

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ENGENHARIA INDUSTRIAL MECÂNICA**

LUCAS RODRIGUES DE CASTRO

**SEQUENCIAMENTO DA PRODUÇÃO EM LINHAS *FLOW SHOP*
PERMUTACIONAL COM BLOQUEIO E SEM ESTOQUE
INTERMEDIÁRIO APLICANDO MÉTODOS HEURÍSTICOS DE II FASE**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2014

LUCAS RODRIGUES DE CASTRO

**SEQUENCIAMENTO DA PRODUÇÃO EM LINHAS *FLOW SHOP*
PERMUTACIONAL COM BLOQUEIO E SEM ESTOQUE INTERMEDIÁRIO
APLICANDO MÉTODOS HEURÍSTICOS DE II FASE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Industrial Mecânica, do Departamento Acadêmico de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Me. Mauricio Iwama Takano

CORNÉLIO PROCÓPIO

2014



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Ponta Grossa

Nome da Diretoria
Nome da Coordenação
Nome do Curso



TERMO DE APROVAÇÃO

Sequenciamento da produção em linhas *flow shop* permutacional com bloqueio e sem estoque intermediário aplicando métodos heurísticos de II fase

por

Lucas Rodrigues de Castro

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado em 24 de fevereiro de 2014 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Industrial Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho

...Aprovado.....

Prof. Me. Mauricio Iwama Takano
UTFPR
Prof. Orientador

Prof. Me. Fernando Henrique de Oliveira Camara
UTFPR
Membro titular

Prof. Dr. Adailton Silva Borges
UTFPR
Membro titular

Dedico este trabalho a meus pais, Wilson
e Édina, pelas lições ensinadas

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Cristo, criador e redentor de minha vida. Autor e consumidor de minha fé. A Ele toda glória para todo sempre.

Agradeço a todos os meus familiares em especial a meus pais, Édina e Wilson dos quais recebi as maiores lições da vida, não através de palavras, mas, através de exemplos, e a meu irmão Jonatas pela amizade e paciência.

Agradeço a meus amigos, em especial aqueles com quem compartilhei não só a casa mas a vida. Estes se tornaram minha família.

Agradeço a meus professores. Em especial a meu orientador Mauricio Takano que se dispôs a me orientar. Obrigado por toda a ajuda e tempo despendidos, por relevar minhas falhas e sanar minhas dúvidas.

Agradeço a todos aqueles que direta ou indiretamente me ajudaram na realização deste projeto. Todos estes são responsáveis pela concretização deste projeto, e sem eles, o mesmo não seria possível.

RESUMO

CASTRO, Lucas R. de. Sequenciamento da produção em linhas *flow shop* permutacional com bloqueio e sem estoque intermediário aplicando métodos heurísticos de II fase. (2014). p. 82. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Industrial Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2014.

O presente trabalho busca analisar a eficiência de alguns métodos heurísticos construtivos quanto a minimização do *makespan* e do tempo de fluxo em uma linha de produção *flow shop* permutacional com bloqueio e estoque intermediário igual a zero. É apresentada uma revisão sobre os principais conceitos de sequenciamento de produção, onde são apresentadas as classificações dos problemas e métodos utilizados para a resolução dos mesmos. O problema de *flow shop* permutacional com bloqueio e estoque intermediário igual a zero é detalhado segundo suas restrições e o funcionamento de seis dos melhores métodos heurísticos de segunda fase é apresentado. Estes métodos são aplicados em 120 problemas, divididos em 12 classes distintas e seus resultados são avaliados através do desvio relativo das funções objetivos e do tempo de processamento gasto na resolução dos problemas e é definido, entre os métodos avaliados, o melhor método para a minimização do tempo de fluxo e do *makespan*. Após as análises de resultados foi constatado que a heurística PW-NEH(x) obteve os melhores resultados tanto para a otimização do *makespan* quanto do tempo de fluxo.

Palavras-chave: Sequenciamento. Métodos heurísticos. *Flow shop* permutacional. Bloqueio. *Makespan*. Tempo de fluxo.

ABSTRACT

CASTRO , R. Lucas . Scheduling of the blocking flow shop with permutation and buffer zero applying heuristics phase II. (2014). p. 82. Completion of course work (Bacharel em Engenharia Industrial Mecânica) – Federal Technology University - Parana. Cornélio Procópio. 2014.

This work aims to analyze the efficiency of some constructive heuristics as to minimize the makespan and the flow time in a production permutation flow shop with blocking and zero buffer. A review of the main concepts of production scheduling, which shows the classes of problems and the methods for solving them is presented. The permutation flow shop with blocking and zero buffer problem is detailed according to its constraints. Six of the best second phase heuristics for the problem is presented. These methods are applied to 120 problems divided into 12 distinct classes and their results are evaluated using the relative deviation of the objective functions and the processing time spent on problem solving. After analysis of the results it was found that the PW-NEH(x) heuristic gave the best results both for the optimization of the makespan as for the flow time.

Keywords: Scheduling. Heuristic methods. Permutation Flow shop. Blocking. Makespan. Flow time.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Relação entre as diversas classes de problemas de sequenciamento de operações em máquinas.	18
Figura 2 – Sistema <i>flow shop</i> com três máquinas e duas tarefas	24
Figura 3 – Exemplo de bloqueio em uma linha <i>flow shop</i>	24
Figura 4 – Construção da matriz de tempos de saída de tarefas através dos cinco passos	28
Figura 5 – Exemplo de bloqueio e tempo ocioso em um sistema <i>flow shop</i>	30
Figura 6 – Procedimento da heurística PF para um problema <i>flow shop</i> , com quatro tarefas	32
Figura 7 – Funcionamento da heurística NEH para um sistema <i>flow shop</i> com quatro tarefas	36

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Porcentagem de sucesso de <i>makespan</i> para os métodos direcionados para a minimização do <i>makespan</i> (maior melhor).....	41
Gráfico 2 – Porcentagem de casos com menor tempo computacional para os métodos direcionados para a minimização do <i>makespan</i> (maior melhor).....	42
Gráfico 3 – Desvio relativo médio do <i>makespan</i> para os métodos direcionados para a minimização do <i>makespan</i> (menor melhor).....	44
Gráfico 4 – Média do tempo computacional (em segundos) para os problemas com 20, 50, 100 e 200 tarefas para os métodos direcionados para a minimização do <i>makespan</i> (menor melhor)	45
Gráfico 5 – Média do tempo computacional (em segundos) para os problemas com 500 tarefas para os métodos direcionados para a minimização do <i>makespan</i> (menor melhor)	46
Gráfico 6 – Porcentagem de sucesso do tempo de fluxo para os métodos adaptados para a minimização do tempo de fluxo (maior melhor).....	48
Gráfico 7 – Porcentagem de casos com o menor tempo computacional para os métodos adaptados para a minimização do tempo de fluxo (maior melhor)	49
Gráfico 8 – Desvio relativo médio do tempo de fluxo para os métodos adaptados para a minimização do tempo de fluxo (menor melhor)	51
Gráfico 9 – Média do tempo computacional (em segundos) para problemas com 20, 50, 100 e 200 tarefas para os métodos adaptados para a minimização do tempo de fluxo (menor melhor)	52
Gráfico 10 – Média do tempo computacional (em segundos) para problemas com 500 tarefas para os métodos adaptados para a minimização do tempo de fluxo (menor melhor).....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Matriz de tempos de processamento.....	26
Tabela 2 – Exemplo da distribuição dos pesos w_i na heurística wPF.....	33
Tabela 3 – Número de problemas para cada classe $n \times m$ das matrizes de Taillard ..	38
Tabela 4 – Número de vezes em que um método obteve o melhor resultado para o tempo computacional e <i>makespan</i> para os métodos direcionados para a minimização do <i>makespan</i> (maior melhor).....	40
Tabela 5 – Desvio relativo médio do <i>makespan</i> e média do tempo computacional (s) para os métodos direcionados para a minimização do <i>makespan</i> (menor melhor)...	43
Tabela 6 – Número de vezes em que um método obteve o melhor resultado entre os métodos para o tempo computacional e tempo de fluxo para os métodos direcionados para a minimização do tempo de fluxo (maior melhor)	47
Tabela 7 – Desvio relativo médio do tempo de fluxo e média do tempo computacional (s) para os métodos direcionados para a minimização do tempo de fluxo (menor melhor)	50

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Indicador de restrição referente as configurações de máquinas
β	Indicador de restrição adicional
λ	Indicador do campo da função objetivo
Pm	Máquinas em paralelo idênticas
Jm	<i>Job shop</i>
FJc	<i>Job shop</i> com máquinas múltiplas
Om	<i>Open shop</i>
Fm	<i>Flow shop</i>
$Fperm$	<i>Flow shop</i> permutacional
FFc	<i>Flow shop</i> com máquinas múltiplas
m	Número de máquinas
Kj	Número de estágios idênticos
$prmu$	Permutação
r_j	Data de lançamento
$prmp$	Preempção
nwt	Sem espera
C_{max}	<i>Makespan</i>
$\sum C_j$	Tempo de fluxo
n	Número de tarefas
$C_{j,k}$	Tempo de término da tarefa j na máquina k
$D_{j,k}$	Tempo de saída da tarefa j na máquina k
$P_{j,k}$	Tempo de processamento da tarefa j na máquina k
$D_{n,m}$	Tempo de saída da última tarefa na última máquina
α_{MM}	Parâmetro usado para ponderar os termos da expressão MM
$P_{c,k}$	Tempo de processamento da tarefa em teste c na máquina k

$\delta_{j,k}$	Função índice da heurística PF
w_i	Peso de uma tarefa em uma máquina i
$\chi_{j,k}$	Equação utilizada para refletir o efeito da tarefa j em tarefas futuras
$f_{j,k}$	Função índice da heurística PW
v	Tarefa artificial inserida em uma sequencia parcial
β_k	Sequência parcial k
π	Sequência criada através de uma solução inicial
λ	Número de linhas da sequencia π
x	Número de linhas a serem inseridas nas heurísticas PF-NEH(x) e PW-NEH(x)
DR_x	Desvio relativo
F_x	Solução encontrada pelo algoritmo
F_{otm}	Solução ótima para um determinado problema
TC	Tempo computacional
Cnm	<i>Makespan</i>
Mf	Tempo de fluxo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	13
1.2 OBJETIVO GERAL	14
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
1.4 ESCOPO.....	15
2 TEORIA DO SEQUENCIAMENTO DA PRODUÇÃO	16
2.1 CONFIGURAÇÃO DAS MÁQUINAS	16
2.2 RESTIÇÕES ADICIONAIS.....	18
2.3 FUNÇÕES OBJETIVOS	20
2.4 MÉTODOS DE RESOLUÇÃO DO PROBLEMA DE SEQUENCIAMENTO	20
2.5 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
3 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA PROPOSTO	23
3.1 RESTRIÇÕES DO PROBLEMA NO CAMPO A.....	23
3.2 RESTRIÇÕES DO PROBLEMA NO CAMPO B.....	24
3.3 RESTRIÇÕES DO PROBLEMA NO CAMPO Γ	25
4 MÉTODOS HEURÍSTICOS AVALIADOS	29
4.1 MÉTODOS UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO DOS MÉTODOS IMPLEMENTADOS	29
4.1.1 Heurística MM.....	29
4.1.2 Heurística PF	30
4.1.3 Heurística wPF.....	32
4.1.4 Heurística PW	33
4.2 HEURÍSTICA NEH.....	35
4.3 HEURÍSTICAS MME, PFE, WPFE E PWE	36
4.4 HEURÍSTICA PW-NEH(X)	37
5 EXPERIMENTAÇÃO COMPUTACIONAL	38
5.1 MÉTODO DE ANÁLISE	38
5.2 RESULTADOS E ANÁLISE	39
5.2.1 Análise dos resultados das heurísticas propostas quando direcionadas para a minimização do <i>makespan</i>	40
5.2.1.1 Porcentagem de sucesso.....	40
5.2.1.2 Desvio relativo médio do <i>Makespan</i> e média computacional.....	42
5.2.2 Análise dos resultados para as heurísticas quando direcionadas para a minimização do tempo de fluxo	46
5.2.2.1 Porcentagem de sucesso.....	46
5.2.2.2 Desvio relativo médio do tempo de fluxo e média computacional.....	49
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
7 REFERÊNCIAS	54
APÊNDICE A - Algoritmo <i>makespan</i> e tempo de fluxo	57

APÊNDICE B - Algoritmo MME.....	58
APÊNDICE C - Algoritmo PFE	60
APÊNDICE D - Algoritmo wPFE	62
APÊNDICE E - Algoritmo PWE.....	64
APÊNDICE F - Algoritmo PW-NEH(x)	67
APÊNDICE G - Tabelas de resultados dos métodos direcionados para a minimização do <i>makespan</i> (menores valores em destaque)	70
APÊNDICE H - Tabelas de resultados dos métodos adaptados para o tempo de fluxo (menores valores em destaque)	74

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentada uma definição abrangente do problema de sequenciamento e sua importância. O objetivo do trabalho é definido, e são apresentadas as etapas utilizadas para atingi-lo.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O problema do sequenciamento está presente nas mais diversas áreas do conhecimento, pois, este existe sempre que houver a possibilidade de escolha da ordem de tarefas a serem executadas. Estas tarefas podem ser aulas de professores, itens a serem fabricados, lugares a serem preenchidos em um ambiente, etc. Na maioria das vezes, porém, estas sequências são ordenadas de forma aleatória, por exemplo, pela ordem de chegada, já que a variação dessas sequências não influencia o processo. Todavia, existem casos, como em indústrias, atividades institucionais e transporte onde a definição dessas sequências influencia diretamente na eficiência do processo podendo trazer grandes benefícios ou prejuízos ao mesmo. Dentro desta visão o processo de sequenciamento pode ser definido como:

“[...] um processo de tomada de decisão que é usado regularmente na base de muitos processos de fabricação e serviços industriais. Ele trata da alocação de recursos e tarefas em um determinado período de tempo e tem como meta a otimização de um ou mais objetivos. (PINEDO, 2008, p. 1)”

Para estes casos faz-se necessário, uma investigação mais aprofundada do problema e suas possíveis soluções, para tanto, deve-se definir claramente qual é o tipo de problema em questão e que métodos serão utilizados para atacá-lo. PINEDO (2008, p. 14), no intuito de detalhar os problemas de sequenciamento, propôs uma forma de descrever os problemas com base em três identificadores: restrições referentes à máquinas; restrições adicionais; e restrições referentes à função objetivo. A partir desses identificadores os problemas de sequenciamento são classificados, e suas características podem ser estudadas de uma maneira mais eficiente.

A escolha da sequência das tarefas, neste contexto, é uma das responsabilidades do setor de Planejamento e Controle da Produção (PCP) que

utiliza varias ferramentas para auxiliar nestas tomadas de decisões (TUBINO, 2007, p. 63). Com o avanço dos métodos computacionais e a crescente complexidade dos problemas, estes métodos têm substituído os meios convencionais para a tomada de decisões para o sequenciamento e podem ser divididos basicamente em dois grupos: Os métodos analíticos, que obtém uma solução exata; e os métodos heurísticos, que embora não garantam uma solução ótima, tentam encontrar uma solução viável, pelo menos próxima da ótima, cujo tempo de computação seja aceitável (FUCHIGAMI, 2010, p. 35).

