em: 03 de dezembro de 2014. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 18.

ZHANG, Q.; LI, X. Research on autonomous management pattern of cellular manufacturing. **International Conference on Management and Service Science (MASS)**, p. 1–4, 2010. Citado 4 vezes nas páginas 3, 13, 14 e 18.