1.2 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo comparar a eficiência de alguns dos melhores métodos heurísticos de segunda fase quanto a sua capacidade de minimizar as funções objetivos de uma linha *flow shop* permutacional com bloqueio e estoque intermediário igual a zero.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcançar o objetivo geral, o mesmo foi dividido nas etapas que se seguem:

- Encontrar entre os métodos heurísticos propostos na literatura aqueles que fornecem os melhores resultados para a minimização do *makespan* em uma linha *flow shop* permutacional com bloqueio e estoque intermediário igual a zero;
- Adaptar os métodos encontrados para problemas de *flow shop* permutacional com bloqueio e com estoque intermediário igual a zero, cuja função objetivo seja minimizar o tempo de fluxo;
- Implementar os métodos e suas respectivas adaptações utilizando o programa Matlab®;
- Calcular o desvio do *makespan* e do Tempo de fluxo para cada método programado;

- Analisar qual método é mais eficiente para cada função objetivo (*i.e.* minimizar o *makespan* e o tempo de fluxo) utilizando o desvio relativo como parâmetro;
- Calcular o desvio relativo do tempo computacional para a minimização do *makespan* e do tempo de fluxo para cada método programado;
- Avaliar o tempo de processamento de cada método para cada problema utilizando o desvio relativo como parâmetro;

1.4 ESCOPO

Para tratar do tema proposto este trabalho está dividido conforme exposto nos seguintes parágrafos.

Teoria do sequenciamento da produção: neste capítulo são apresentados os principais conceitos teóricos referentes ao problema de sequenciamento e aos métodos para a resolução do mesmo. Estes conceitos foram baseados nos seguintes autores: PINEDO (2008), MACCARTHY e LIU (1993), EMMONS e VAIRAKTARAKIS (2012). É apresentado também um referencial teórico do problema.

Descrição do problema proposto: neste capítulo as restrições propostas são justificadas e o problema é detalhado, exemplificado e comparado com outros problemas de sequenciamento.

Métodos Heurísticos avaliados: este capítulo tem como objetivo apresentar o funcionamento dos métodos heurísticos utilizados para resolver o problema proposto.

Experimentação computacional: neste capítulo os resultados obtidos de cada método são apresentados e avaliados segundo a variação do desvio relativo, porcentagem de sucesso e o tempo computacional utilizado.

Considerações finais: aqui são apresentadas as conclusões do trabalho, e sugeridos trabalhos futuros.

2 TEORIA DO SEQUENCIAMENTO DA PRODUÇÃO

Segundo MACCARTHY e LIU (1993, p. 59) "o sequenciamento pode ser definido com a alocação de recursos ao longo do tempo para realizar determinadas tarefas". O problema de sequenciamento pode ser então descrito pelas tarefas e operações presentes no processo, pelo número e tipos de máquinas que compreendem o local de trabalho, pelos princípios que restringem a maneira com que as tarefas podem ser feitas e pelos critérios pelos quais o sequenciamento será avaliado (CONWAY *et al.*, 1967, p.6). Para a melhor compreensão do problema PINEDO (2008, p. 14) classifica os problemas de sequenciamento utilizando três identificadores, são eles:

α – Referente à configuração das máquinas;

β – Restrições adicionais;

γ – Representa a função objetivo;

2.1 CONFIGURAÇÃO DAS MÁQUINAS

Para o campo α , referente à configuração das máquinas, os problemas são classificados conforme o fluxo das tarefas nas máquinas. Segundo PINEDO (2008, p. 14) o campo α referente ao ambiente das máquinas contém apenas uma entrada e pode ser dividido em:

- **Máquina Única** (1) – o mais simples de todos os ambientes de máquinas onde o ambiente possui apenas uma máquina;
- **Máquinas em paralelo idênticas** (Pm) – a tarefa exige uma única operação que pode ser processada em qualquer uma das máquinas, ou em qualquer sub-conjunto de máquinas;
- **Job Shop** (Jm) – nesta configuração cada tarefa tem uma rotina pré-determinada a seguir;

- **Job Shop com máquinas múltiplas** (FJc) – *Job Shop* onde existem k_i máquinas idênticas em cada estágio i ($i = 1, 2, \dots, m$), sendo que, em cada estágio, cada tarefa é processada por somente uma máquina;
- **Open Shop** (Om) – Cada tarefa é dividida em m operações, com as mesmas operações nas máquinas, mas a ordem de processamento de operações não é especificada. Não há restrições no que diz respeito ao encaminhamento de cada tarefa através das máquinas;
- **Flow shop** (Fm) – Existem m máquinas em série. Cada tarefa deve ser processada em cada uma das m máquinas. Todas as tarefas devem seguir o mesmo percurso;
- **Flow shop permutacional** ($Fperm$) – Variação do sistema *flow shop* em que a ordem de processamento das tarefas é rigorosamente a mesma para todas as máquinas;
- **Flow shop com máquinas múltiplas** (FFc) – combinação do sistema *flow shop* com o sistema de máquinas múltiplas. Neste sistema existem c fases e para cada fase m máquinas idênticas. As tarefas devem passar por todas as fases na mesma sequência, e em cada fase, as tarefas podem ser processadas por apenas uma máquina, não importa qual seja

Na figura 1 é apresentado um diagrama da relação entre as diferentes configurações de máquinas:

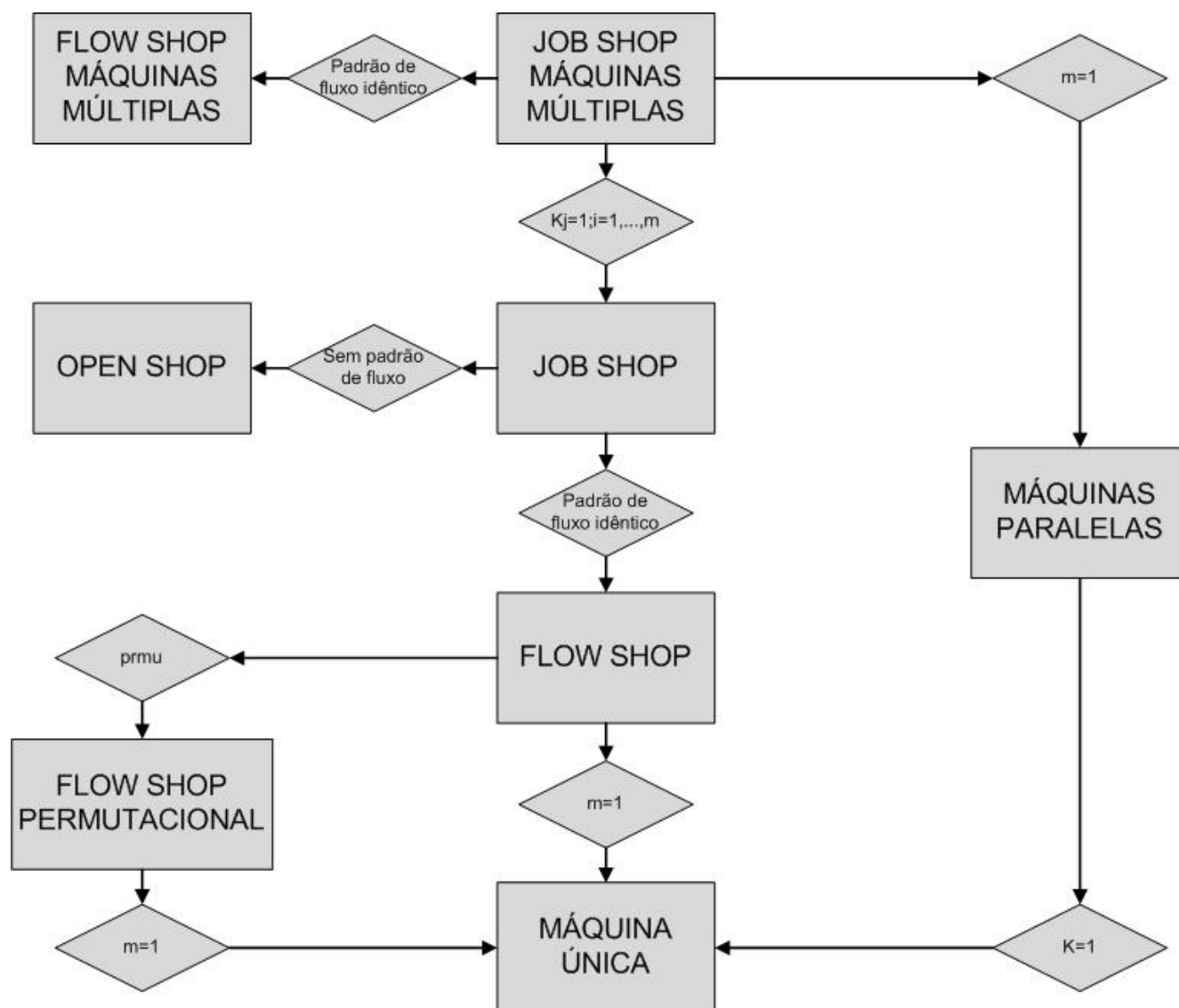


Figura 1 – Relação entre as diversas classes de problemas de sequenciamento de operações em máquinas.

Fonte – Adaptado de MACCARTHY e LIU (1993, p. 62)

2.2 RESTIÇÕES ADICIONAIS

No campo β encontram-se detalhes das características do processo que fornecem restrições adicionais e podem conter nenhuma entrada, uma única entrada ou múltiplas entradas. Entre estas restrições pode-se citar:

- **Permutação** (*prmu*) – nesta restrição a ordem (permutação), em que as tarefas passam através da primeira máquina devem ser mantidos durante todo o processo, logo a primeira peça a entrar será sempre a primeira peça a

sair, este sistema é conhecido como primeiro que entra, primeiro que sai (FIFO¹);

- **Data de lançamento** (r_j) – este símbolo indica que algumas tarefas não podem começar antes de uma data específica;
- **Preempção** ($prmp$) – diz respeito à preferência das peças e indica que não é necessário que uma tarefa seja mantida em uma máquina, uma vez que esta foi iniciada. Neste caso o programador tem o poder de interromper uma tarefa em operação para trocá-la por uma outra tarefa com uma prioridade maior. Entretanto a tarefa interrompida não é perdida, ela pode voltar à máquina para ser finalizada;
- **Sem espera** (nwt) – ocorre em processos de *flow shop* e indica que uma tarefa não está autorizada a esperar entre duas máquinas sucessivas. Como consequência, o tempo de início de uma tarefa na primeira máquina deve ser atrasado até que a tarefa possa passar por todas as máquinas sem nenhuma espera intermediária;
- **Bloqueio** ($block$) – restrição que pode ocorrer em linhas *flow shop* e, quando está presente no problema, indica que pode ocorrer o bloqueio de uma máquina após a conclusão de uma tarefa. Isso pode acontecer quando o estoque intermediário está cheio e a tarefa fica impossibilitada de sair da máquina para seguir o seu fluxo. Um caso especial do bloqueio é quando o estoque intermediário é igual a zero (problema conhecido como *buffer zero*), neste caso o bloqueio ocorre todas as vezes que a tarefa termina de ser processada em uma máquina e a máquina seguinte está ainda processando a tarefa anterior;

¹ *First In First Out*

2.3 FUNÇÕES OBJETIVOS

O último campo do problema de sequenciamento trata da função objetivo a ser otimizada. Entre elas estão (PINEDO, 2008, p. 18):

- **Makespan** (C_{max}) – Tempo para término da última tarefa proposta no processo. A minimização deste problema aumenta a eficiência do processo;
- **Tempo de fluxo** ($\sum C_j$) – soma dos tempos de término de todas as tarefas;

2.4 MÉTODOS DE RESOLUÇÃO DO PROBLEMA DE SEQUENCIAMENTO

Um grande número de métodos tem sido proposto para a resolução do problema de sequenciamento. Segundo MACCARTHY e LIU (1993, p. 64) estes métodos podem ser divididos em três grupos distintos, métodos de ótimos eficientes, métodos de ótimos enumerativos e métodos heurísticos.

Tanto os métodos de ótimos eficientes quanto os métodos de ótimos enumerativos geram uma solução exata para o problema em questão, mesmo para problemas com grandes números de tarefas, porém, alguns deles são restritos a problemas ou classes de problemas específicos mais simples como o problema de *flow shop* com máquina única, outros possuem um custo computacional muito elevado, ou podem simplesmente não encontrar soluções para problemas mais gerais e conseqüentemente mais complexos. Para estes problemas são utilizados os métodos heurísticos.

Segundo EMMONS e VAIRAKTARAKIS (2012, p. 16) “Qualquer procedimento ou algoritmo que gera uma solução para um problema sem qualquer garantia de otimização é chamado de heurística”. Uma heurística eficaz é capaz de conciliar uma boa resposta a um baixo tempo de processamento. Portanto os métodos heurísticos diferentemente dos métodos ótimos não procuram encontrar uma solução exata para o problema proposto, mas, fornecem soluções simplistas e mais fáceis de serem obtidas. Este tipo de solução se torna viável quando a solução exata do problema não pode ser obtida ou quando se torna complexa a ponto de inviabilizar sua obtenção.

Os métodos heurísticos podem ser divididos em três fases (FRAMINAN, GUPTA e LEISTEN, 2004):

- Fase I: Desenvolvimento do índice;
- Fase II: Construção da solução;
- Fase III: Melhoria da solução;

Na primeira fase as tarefas são ordenadas de acordo com uma determinada propriedade, baseada no tempo de processamento de cada trabalho em cada máquina. Esta fase gera uma solução que pode ser uma entrada para a próxima fase ou uma solução em si.

Na segunda fase a solução é construída de uma forma recursiva tentando inserir uma ou mais tarefas programadas na primeira fase em posições diferentes gerando assim uma nova solução.

A terceira fase tem como objetivo refinar as soluções obtidas na primeira ou segunda fase por meio de um procedimento. As duas principais características desta fase são:

- É necessária uma solução inicial;
- A qualidade da solução gerada na fase deve ser sempre igual ou melhor do que solução utilizada para alimentar esta fase;

FRAMINAN, GUPTA e LEISTEN (2004, p. 22) ressaltam que a classificação deste método "fornece poucas informações específicas para os programadores sobre o uso de qualquer heurística ou a combinação de heurísticas para resolver um problema particular". Portanto, ainda é necessária uma extensa comparação entre os desempenhos dos métodos existentes, pois a maioria das comparações apresentadas na literatura cobre apenas parte das heurísticas atuais.

2.5 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Em 1983 NAWAZ, ENSCORE e HAM (1983, *apud* RONCONI, 2004, p. 40) propuseram a heurística denominada Nawaz-Enscore-Ham (NEH) bastante utilizada para o problema de *flow shop* permutacional. Esta heurística é uma das mais utilizadas para o problema *flow shop* o que tem atraído o interesse de pesquisadores para refiná-la (EMMONS e VAIRAKTARAKIS, 2012, p. 120).

MCORMICK *et al.* (1989, *apud* PAN e WANG, 2011 p. 219) desenvolveram uma heurística que trabalha com a minimização dos tempos ociosos e de bloqueio conhecida como *Profile Fitting* (PF).

Baseado nas propriedades do *makespan* RONCONI (2004, 41) propôs uma heurística denominada MinMax (MM).

RONCONI (2004) utilizou a heurística MM e a heurística PF como uma solução inicial para a heurística NEH e obteve duas novas heurísticas construtivas denominadas MME e PFE.

PAN e WANG (2011, p. 220) propuseram, com base na heurística PF uma heurística denominada wPF que insere na função base da heurística PF um peso (w) e uma heurística denominada PW onde a heurística PF recebe conceitos de uma heurística desenvolvida por LIU e REEVES (2001, *apud* PAN e WANG, 2011, p. 221).

Com o objetivo de refinar a Heurística NEH, PAN e WANG (2011) propuseram duas heurísticas construtivas denominadas wPFE e PWE que utilizam as heurísticas wPF e PW como uma solução inicial para a heurística NEH.

PAN e WANG (2011) propuseram um melhoramento para as heurísticas construtivas PFE, wPFE e PWE e criaram as heurísticas PF-NEH(x), wPF-NEH(x) e PW-NEH(x).

3 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA PROPOSTO

Neste capítulo são apresentadas as principais características do problema proposto através dos três indicadores propostos por GRAHAM (1979, *apud* MACCARTHY e LIU. 1993):

3.1 RESTRIÇÕES DO PROBLEMA NO CAMPO α

Segundo EMMONS e VAIRAKTARAKIS (2012, p. 2) o *flow shop* pode ser definido como “um sistema de processamento em que a sequência de tarefas de cada tarefa está totalmente especificada, e todas as tarefas visitam as estações de trabalho na mesma ordem”. Para este tipo de problema, independente do número de máquinas o número de soluções possíveis será sempre igual a $n!$, o que dificulta muito a obtenção de soluções exatas para problemas com um número elevado de tarefas. Segundo NAGANO, BRANCO e MOCCELIN (2009, p. 12) este tipo de problema é definido na teoria que estuda a complexidade dos problemas como NP-hard (não polinomiais difíceis), o que significa que ele poderá ser resolvido de forma exata somente para pequenos casos. A figura 2 apresenta um sistema *flow shop* com três máquinas e duas tarefas. Note que todas as tarefas seguem primeiro para a máquina I, em seguida para a máquina II e por fim para a máquina III, encerrando seu fluxo de produção.

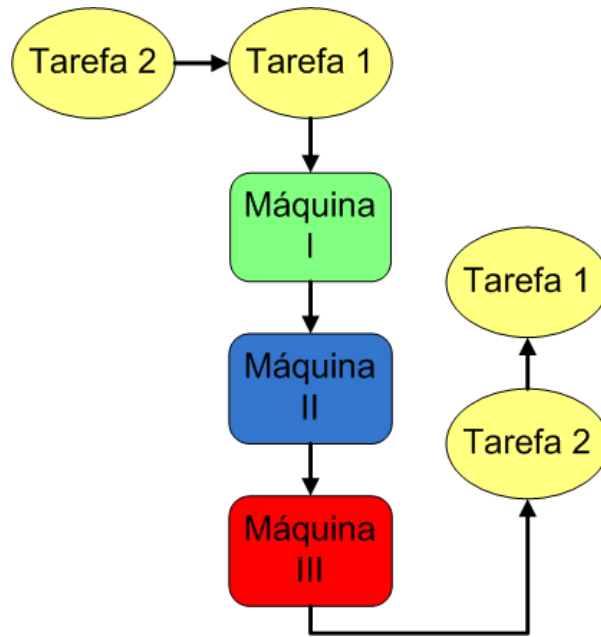


Figura 2 – Sistema *flow shop* com três máquinas e duas tarefas

3.2 RESTRIÇÕES DO PROBLEMA NO CAMPO β

Ao se considerar um problema *flow shop* permutacional com estoque intermediário igual a zero é possível observar que o tempo de término de uma tarefa i em uma máquina m pode ser obtido somando o tempo em que a tarefa i inicia seu processo na máquina m ao tempo de processamento da tarefa i na máquina em questão, entretanto, se a máquina seguinte ainda estiver processando uma tarefa, a tarefa i permanecerá na máquina m até que a máquina seguinte seja liberada, este tempo de espera, chamado bloqueio, é uma restrição inerente a este tipo de problema. O bloqueio é exemplificado na figura 3 onde a tarefa dois é obrigada a esperar por duas unidades de tempo na máquina 2 até que a máquina 3 termine de processar a tarefa um.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
MÁQUINA 1	TAREFA 1	TAREFA 2					TAREFA 3							
MÁQUINA 2		TAREFA 1					TAREFA 2	BLOQUEIO	TAREFA 3					
MÁQUINA 3							TAREFA 1				TAREFA 2			

Figura 3 – Exemplo de bloqueio em uma linha *flow shop*

Diferente do bloqueio, a permutação e o estoque intermediário igual a zero não são restrições inerentes ao processo, mas, fixadas pelo pesquisador. A seleção da permutação como uma restrição para o problema é importante, pois, embora a alteração das sequências de tarefas entre máquinas possa aumentar a qualidade da solução, encontrar uma solução quando estas alterações são permitidas é significativamente mais difícil do que encontrar uma solução quando as sequências não podem ser alteradas entre as máquinas. Este trabalho aborda apenas os problemas *flow shop* permutacional com estoque intermediário igual a zero, pois, uma vez que este problema é resolvido, problemas de *flow shop* permutacional com estoques intermediários positivos e finitos podem ser facilmente adaptados. Para isto, basta considerar os estoques intermediários como máquinas com o tempo de processamento igual a zero (EMMONS e VAIRAKTARAKIS, 2012, p. 222).

3.3 RESTRIÇÕES DO PROBLEMA NO CAMPO γ

Após a apresentação do bloqueio, fica evidente que, para o problema em questão, o tempo em que uma tarefa termina de ser executada $C_{j,k}$ em uma máquina não coincide necessariamente com o tempo em que esta tarefa passa para a máquina seguinte $D_{j,k}$, logo o cálculo do *makespan* utilizará tanto os tempos gastos para processar as tarefas nas máquinas quanto os tempos em que as tarefas aguardaram nas máquinas.

Em um problema *flow shop* permutacional com estoque intermediário igual a zero com m máquinas e n tarefas onde D_{jk} é o tempo em que uma tarefa j sai da máquina k e $P_{j,k}$ é o tempo necessário para se processar a tarefa j na máquina k , o *makespan* será calculado através das equações 1, 2, 3, 4 e 5 adaptadas de RONCONI (2004).

Dada uma matriz do tempo de processamento $P_{j,k}$ (ver tabela 1) com n tarefas (J_1, J_2, \dots, J_n) e m máquinas (M_1, M_2, \dots, M_m) , as equações são apresentadas a seguir:

Tabela 1 – Matriz de tempos de processamento

	M_1	M_2	...	M_k	...	M_m
J_1	$P_{1,1}$	$P_{1,2}$	...	$P_{1,k}$	...	$P_{1,m}$
J_2	$P_{2,1}$	$P_{2,2}$	...	$P_{2,k}$	...	$P_{2,m}$
...
J_j	$P_{j,1}$	$P_{j,2}$	...	$P_{j,k}$	...	$P_{j,m}$
...
J_n	$P_{n,1}$	$P_{n,2}$	...	$P_{n,k}$	...	$P_{n,m}$

Equação (1): O tempo em que a primeira tarefa sai da primeira máquina $D_{1,1}$ será apenas o tempo de processamento da primeira tarefa na primeira máquina $P_{1,1}$.

$$D_{1,1} = P_{1,1} \quad (1)$$

Equação (2): Uma vez que não existem tarefas anteriores à primeira tarefa, ela jamais precisará esperar em uma máquina, logo, o tempo de saída da primeira tarefa nas demais máquinas $D_{1,k}$ pode ser expresso somando os tempos de término da primeira tarefa na máquina anterior $D_{1,k-1}$ e o tempo necessário para o processamento da primeira tarefa na máquina atual $P_{1,k}$.

$$D_{1,k} = D_{1,k-1} + P_{1,k} \quad k = 2, \dots, m \quad (2)$$

Equação (3): Se não houver bloqueio, o tempo de saída das demais tarefas na primeira máquina $D_{j,1}$ será o tempo de saída da tarefa anterior na primeira máquina $D_{j-1,1}$ somado ao tempo de processamento da tarefa atual na primeira máquina $P_{j,1}$, mas, se a tarefa em questão terminar de ser processada e a máquina dois ainda estiver sendo ocupada pela tarefa anterior, o tempo de saída da tarefa atual coincidirá com o tempo em que a tarefa anterior sair da segunda máquina $D_{j-1,2}$.

$$D_{j,1} = \max(D_{j-1,1} + P_{j,1}; D_{j-1,2}) \quad j = 2, \dots, n \quad (3)$$

Equação (4): Os tempos de saída das tarefas dois até n nas máquinas dois até $m-1$ serão a soma do tempo de saída da tarefa atual na máquina anterior $D_{j,k-1}$ mais o tempo de processamento da tarefa atual na máquina atual $P_{j,k}$, porem, se houver o bloqueio, o tempo de saída da tarefa atual na máquina atual $D_{j,k}$ será o tempo de término da tarefa anterior na máquina seguinte $D_{j-1,k+1}$.

$$D_{j,k} = \max(D_{j,k-1} + P_{j,k}; D_{j-1,k+1}) \quad j = 2, \dots, n; k = 2, \dots, m - 1 \quad (4)$$

Equação (5): Para todas as tarefas na última máquina, o tempo de saída pode ser calculado apenas somando o tempo de saída da tarefa atual na máquina anterior com o tempo de processamento da tarefa atual na última máquina, pois, uma vez que não existem próximas máquinas, não existe bloqueio para estas posições.

$$D_{j,m} = D_{j,k-1} + P_{j,k} \quad (5)$$

Na figura 4 é apresenta a matriz de tempos de saída de tarefas sendo construída através dos cinco passos descritos para um problema com m máquinas e n tarefas:

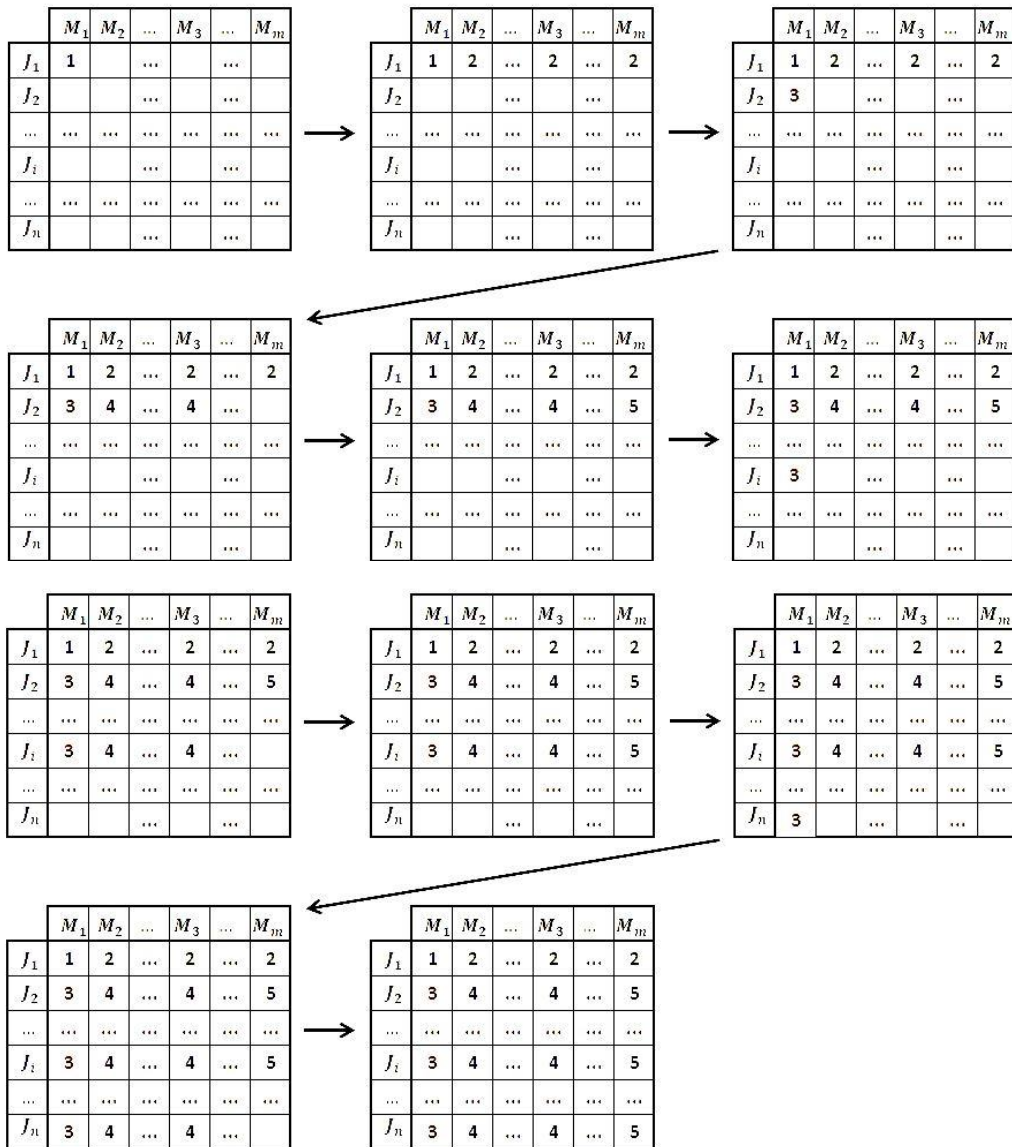


Figura 4 – Construção da matriz de tempos de saída de tarefas através dos cinco passos

Uma vez obtida a matriz de tempos de saída de tarefas, o tempo de fluxo será a soma dos tempos de saída de todas as tarefas na última máquina, ou seja, a soma dos valores da última coluna da matriz de tempos de saída de tarefas:

$$\sum_{q=1}^n D_{q,m}$$

E o makespan será o valor em que a última tarefa sair da última máquina:

$$D_{n,m}$$

4 MÉTODOS HEURÍSTICOS AVALIADOS

Neste capítulo são apresentados os métodos utilizados no presente trabalho. Embora as heurísticas MM, PF, wPF e PW não sejam avaliadas, estas são apresentadas por serem utilizadas na construção das heurísticas PFE, wPFE, MME, PWE e PW-NEH(x).

4.1 MÉTODOS UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO DOS MÉTODOS IMPLEMENTADOS

4.1.1 Heurística MM

Esta Heurística é baseada em propriedades apresentadas por RONCONI (2004, p. 43), e consiste basicamente em 3 passos:

Passo 1: Encontrar a tarefa que possui o menor tempo de processamento na primeira máquina e na última máquina e selecionar estas tarefas como a primeira e a última tarefa da sequência a ser gerada.

Passo 2: Encontrar, entre as tarefas não selecionadas, a tarefa que fornece o menor valor da expressão (7) e selecioná-la como a próxima tarefa da sequência:

$$\alpha_{MM} \sum_{l=1}^{m-1} |P_{c,l} - P_{i,l+1}| + (1 - \alpha_{MM}) \sum_{k=1}^m P_{c,k} \quad (7)$$

Onde:

$P_{c,l}$ = tempo de processamento da tarefa em teste c na máquina l

$P_{i,l+1}$ = tempo de processamento da tarefa já selecionada i na máquina l+1

$P_{c,k}$ = tempo de processamento da tarefa em teste c na máquina k

α_{MM} = parâmetro usado para ponderar os dois termos da expressão.

Passo 3: Refazer o passo dois até que todas as tarefas não selecionadas sejam alocadas na sequência em construção.

Pode-se observar que o primeiro termo da expressão leva em consideração o módulo das diferenças entre tempos de processamento de consecutivas tarefas em consecutivas máquinas e o segundo termo prioriza as tarefas com o menor tempo de processamento nas máquinas. O parâmetro α_{MM} tem como objetivo diferenciar a importância destes dois termos da expressão na seleção da tarefa. RONCONI (2004, p. 44),

4.1.2 Heurística PF

Esta heurística construtiva simples foi proposta por MCCORMICK *et. al.* (1989, *apud* PAN e WANG, 2011, p. 219). A cada interação, uma sequência parcial β testa todas as tarefas ainda não selecionadas como a próxima tarefa da sequência. Neste teste são levados em consideração os tempos ociosos (tempo em que uma máquina fica parada sem nenhuma tarefa em estoque) e bloqueios gerados pela tarefa testada (ver fig. 4), sendo que, a tarefa com a menor soma destes tempos será selecionada como a próxima tarefa da sequência. Este teste é repetido até que todas as tarefas não selecionadas tenham sido inseridas na sequência em construção.



Figura 5 – Exemplo de bloqueio e tempo ocioso em um sistema *flow shop*

Segue abaixo o comportamento da heurística PF.

Passo 1: Selecionar a tarefa com a menor soma do tempo de processamento como a primeira tarefa da sequência parcial β .

Passo 2: Testar para próxima posição da sequência todas as tarefas não selecionadas e escolher a que retornar o menor valor da expressão (8)

$$\delta_{j,k} = \sum_{i=1}^m (D_{[k+1],i} - D_{[k],i} - P_{j,i}) \quad (8)$$

Onde:

$D_{[k+1],i}$ =tempo de término da tarefa em teste na máquina i.

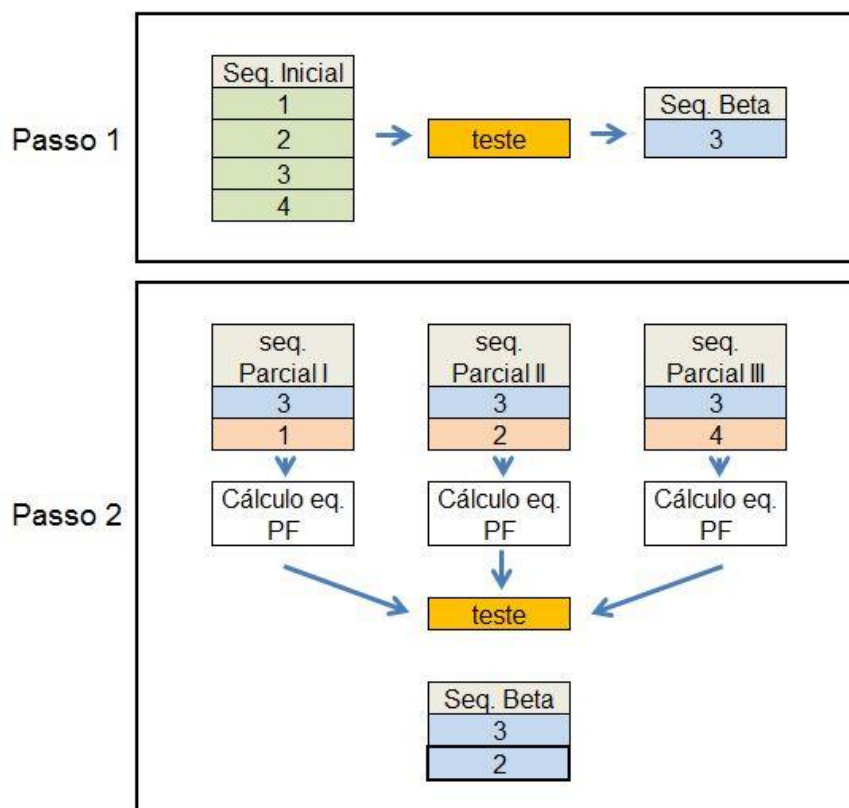
$D_{[k],i}$ =tempo de término da tarefa já alocada na sequência beta na máquina

i.

$p_{j,i}$ = tempo de processamento da tarefa em teste na máquina i.

Passo 3: Repetir o passo 2 até que todas as tarefas não selecionadas sejam alocadas em β .

A figura 5 representa o funcionamento da heurística PF.



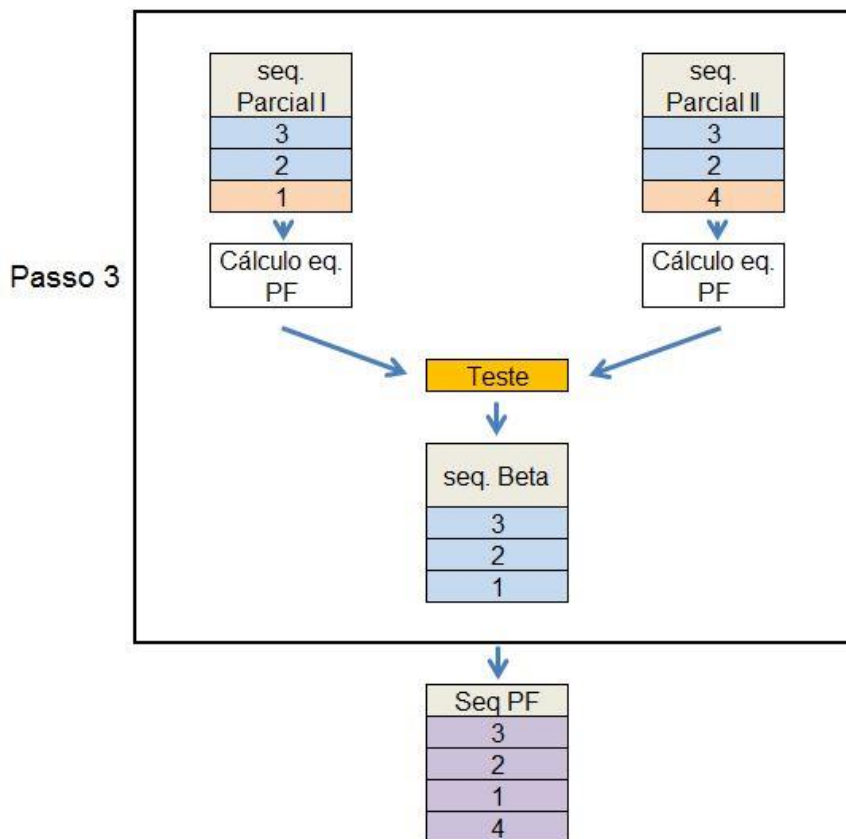


Figura 6 – Procedimento da heurística PF para um problema *flow shop*, com quatro tarefas

4.1.3 Heurística wPF

Pela expressão que rege a heurística PF, pode notar-se que esta assume o tempo ocioso e o bloqueio de todas as máquinas como tendo o mesmo efeito sobre o *makespan*. A heurística wPF apresentada por PAN e WANG (2011, p. 221) propõe uma soma ponderada dos termos da expressão que rege a heurística PF, adicionando a ela um peso que decresce conforme os estágios das máquinas e tarefas avançam. Logo, o procedimento desta heurística é o mesmo da heurística PF exceto pela adição do peso w_i (equação (10)) na expressão (8), gerando a expressão (9):

$$\delta_{j,k} = \sum_{i=1}^m w_i (D_{[k+1],i} - D_{[k],i} - P_{j,i}) \quad (9)$$

Onde:

$$w_i = m / (i + k(m - i) / (n - 2)) \quad (10)$$

A matriz a seguir é um exemplo do comportamento do peso ao longo das posições de uma matriz com $m=5$ e $n=10$:

Tabela 2 – Exemplo da distribuição dos pesos w_i na heurística wPF

	M1	M2	M3	M4	M5
T1	2,5	1,8182	1,4286	1,1765	1
T2	2	1,6	1,3333	1,1429	1
T3	1,6667	1,4286	1,25	1,1111	1
T4	1,4286	1,2903	1,1765	1,0811	1
T1	1,25	1,1765	1,1111	1,0526	1
T2	1,1111	1,0811	1,0526	1,0256	1
T3	1	1	1	1	1
T4	0,9091	0,9302	0,9524	0,9756	1
T1	0,8333	0,8696	0,9091	0,9524	1
T2	0,7692	0,8163	0,8696	0,9302	1

4.1.4 Heurística PW

Quando se analisa as heurísticas PF e wPF pode-se observar que, para cada interação, estas se preocupam somente com a minimização do bloqueio e do tempo ocioso da tarefa em teste, mas, tarefas posteriores não são analisadas, embora seja obvio que estas influenciem o *makespan* e tempo de fluxo. Uma vez constatada esta fraqueza, PAN e WANG (2011, p. 221) criam uma heurística que leva em consideração não apenas o tempo ocioso e bloqueio da tarefa j testada, mas, também o efeito no tempo de término e início de tarefas futuras. Para isto, esta heurística usa uma tarefa artificial v que é anexada a sequencia parcial β da heurística wPF como se fosse agendada depois da tarefa j para refletir o efeito de outras tarefas não agendadas.

Primeiramente é calculado o tempo de término $d_{[k+2],i}$, e a soma dos tempos ociosos e de bloqueios da suposta tarefa v inserida na sequência parcial β utilizando um peso w_i da mesma maneira que a heurística wPF. A equação (11) é utilizada para refletir o efeito da tarefa j em tarefas futuras.

$$\chi_{j,k} = \sum_{i=1}^m w_i (D_{[k+2],i} - D_{[k+1],i} - P_{v,i}) \quad (11)$$

Após o cálculo da equação (11), a equação que rege a heurística wPF é combinada a equação $\chi_{j,k}$, para obter a função índice da heurística PW, expressa através da equação (12):

$$f_{j,k} = (n - k - 2)\delta_{j,k} + \chi_{j,k} \quad (12)$$

Na equação (12) a expressão $(n - k - 2)$ é usada para balancear os tempos ociosos e os tempos de bloqueio causados pela tarefa j e o efeito da tarefa j em tarefas futuras.

Para facilitar a compreensão da heurística PW PAN e WANG (2011, p. 221) apresentam o funcionamento desta heurística como se segue:

Passo 1: Selecionar a tarefa que retornar o menor valor para a expressão $f_{j,0}$ como a primeira tarefa da sequência parcial $\beta = (\beta_1)$. Se existirem tarefas com o mesmo valor de $f_{j,0}$, selecionar a que retornar o menor valor de $\chi_{j,0}$.

Passo 2: para k de 1 até $n-2$

Calcular o tempo de término $d_{[k],i}$, $i = 1, 2, \dots, m$ para a última tarefa β_k na sequência parcial $\beta = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k)$.

Para cada tarefa $j \in U$, como se fosse anexada e se tornasse a $(k + 1)$ ésima tarefa de β , calcular o tempo de processamento $p_{v,i}$ para a tarefa artificial v , e o tempo de término $d_{[k+1],i}$ da tarefa j e $d_{[k+2],i}$ da tarefa artificial v , para $i=1, 2, \dots, m$. Calcular a função índice $f_{j,k}$.

Selecionar a tarefa que retornar o menor valor de $f_{j,k}$ como a $(k + 1)$ ésima tarefa de β .

Passo 3: A última tarefa de U é anexada em β como a n ésima tarefa de β .

4.2 HEURÍSTICA NEH

Esta heurística foi proposta por NAWAZ, ENSCORE JR. e HAM (1983, *apud* RONCONI, 2004, p. 40) e segundo PAN e WANG (2011, p. 222) tem sido reconhecida como o melhor método para o problema *flow shop* permutacional quando o critério é a minimização do *makespan*. Este método possui duas fases. Na primeira fase, uma sequência base é formada através de uma regra denominada *Longest Process Time* (LPT) onde as tarefas são ordenadas de acordo com o tempo total de processamento (soma dos tempos de processamento de uma tarefa em todas as máquinas), em ordem decrescente. A segunda fase do método consiste em selecionar a primeira tarefa da sequência gerada e para $i=2, \dots, n$ gerar sequências parciais inserindo a i -ésima tarefa em todas as possíveis posições da sequência parcial. A sequência que apresentar o menor valor de *makespan* é selecionada como a próxima tarefa da sequência parcial. Este é o funcionamento da heurística original, mas, para o presente trabalho além do método original, que busca a otimização do *makespan*, o mesmo será adaptado para escolher a tarefa que apresentar o menor valor do tempo de fluxo, sendo assim, o método adaptado irá otimizar o tempo de fluxo. Uma vez que esta heurística serve de base para todas as outras heurísticas avaliadas, quando a heurística NEH for utilizada para otimizar o tempo de fluxo elas também serão direcionadas para a minimização do tempo de fluxo e não mais do *makespan*.

Para o melhor entendimento da heurística, seu funcionamento é exemplificado na figura 7 para um problema aleatório com 4 tarefas:

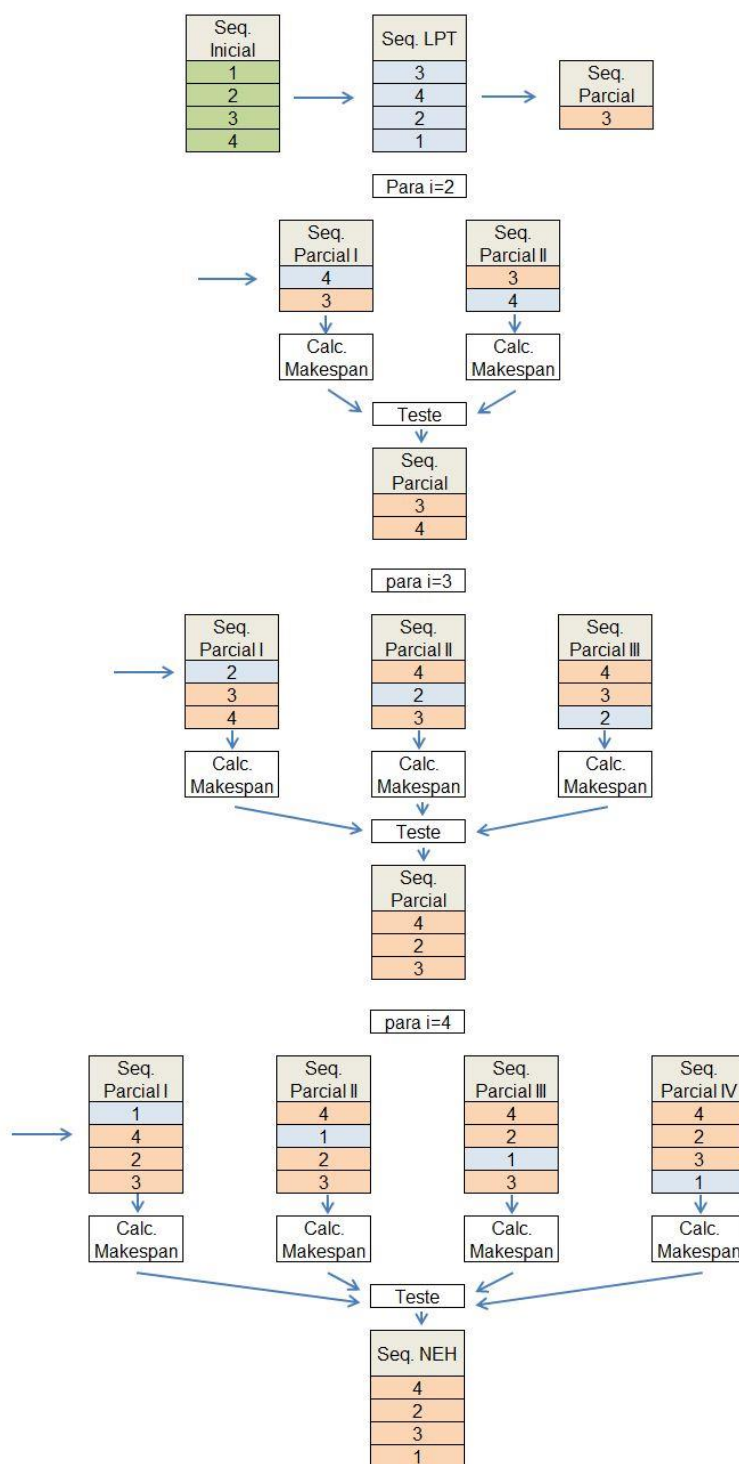


Figura 7 – Funcionamento da heurística NEH para um sistema *flow shop* com quatro tarefas

4.3 HEURÍSTICAS MME, PFE, WPFE E PWE

É notório que o desempenho da heurística NEH é influenciado pela sequência base utilizada para criar as sequências parciais. Sendo assim, a utilização de um

método mais eficiente para a obtenção da sequência base pode aumentar o desempenho da rotina NEH. RONCONI (2004, p. 45) propõe então uma heurística denominada MME e PFE onde as sequências base utilizadas na construção da sequência do método NEH são respectivamente MM e PF ao invés da LPT. PAN e WANG combinaram a heurística NEH com as heurísticas, wPF e PW, utilizando estas para gerar a sequência base da NEH e deram origem a três novas heurísticas construtivas: MME, wPFE e PWE. No presente trabalho estas heurísticas utilizaram a heurística NEH adaptada para minimização do tempo de fluxo.

4.4 HEURÍSTICA PW-NEH(X)

Enquanto a heurística PWE utiliza a heurística PW apenas para gerar uma solução inicial para a construção da NEH, a heurística PW-NEH(x) busca explorar melhor características específicas da heurística PW. A heurística em questão foi criada a partir da heurística PW-NEH, que após criar uma sequência inicial $\beta = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)$ a partir da heurística PW, ao invés de utiliza-la apenas como uma solução inicial, criam uma sequência $\pi = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{n-\lambda})$ e submete esta sequência ao procedimento da heurística NEH para os valores entre $n - \lambda + 1$ até n .

Sendo assim, a heurística PW-NEH(x) propõem criar uma sequência $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ e testar os primeiros x s valores desta sequência como sendo a primeira tarefa da sequência β criada na heurística PW-NEH. Após o teste das x s soluções geradas, é escolhida a solução que retornar o menor valor do *makespan*. A seguir o procedimento da heurística PW-NEH(x) é apresentado conforme PAN e WANG:

Passo 1: Gerar uma sequência de tarefas $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ em ordem crescente do tempo total de processamento.

Passo 2: para l de 1 até x (gerar x s sequências)

Fazer da tarefa α_l a primeira tarefa e gerar uma sequência $\beta = (\alpha_l, \beta_2, \dots, \beta_n)$ usando a heurística PW

criar uma sequência $\pi^l = (\alpha_l, \beta_2, \dots, \beta_{n-\lambda})$ a partir da sequência β

Passo 3: para $k=n-\lambda$ até n

Usar o procedimento de enumeração NEH

5 EXPERIMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos através da experimentação computacional. Os resultados foram avaliados através do desvio relativo médio, porcentagem de sucesso e tempo computacional. A eficiência de cada método é discutida. As heurísticas foram implementadas no software Matlab® e todas recebem a matriz de tempos de processamento como dado único de entrada e fornecem ao usuário o *makespan* (C_{nm}) e o tempo computacional (TC) para as heurísticas direcionadas para a minimização do *makespan* e o tempo de fluxo (Mf) e o tempo computacional (TC) para as heurísticas adaptadas para minimizar o tempo de fluxo. O tempo é medido em segundos. As simulações foram processadas em um computador com processador Intel® Core™ i3-3110M (2.4 GHz) com 4 GB de memória RAM.

Na implementação das heurísticas MME, PFE, wPFE, PW e PW-NEH(x) foram utilizadas as rotinas MM, PF, wPF e PW implementadas por SANTOS (2013, p.46). Na heurística MME o coeficiente α_{MM} recebeu o valor de 0,75 e na heurística PW-NEH(x), os coeficientes x e λ receberam respectivamente os valores de 5 e 20.

5.1 MÉTODO DE ANÁLISE

As heurísticas avaliadas foram submetidas aos problemas da base de TAILLARD (1993, p. 3) composta por 120 matrizes separadas em 12 classes de problemas de acordo com o número de linhas e colunas. Cada classe possui 10 matrizes compostas de valores aleatórios entre de 0 a 99. Estes valores no presente trabalho serão os tempos de processamento das tarefas nas máquinas. A Tabela 3 apresenta o número de problemas para cada classe $n \times m$ de matrizes.

Tabela 3 – Número de problemas para cada classe $n \times m$ das matrizes de Taillard

		Número de máquinas (m)		
		5	10	20
Número de tarefas (n)	20	10	10	10
	50	10	10	10
	100	10	10	10
	200	0	10	10
	500	0	0	10

Uma vez obtidos os resultados, estes foram avaliados através do desvio relativo, da porcentagem de sucesso e da média do tempo computacional.

A porcentagem de sucesso é calculada dividindo a quantidade total de sucesso pelo número total de problemas resolvidos por método para uma classe determinada de problemas ou para todos os problemas. É considerado sucesso o método que conseguir o menor valor da função objetivo avaliada (GIGANTE, 2010, p. 53). O método que apresenta a maior porcentagem de sucesso é o que mais vezes obteve o melhor resultado para a função avaliada.

O desvio relativo é a porcentagem da variação correspondente a melhor solução obtida pelos métodos. Quanto menor o valor do desvio relativo mais perto a solução do método chegou da melhor solução entre os métodos. Caso o desvio relativo seja igual a zero, significa que tal método forneceu o melhor valor para o problema (FUCHIGAMI, 2010, p. 125). Devido ao grande número de problemas, os métodos foram avaliados por classes de problemas e o desvio relativo utilizado foi a média aritmética dos desvios relativos dos problemas de uma determinada classe de problemas. O desvio relativo DR_x pode ser calculado através da equação 13.

$$DR_x = \frac{F_x - F_{otm}}{F_{otm}} \quad (13)$$

Onde:

F_x = solução encontrada pelo algoritmo

F_{otm} = melhor solução entre os algoritmos implementados

5.2 RESULTADOS E ANÁLISE

Os resultados obtidos foram analisados separadamente divididos em análise dos métodos propostos para otimização do *makespan* e análise dos métodos adaptados para o tempo de fluxo.

5.2.1 Análise dos resultados das heurísticas propostas quando direcionadas para a minimização do *makespan*

5.2.1.1 Porcentagem de sucesso

Através da tabela 4 foram gerados os gráficos 1 e 2 que apresentam a porcentagem de sucesso de *makespan* (Cnm) e a porcentagem de vezes que o método obteve o menor tempo computacional (TC) para as 6 heurísticas originais, direcionadas para a minimização do *makespan*.

Tabela 4 – Número de vezes em que um método obteve o melhor resultado para o tempo computacional e *makespan* para os métodos direcionados para a minimização do *makespan* (maior melhor)

	MME		PFE		wPFE		PWE		NEH		PW-NEH(x)	
	Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC
20x5	1	0	1	2	1	4	0	0	0	4	8	0
20x10	2	0	0	3	1	4	0	0	1	3	7	0
20x20	4	1	0	4	0	2	2	0	3	3	3	0
50x5	0	6	1	0	0	0	0	0	0	4	9	0
50x10	0	7	1	0	0	0	0	0	0	3	9	0
50x20	2	7	1	0	0	0	1	0	1	3	5	0
100x5	0	4	0	0	0	0	0	0	0	6	10	0
100x10	0	4	0	0	0	0	0	0	0	6	10	0
100x20	2	4	0	0	0	0	0	0	0	6	8	0
200x10	0	8	0	0	0	0	0	0	0	2	10	0
200x20	0	1	0	0	0	0	0	0	0	9	10	0
500x20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	10
TOTAL	11	42	4	9	2	10	3	0	5	49	99	10

No gráfico 1 é possível observar que a heurística PW-NEH(x), foi muito mais eficiente do que as outras heurísticas avaliadas com relação a minimização do *makespan* tendo 82,5% de acerto, enquanto a heurística wPFE foi a que obteve menos vezes os melhores resultados para esta função objetivo, tendo uma parcela de apenas 1,67% de todos os melhores resultados. Destaca-se a eficiência da heurística MME que mesmo sendo mais simples do que as heurísticas PFE, wPFE e PWE conseguiu encontrar os melhores resultados para 9,17% dos problemas propostos, enquanto as heurísticas PFE, wPFE e PWE obtiveram juntas 7,5% de sucesso.

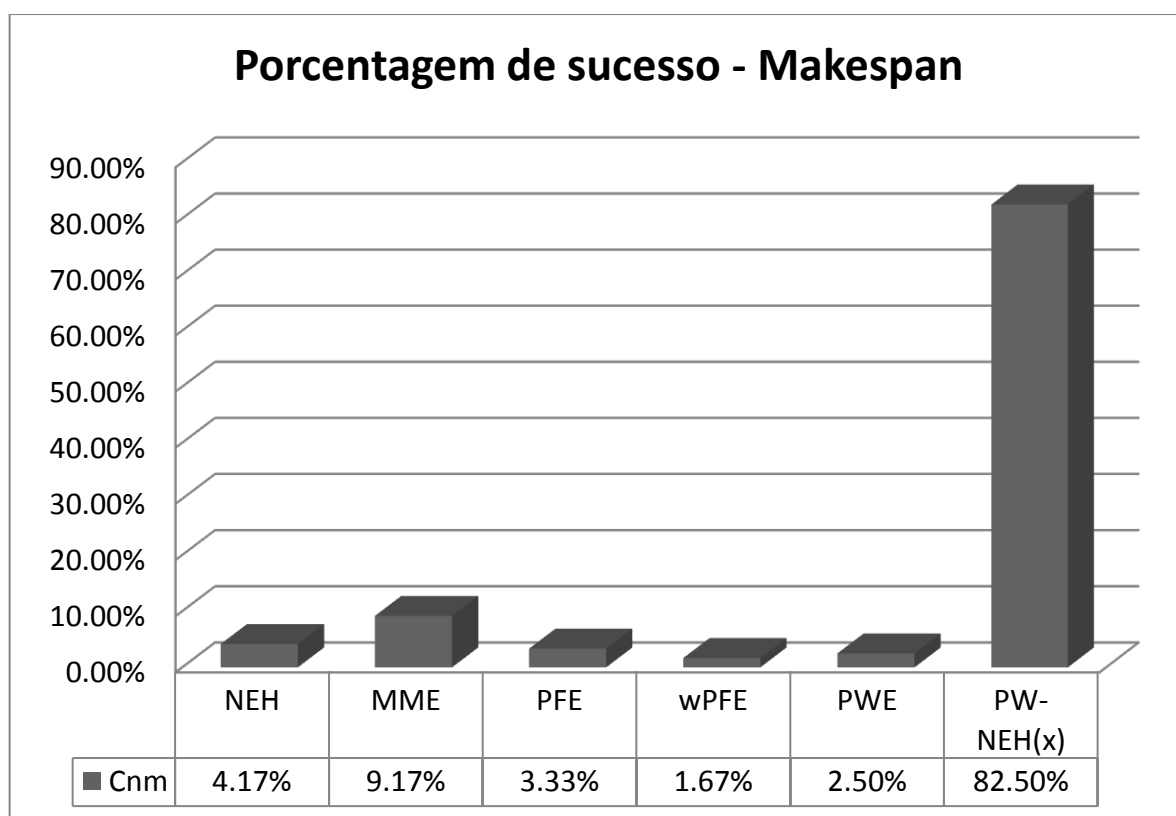


Gráfico 1 – Porcentagem de sucesso de *makespan* para os métodos direcionados para a minimização do *makespan* (maior melhor)

O gráfico 2 mostra que a distribuição de porcentagens de vezes que cada método obteve o menor tempo computacional apresentou a heurística NEH como a mais rápida em 40,83% dos problemas. Este resultado é esperado uma vez que todas as outras heurísticas são geradas a partir desta heurística. A heurística PW não apresenta o melhor resultado com relação ao tempo computacional para nenhum problema devido a sua complexidade com relação às outras heurísticas. Já a heurística PW-NEH(x) apresenta os menores tempos computacionais para todos

os problemas da última classe de problemas (ver tabela 4). Isto se deve ao fato de que, embora esta heurística seja mais complexa do que as outras, para o caso dos problemas com 500 tarefas, ela fixará as 480 primeiras tarefas e utilizará a heurística NEH somente para as 20 últimas tarefas, enquanto as outras heurísticas utilizam a heurística NEH desde a primeira tarefa. Uma vez que o tempo computacional depende principalmente do número de tarefas em que a heurística NEH é submetida dentro dos métodos é esperado que este método seja mais rápido nesta classe de problemas. Destaca-se também a alta performance da heurística MME que, mesmo criada a partir da heurística NEH conseguiu obter um tempo computacional próximo à desta heurística.

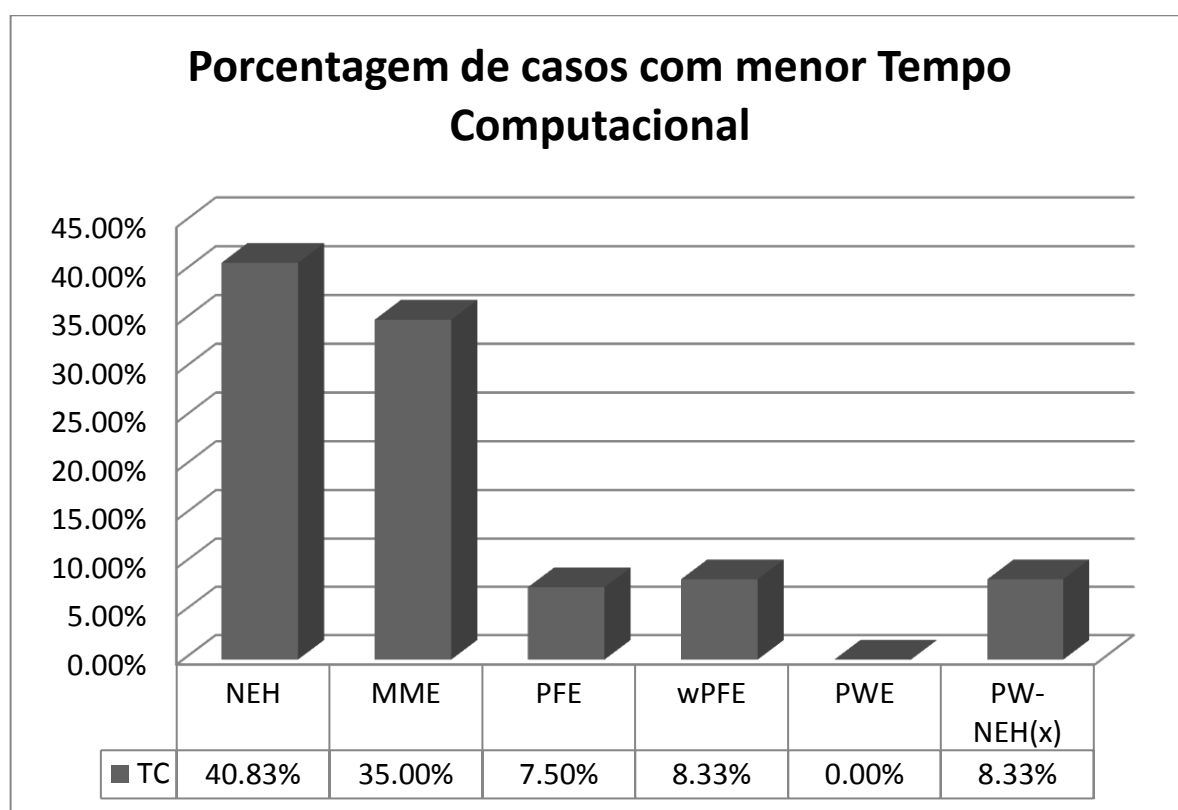


Gráfico 2 – Porcentagem de casos com menor tempo computacional para os métodos direcionados para a minimização do *makespan* (maior melhor)

5.2.1.2 Desvio relativo médio do *Makespan* e média computacional

A tabela 5 apresenta as médias aritméticas do desvio relativo de cada heurística para cada classe de problemas e as médias de tempo computacional.

Tabela 5 – Desvio relativo médio do *makespan* e média do tempo computacional (em segundos) para os métodos direcionados para a minimização do *makespan* (menor melhor)

	MME		PFE		wPFE		PWE		NEH		PW-NEH(x)	
	Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC
20x5	2,4%	0,031	2,4%	0,033	2,4%	0,027	2,4%	0,037	2,4%	0,028	0,2%	0,139
20x10	2,0%	0,031	2,7%	0,033	2,4%	0,030	1,7%	0,041	1,8%	0,031	0,3%	0,154
20x20	0,6%	0,035	2,7%	0,034	2,2%	0,032	1,8%	0,045	0,7%	0,029	0,8%	0,176
50x5	4,2%	2,036	4,3%	2,109	3,9%	2,105	4,3%	2,242	5,7%	2,030	0,0%	4,438
50x10	2,0%	0,294	2,0%	0,314	2,3%	0,314	2,6%	0,350	3,0%	0,298	0,2%	1,149
50x20	0,7%	0,322	2,0%	0,340	1,2%	0,342	1,3%	0,399	2,5%	0,325	0,6%	1,334
100x5	4,2%	2,04	4,3%	2,11	3,9%	2,11	4,3%	2,24	5,7%	2,03	0,0%	4,44
100x10	2,9%	2,15	3,1%	2,22	3,5%	2,22	3,7%	2,40	5,1%	2,15	0,0%	4,85
100x20	1,3%	2,37	2,0%	2,46	1,9%	2,45	1,5%	2,71	2,4%	2,36	0,1%	5,67
200x10	4,5%	16,67	4,7%	16,99	5,8%	16,95	5,5%	17,72	6,3%	16,70	0,0%	20,05
200x20	3,0%	18,43	3,1%	18,72	3,2%	18,66	3,1%	19,91	4,5%	18,36	0,0%	23,69
500x20	4,2%	285,0	4,2%	286,8	4,8%	286,1	4,8%	294,9	5,5%	283,8	0,0%	158,4

Os gráficos 3, 4 e 5 apresentam o desvio relativo médio do *makespan* e a média do tempo computacional em segundos para cada classe de problemas para os métodos que buscam a otimização do *makespan*. Estes gráficos foram criados a partir da tabela 5.

Pode-se notar no gráfico 3 que exceto para a classe de problemas com 20 máquinas e 20 tarefas, todas as heurísticas criadas a partir da heurística NEH superam seu desempenho o que comprova a eficiência das mesmas. Também é possível notar a grande superioridade da heurística PW-NEH(x) principalmente para problemas de grande porte com um número de tarefas acima de 100. O comportamento de todas as heurísticas é basicamente o mesmo o que é esperado uma vez que todas têm como heurística base a NEH. Neste comportamento nota-se uma grande dificuldade em se minimizar o *makespan* nas classes 20x5, 50x5, 100x5 e 200x10 onde o número de máquinas é muito menor do que o número de tarefas. Entretanto conforme o número de máquinas aumenta e o número de tarefas continua fixo, as heurísticas aumentam sua eficiência (exceto para a heurística PW-NEH(x)). Destaca-se o comportamento da heurística MME que embora seja mais simples do que as heurísticas PFE, WPFE e PWE obteve valores melhores do que todas estas para seis das 12 classes de problemas, e resultados semelhantes nas outras classes.

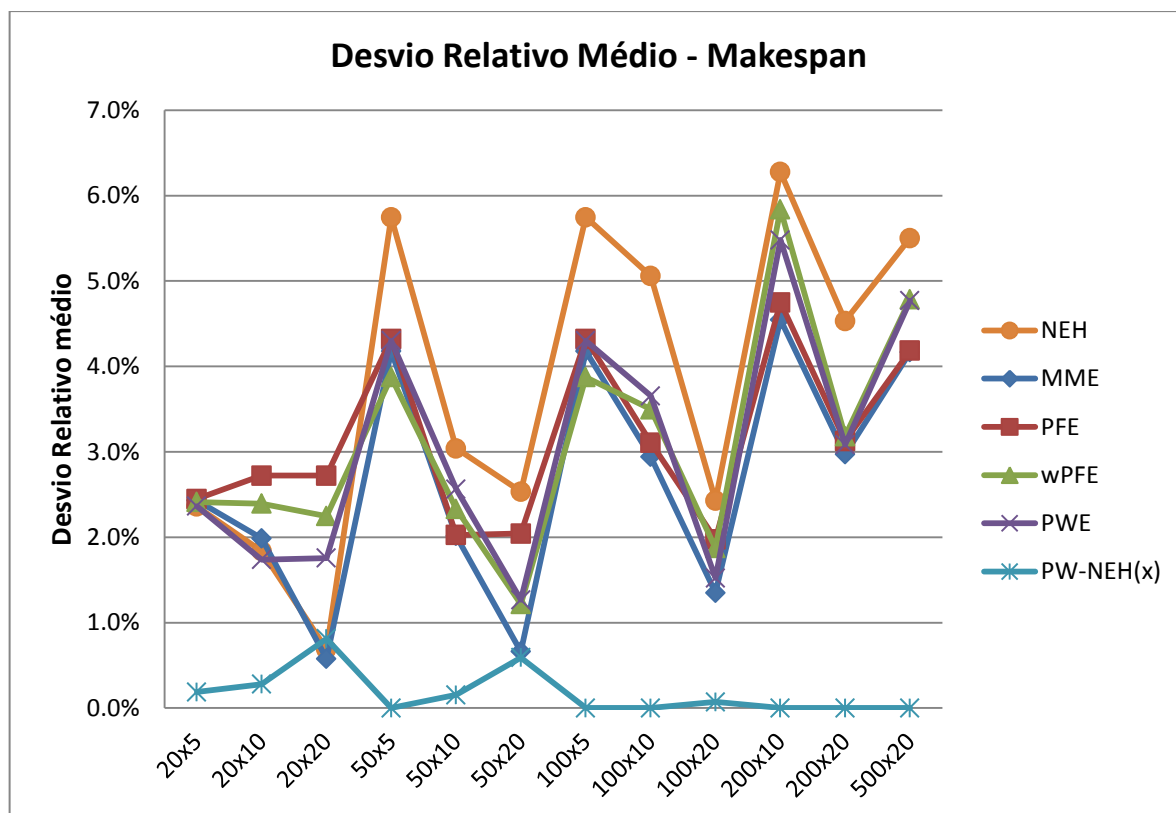


Gráfico 3 – Desvio relativo médio do *makespan* para os métodos direcionados para a minimização do *makespan* (menor melhor)

Para a avaliação do tempo computacional foram calculadas as médias aritméticas dos tempos computacionais de cada classe de problema para cada heurística (ver tabela 5). A partir destes dados criou-se o gráfico 4 para os problemas com até 200 tarefas e 20 máquinas e o gráfico 5 para a classe de problemas com 500 tarefas e 20. Isto se fez necessário devido ao excessivo aumento da ordem de grandeza do tempo computacional para os problemas com 500 tarefas e 20 máquinas.

No gráfico 4 é possível observar que a heurística com maior média de tempo computacional para todas as classes avaliadas no gráfico é a PW-NEH(x). Isto se deve principalmente ao fato de esta heurística gerar cinco possíveis sequencias enquanto as outras heurísticas geram apenas uma. É possível notar também o mesmo comportamento para todas as heurísticas avaliadas com um crescimento abrupto da média de tempo computacional quando os problemas passam de 100 para 200 tarefas. Este comportamento é devido ao crescimento exponencial do número de testes feito pela heurística NEH dentro dos métodos.

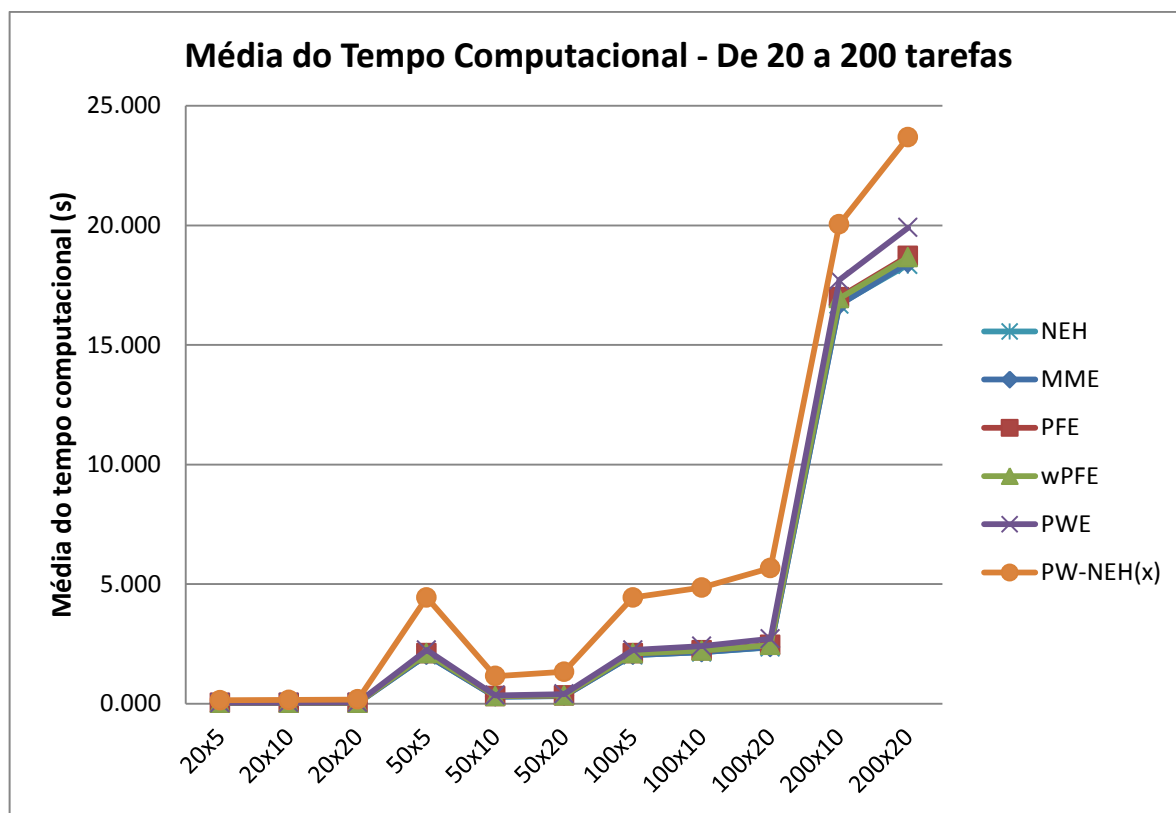


Gráfico 4 – Média do tempo computacional (em segundos) para os problemas com 20, 50, 100 e 200 tarefas para os métodos direcionados para a minimização do *makespan* (menor melhor)

No gráfico 5 nota-se que as heurísticas NEH, MME, PFE e WPFE obtiveram praticamente os mesmos valores o que mostra a forte influencia da heurística NEH dentro dos outros métodos, principalmente para problemas de grande porte. É possível também observar que a heurística PW-NEH(x) apresentou o menor valor entre as heurísticas, demorando em média 45% menos tempo para resolver os problemas. Isto se deve ao fato de que, embora a heurística PW-NEH(x) gere 5 sequencias ao invés de uma, ela utiliza o método NEH para obter somente os 20 últimos valores de cada sequencia, ou seja, para um problema com 500 tarefas, as 480 primeiras tarefas já são selecionadas e não passam pelo procedimento da heurística NEH. Logo esta heurística é sem duvida a melhor entre as heurísticas testadas, principalmente para problemas de grande porte onde ela apresenta, não só os melhores resultados de desvio relativo médio como também as melhores médias computacionais.

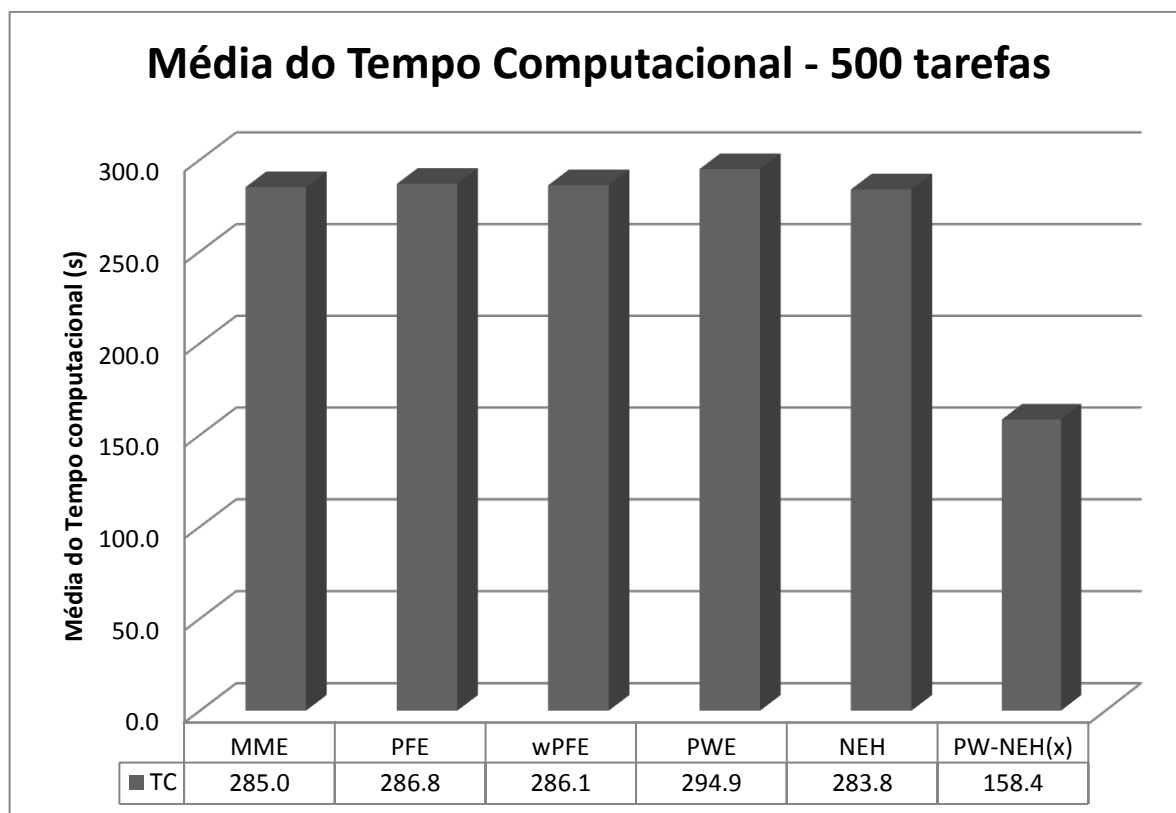


Gráfico 5 – Média do tempo computacional (em segundos) para os problemas com 500 tarefas para os métodos direcionados para a minimização do *makespan* (menor melhor)

5.2.2 Análise dos resultados para as heurísticas quando direcionadas para a minimização do tempo de fluxo

5.2.2.1 Porcentagem de sucesso

A Tabela 6 apresenta o número de sucessos para o tempo de fluxo e o número de vezes que cada método obteve o menor tempo computacional de cada método para cada classe de problemas.

Tabela 6 – Número de vezes em que um método obteve o melhor resultado entre os métodos para o tempo computacional e tempo de fluxo para os métodos direcionados para a minimização do tempo de fluxo (maior melhor)

	MME		PFE		wPFE		PWE		NEH		PW-NEH(x)	
	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC
20x5	1	2	1	1	1	1	1	1	2	5	5	0
20x10	2	1	0	1	1	4	1	0	1	4	6	0
20x20	1	0	1	3	2	3	1	0	1	4	5	0
50x5	1	7	0	0	0	0	0	0	0	3	9	0
50x10	0	8	0	0	0	0	0	0	0	2	10	0
50x20	0	7	0	0	0	0	0	0	0	3	10	0
100x5	0	6	0	0	0	0	0	0	1	4	9	0
100x10	0	7	0	0	0	0	0	0	0	3	10	0
100x20	0	6	0	0	0	0	0	0	0	4	10	0
200x10	0	7	0	0	0	0	0	0	0	3	10	0
200x20	0	3	0	0	0	0	0	0	0	7	10	0
500x20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	10

Os gráficos 6 e 7 apresentam a porcentagem de sucesso para a minimização do tempo de fluxo e a porcentagem de vezes que cada método obteve o menor tempo computacional dos métodos adaptados para a otimização do tempo de fluxo. Estes foram criados a partir dos dados da tabela 6.

Através do gráfico 6 pode-se perceber mais uma vez a grande superioridade do método PW-NEH(x) que obteve os melhores resultados de tempo de fluxo entre os métodos em 86,67% dos problemas, superando a porcentagem de acerto deste método para a minimização do *makespan* que foi de 82,5%. Pode-se observar também que os métodos PFE, wPFE e PWE criados a partir do método NEH encontraram um número menor de melhores soluções do que o próprio método NEH.

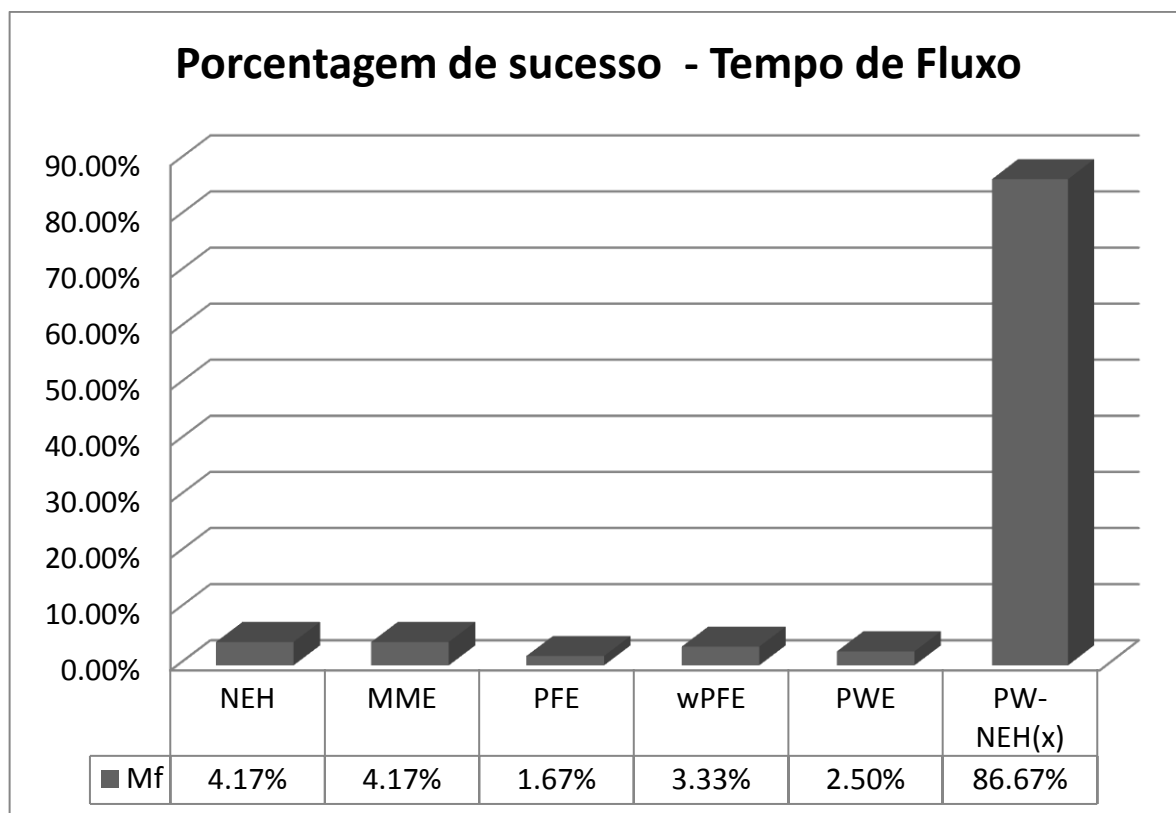


Gráfico 6 – Porcentagem de sucesso do tempo de fluxo para os métodos adaptados para a minimização do tempo de fluxo (maior melhor)

Através do gráfico 7 percebe-se que a heurística MME foi a que mais vezes obteve os menores resultados para o tempo computacional com 45% de sucesso. É importante ressaltar que esta heurística superou a própria heurística base NEH em 10%. Mais uma vez o método com menor número de menores tempos computacionais entre os métodos foi o PWE devido a sua complexidade. O método PW-NEH(x) adaptado para o tempo de fluxo, assim como o método original também conseguiu obter os menores tempos computacionais para todos os problemas da classe 500x20. O motivo é o mesmo que no caso anterior. O método PW-NEH(x), apesar de gerar 5 possíveis sequências, utiliza o método NEH somente para a ordenação dos 20 últimos valores, ou seja, os 480 primeiros valores da sequência já são definidos através da heurística PW.

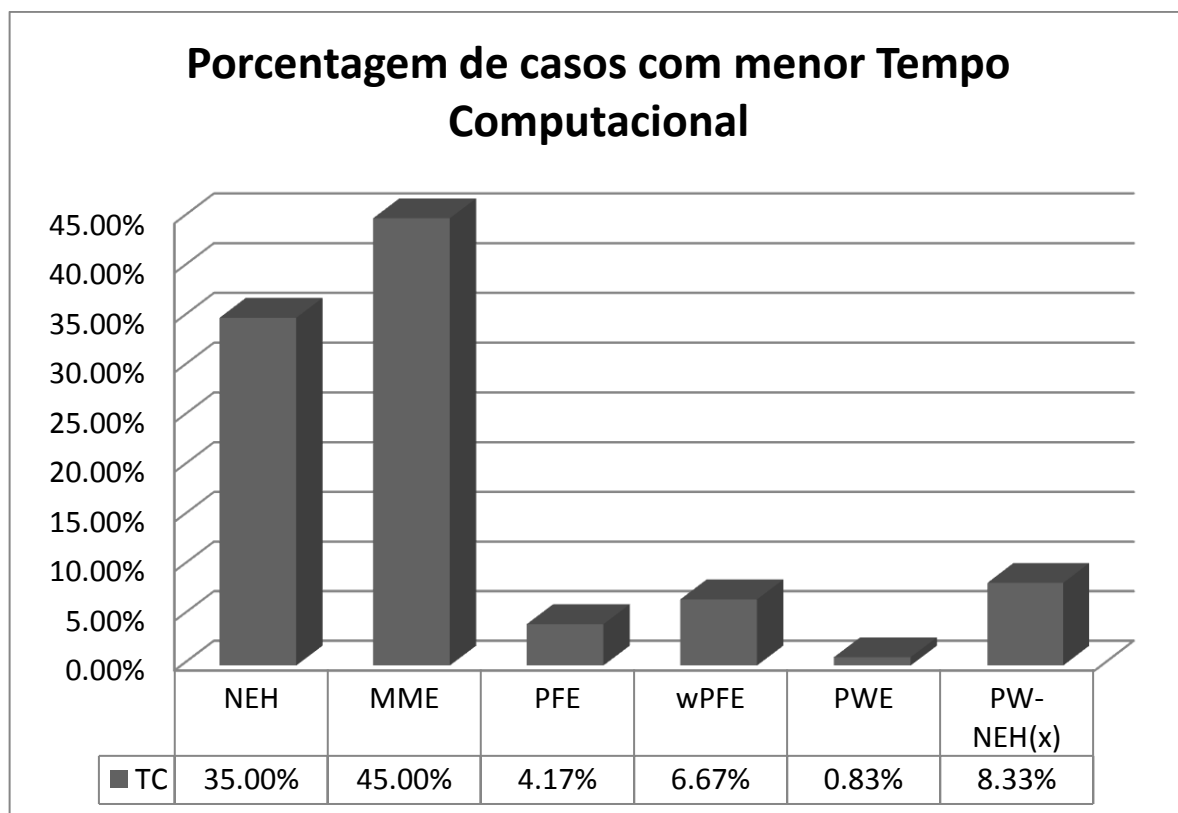


Gráfico 7 – Porcentagem de casos com o menor tempo computacional para os métodos adaptados para a minimização do tempo de fluxo (maior melhor)

5.2.2.2 Desvio relativo médio do tempo de fluxo e média computacional

A tabela 7 apresenta os valores do desvio relativo médio e média do tempo computacional para cada método em cada classe de problemas.

Tabela 7 – Desvio relativo médio do tempo de fluxo e média do tempo computacional (em segundos) para os métodos direcionados para a minimização do tempo de fluxo (menor melhor)

	MME		PFE		wPFE		PWE		NEH		PW-NEH(x)	
	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC
20x5	2,2%	0,028	4,4%	0,0315	3,6%	0,0283	3,1%	0,037	3,4%	0,0275	0,4%	0,1469
20x10	2,0%	0,0318	1,8%	0,0316	3,0%	0,0289	1,8%	0,0363	3,1%	0,0302	0,2%	0,1607
20x20	1,0%	0,0333	2,0%	0,0343	1,8%	0,0315	1,9%	0,0409	3,1%	0,0292	0,5%	0,1862
50x5	6,6%	2,0347	6,3%	2,1015	6,5%	2,1084	6,1%	2,2461	7,6%	2,0497	0,3%	4,646
50x10	5,9%	0,2923	4,6%	0,3105	4,7%	0,3099	4,8%	0,3522	5,0%	0,2966	0,0%	1,2044
50x20	3,7%	0,3154	3,4%	0,3341	3,3%	0,3382	3,1%	0,3965	5,9%	0,3237	0,0%	1,3906
100x5	6,6%	2,0347	6,3%	2,1015	6,5%	2,1084	6,1%	2,2461	7,6%	2,0497	0,3%	4,646
100x10	5,9%	2,1471	5,1%	2,2242	6,0%	2,2233	6,1%	2,4015	7,1%	2,1522	0,0%	5,0793
100x20	5,1%	2,3579	4,8%	2,4371	4,7%	2,4432	4,2%	2,7068	6,5%	2,3634	0,0%	5,9251
200x10	4,4%	16,642	4,8%	16,939	6,2%	16,949	5,5%	17,736	8,0%	16,68	0,0%	21,4
200x20	4,7%	18,362	4,7%	18,654	5,2%	18,703	4,9%	19,846	6,4%	18,354	0,0%	24,739
500x20	4,8%	285,05	5,1%	287,16	5,7%	286,61	6,1%	294,26	8,0%	284,07	0,0%	164,81

Os gráficos 8, 9 e 10 foram criados a partir da tabela 7 e comparam os valores de desvio relativo médio do tempo de Fluxo e média do tempo computacional de cada método adaptado para a otimização do tempo de fluxo para cada classe de problemas.

É possível identificar no gráfico 8 o mesmo comportamento entre as heurísticas geradas através da heurística NEH, com os maiores valores do desvio relativo médio para as classes de problemas com um numero de tarefas muito superior ao número de máquinas. Da mesma forma que nos métodos originais é possível observar a redução dos desvios relativos médios a medida em que o numero de máquinas se aproxima do número de tarefas. É possível observar que, para os métodos adaptados para o tempo de fluxo, o método MME não se destacou como nos métodos originais e os valores das heurísticas PFE, wPFE, PWE e MME foram bastante equilibrados entre si nas categorias. O método NEH foi o que obteve os piores valores de desvio relativo médio em 10 das 12 categorias de problemas, sendo o pior método entre os métodos avaliados.

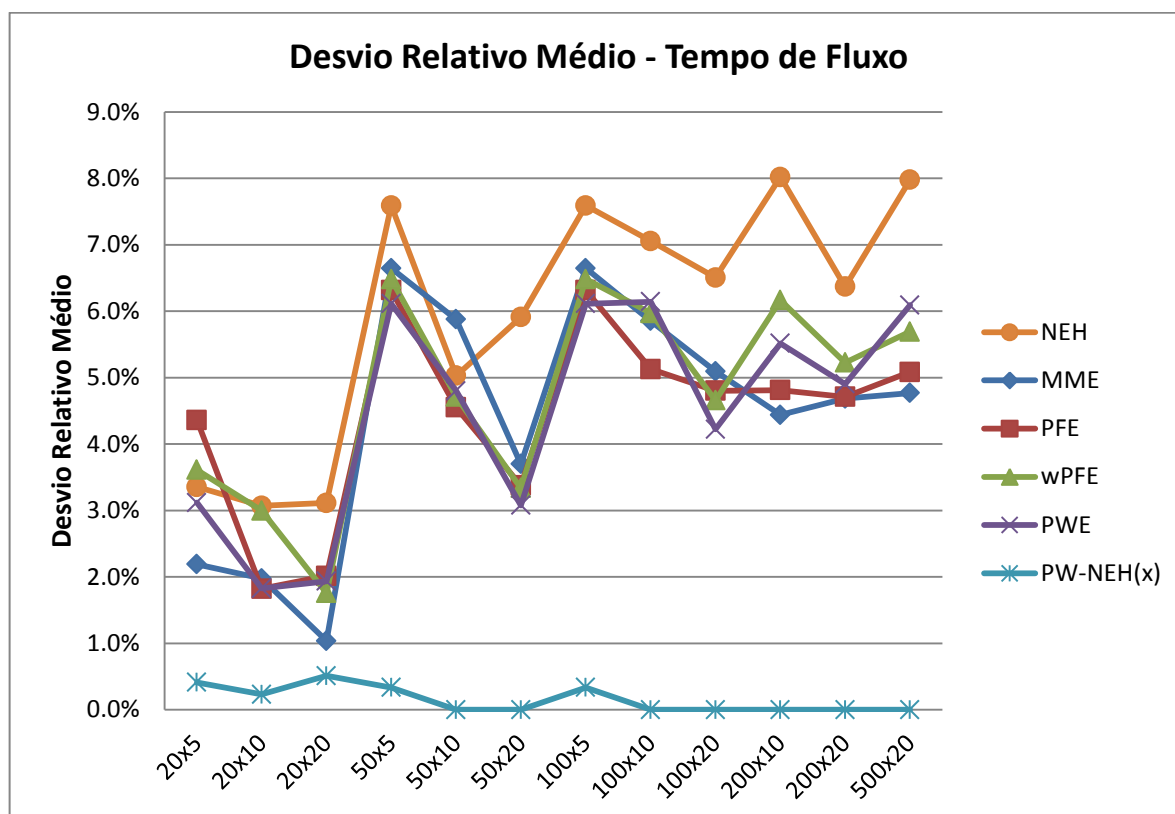


Gráfico 8 – Desvio relativo médio do tempo de fluxo para os métodos adaptados para a minimização do tempo de fluxo (menor melhor)

Para a avaliação do tempo computacional foram calculadas as médias aritméticas dos tempos de computação de cada classe de problema para cada heurística (ver tabela 7). A partir destes dados criou-se o gráfico 6 para os problemas com até 200 tarefas e 20 máquinas e o gráfico 7 para a classe de problemas com 500 tarefas e 20. Isto se fez necessário porque, assim como nos métodos direcionados para a minimização do *makespan*, houve um excessivo aumento da ordem de grandeza do tempo computacional para os problemas com 500 tarefas e 20 máquinas.

Através do gráfico 9 pode-se observar que a heurística PW-NEH(x) obteve mais uma vez os piores tempos em todas estas classes de problemas. Nota-se também um comportamento de quase idêntico entre todas as heurísticas com picos para os problemas onde o número de tarefas é muito maior que o número de máquinas. É possível notar também o mesmo aumento abrupto na passagem dos problemas de 100 para 200 tarefas que ocorreu nos métodos anteriores. Isso se deve ao fato de que o número de interações da heurística NEH (utilizada em todas as heurísticas) cresce exponencialmente a medida que as tarefas aumentam.

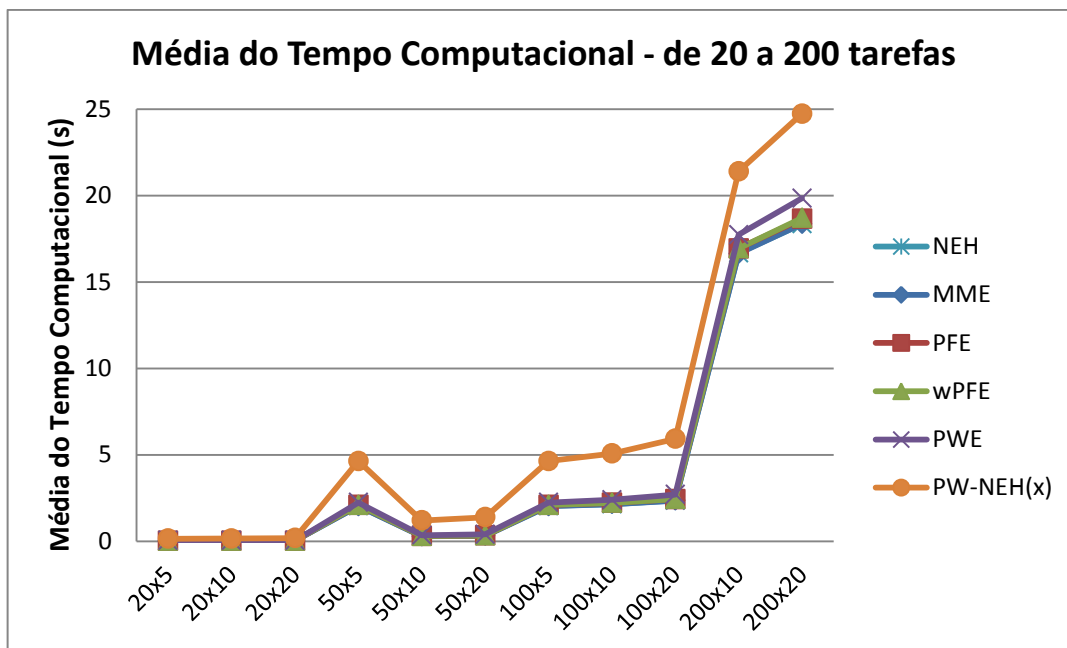


Gráfico 9 – Média do tempo computacional (em segundos) para problemas com 20, 50, 100 e 200 tarefas para os métodos adaptados para a minimização do tempo de fluxo (menor melhor)

Através do gráfico 10 pode-se concluir que a heurística PW-NEH(x) é a melhor para problemas com 500 tarefas, pois, além de obter os melhores resultados de tempo de fluxo também apresentou os menores tempos computacionais entre as heurísticas testadas. As demais heurísticas obtiveram praticamente o mesmo tempo, com um ligeiro aumento de tempo computacional para a heurística PWE.

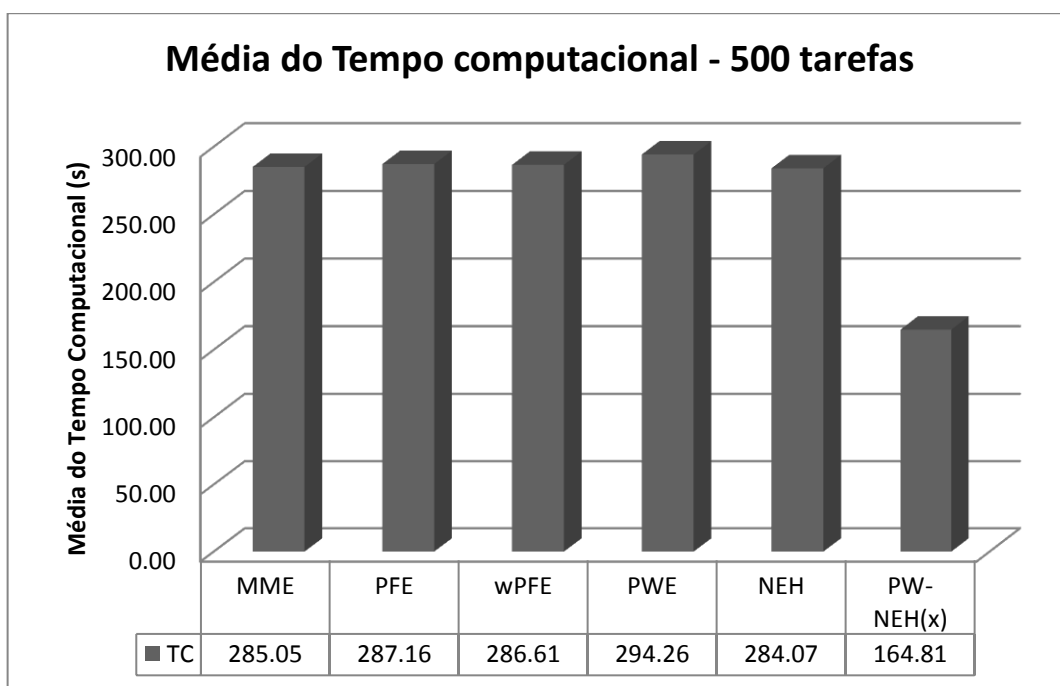


Gráfico 10 – Média do tempo computacional (em segundos) para problemas com 500 tarefas para os métodos adaptados para a minimização do tempo de fluxo (menor melhor)

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foram implementados seis métodos heurísticos de segunda fase que trabalham com a otimização das funções objetivos (*makespan* e tempo de fluxo) para um sistema *flow shop* permutacional com bloqueio e estoque intermediário igual a zero. Os métodos foram direcionados para a otimização do *makespan* e submetidos a 120 problemas, depois, os mesmos métodos foram adaptados para otimizar o tempo de fluxo e submetidos aos mesmos problemas. Os resultados foram avaliados de acordo com o desvio padrão médio da função objetivo analisada, a porcentagem de sucesso e a média do tempo computacional.

Para os métodos que otimizam o *makespan* o método PW-NEH(x) foi o que obteve os melhores resultados de *makespan* entre todos os métodos avaliados em 82,5% dos problemas. Este método também apresentou os menores valores de desvio relativo médio em 11 das 12 classes de problemas e foi o mais rápido nos 10 problemas da última classe (500x20). Sendo assim pode-se concluir que este é, entre os métodos avaliados, o melhor para a otimização do *makespan*. Os outros métodos apresentaram valores semelhantes de tempo computacional, desvio relativo médio e porcentagem de acerto.

Para os métodos adaptados para a otimização do tempo de fluxo o método PW-NEH(x) se destacou novamente, obtendo os melhores resultados de tempo de fluxo em 86,67% dos problemas. O método obteve os menores valores de desvio relativo médio em todas as classes de problema e apresentou os melhores tempos computacionais para todos os problemas da última classe (500x20), sendo escolhido como o melhor método também para a otimização do tempo de fluxo.

Uma vez analisados os resultados semelhantes obtidos no presente trabalho das heurísticas PFE, PWE, WPFE sugere-se como possíveis trabalhos futuros a comparação das heurísticas PFE-NEH(x) e wPFE-NEH(x) com a heurística PW-NEH(x) para a otimização do tempo de fluxo com diferentes valores para x e λ . Sugere-se também a substituição da heurística PW pela heurística MM na heurística PW-NEH(x) para a criação de uma nova heurística construtiva, uma vez que os resultados obtidos pela heurística MME para a otimização das funções objetivos superaram as heurísticas PFE, wPFE e PW em varias categorias. Outros estudos ainda podem ser feitos para avaliar o desempenho de heurísticas de terceira fase para a minimização do tempo de fluxo.

7 REFERÊNCIAS

CONWAY, Richard W.; MAXWELL, William L.; MILLER, Louis W.; ***Theory of Scheduling***. Addison Wesley Publishing Company, 1967.

EMMONS, Hamilton; VAIRAKTARAKIS, George. **Flow Shop Scheduling: Theoretical Result, Algorithms and Applications**. New York: Springer, 2012.

FRAMINAN, Jose M.; GUPTA, Jatinder N. D.; LEISTEN, R.; ***A review and classification of heuristics for permutation flow shop scheduling with makespan objective***. *Journal of the Operational Research Society, United Kingdom*. v. 55, n. 12, p. 1243-1255, 2004.

FUCHIGAMI, Helio Y. ***Flexible flow line com tempos de setup: métodos heurísticos***. 2010. 170 f. Tese (Doutorado em Engenharia da Produção) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo: São Carlos, 2010.

GIGANTE, Rodrigo L.. ***Heurística construtiva para a programação de operações flow shop permutacional***. 2010. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Produção) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

GRAHAM, R. L.; LAWLER, E. L.; LENSTRA, J. K.; RINNOOY, K. A. H. G. ***Optimization and approximation in deterministic sequencing and scheduling: A survey***. *Annals of Discrete Mathematics*, v.2, n.5, p. 287-326. 1979.

LIU, J. Y.; REEVES, C. R.; ***Constructive and composite heuristic solutions to the P//SCi scheduling problem***. *European Journal of Operational Research*. v.132, n. 2, p. 439–52, 2001.

MACCARTHY, B. L.; LIU, J. Y. **Adressing the gap in scheduling research: a review of optimization and heuristic methods in production scheduling.** *International Journal of Production Research*, London, v. 31, p. 371-380, 1993.

NAGANO, Marcelo S.; BRANCO, Fábio J. C.; MOCCELIN, João V. **Soluções de alto desempenho para a programação da produção flow shop.** *Gestão da Produção, Operações e Sistemas*. v. 2, p. 11-23, 2009.

NAWAZ, M; ENSCORE, E. E. J.; HAM, I. **A heuristic algorithm for the m-machine, n-job flow shop sequencing problem.** *OMEGA-International Journal of Management Science*. v. 11, p. 95-5, 1983.

PAN, Quan-Ke; WANG, Ling. **Effective heuristics for the bloking flowshop scheduling with makespan minimization.** *The international Journal of management Science*. v. 40, p. 218-229, 2011.

PINEDO, Michael L. **Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems.** New York: Springer Science+Business Media, LLC, 2008.

RONCONI, Débora P. **A note on constructive heuristics for the flowshop problem whith blocking.** *International journal of production enconomics*. v. 87, p. 39-48, 2004.

SANTOS, Fabio de S. **Sequenciamento da Produção em linhas flow shop permutacional com bloqueio e com buffer zero.** 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso Superior de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2013.

TAILLARD. E. **Benchmarks for basic scheduling problems.** *European Journal of Operational Research, Amsterdam*, v. 64, p. 278-285, 1993.

TUBINO, D. F. **Planejamento e Controle da Produção: Teoria e Prática**. São Paulo: Atlas, 2007.

APÊNDICE A - Algoritmo *makespan* e tempo de fluxo

```

function [Cm,Mf] = Cm(P)

[n,m]=size(P);
D=zeros(n,m);
D(1,1)=P(1,1); %primeiro passo'

for j=2:m %segundo passo'
    D(1,j)=D(1,j-1)+P(1,j);
end

for i=2:n
    D(i,1)=max(D(i-1,1)+P(i,1),D(i-1,2)); %'teceiro passo'
    for j=2:m-1
        D(i,j)=max(D(i,j-1)+P(i,j),D(i-1,j+1)); %'quarto passo'
    end
    D(i,m)=D(i,m-1)+P(i,m); %'Quinto passo'
end

Cm=D(n,m);
Mf=sum(D(:,m));

```

APÊNDICE B - Algoritmo MME

```

function [P,TC] = MME(Pjk)
tic;
[n,m]=size(Pjk);
alpha=0.75;
BetaAT=zeros(n,m);
BetaANT=zeros(n,m);
Beta=zeros(n,m);
MatrizBASE1=Pjk;
[n,m]= size(Pjk);
Sequencia= zeros(1,n);
F = Pjk;
Soma= sum(Pjk,2);
G = zeros(1,m);
A = (F(:,1));
B = sort(A);
Sequencia(1) = find(A==B(1),1,'first');
F(Sequencia(1),:) = nan;
C = (F(:,m));
Z = sort(C);
Sequencia(n) = find(C==Z(1),1,'first');
F(Sequencia(n),:) = nan;
for c=2:n-1
    G(1,1) = Pjk(Sequencia(c-1),1);
    for j=2:m
        G(1,j)= Pjk(Sequencia(c-1),j);
    end
    for i=1:n
        O = 0;
        for j=2:m
            N = 0.75*abs(F(i,j-1) - G(1,j));
            O = O + N;
        end
        R(i,1) = O + 0.25*Soma(i);
    end
    M = sort(R);
    Sequencia(c) = find(R==M(1),1,'first');
    F(Sequencia(c),:) = nan;
end
MatrizBASE = Pjk(Sequencia,:);
BetaAT(1:2,:)=MatrizBASE(1:2,:);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Cálculo do Makespan 1 até 2 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
[~,DANT] = Cm(BetaAT);
BetaANT=BetaAT;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Segunda possibilidade %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
BetaAT(2:-1:1,:)=MatrizBASE(1:2,:);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Cálculo do Makespan 1 até 2 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
[~,DAT] = Cm(BetaAT);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Teste para guardar o menor valor de Makespan %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if DAT<DANT
    BetaANT=BetaAT;
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Criação das possíveis matrizes para t de 3 até n %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
for t=3:n %DAT e DANT servem p/ comparar apenas matrizes com o msm valor
de t

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% MatrizBASE na linha 1 %%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
BetaAT(1,:)=MatrizBASE(t,:);
BetaAT(2:t,:)=BetaANT(1:t-1,:);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Cálculo do Makespan 1 até t %%%%%%%%%
[~,DANT] = Cm(BetaAT);
Beta=BetaAT;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% MatrizBASE nas linhas 2 até t-1 %%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
for c=2:t-1
    BetaAT(c,:)=MatrizBASE(t,:);
    BetaAT(1:c-1,:)=BetaANT(1:c-1,:);
    BetaAT(c+1:t,:)=BetaANT(c:t-1,:);
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Cálculo do Makespan 1 até t %%%%%%%%%
    [~,DAT] = Cm(BetaAT);
    %%%%%%%%% Teste para guardar o menor valor de Makespan %%%%%%%%%
    if DAT<DANT;
        DANT=DAT;
        Beta=BetaAT;
    end
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% MatrizBASE na linha t %%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
BetaAT(1:t-1,:)=BetaANT(1:t-1,:);
BetaAT(t,:)=MatrizBASE(t,:);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Cálculo do Makespan 1 até t %%%%%%%%%
[~,DAT] = Cm(BetaAT);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Teste para guardar o menor valor de Makespan %%%%%%%%%
if DAT<DANT
    DANT=DAT;
    Beta=BetaAT;
end
BetaANT=Beta;

end
P=BetaANT;
TC=toc;

```



```

for t=3:n %DAT e DANT servem p/ comparar apenas matrizes com o msm valor
de t
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% MatrizBASE na linha 1 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% MatrizBASE na linha 1 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    BetaAT(1,:)=MatrizBASE(t,:);
    BetaAT(2:t,:)=BetaANT(1:t-1,:);
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Cálculo do Makespan 1 até t %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    [~,DANT] = Cm(BetaAT);
    Beta=BetaAT;
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% MatrizBASE nas linhas 2 até t-1 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% MatrizBASE nas linhas 2 até t-1 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    for c=2:t-1
        BetaAT(c,:)=MatrizBASE(t,:);
        BetaAT(1:c-1,:)=BetaANT(1:c-1,:);
        BetaAT(c+1:t,:)=BetaANT(c:t-1,:);
        %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Cálculo do Makespan 1 até t %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
        [~,DAT] = Cm(BetaAT);
        %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Teste para guardar o menor valor de Makespan %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
        if DAT<DANT;
            DANT=DAT;
            Beta=BetaAT;
        end
    end
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% MatrizBASE na linha t %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% MatrizBASE na linha t %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
BetaAT(1:t-1,:)=BetaANT(1:t-1,:);
BetaAT(t,:)=MatrizBASE(t,:);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Cálculo do Makespan 1 até t %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
[~,DAT] = Cm(BetaAT);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Teste para guardar o menor valor de Makespan %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if DAT<DANT
    DANT=DAT;
    Beta=BetaAT;
end
BetaANT=Beta;
end
P=BetaANT;
TC=toc;

```

APÊNDICE D - Algoritmo wPFE

```

function [P,TC] = WPFE(Pjk)
tic
[n,m]= size(Pjk);
Sequencia= zeros(1,n);
A = sum(Pjk(:, :), 2);
B = sort(A);
D = zeros(n,m);
F = Pjk;
G = zeros(1,m);
R = zeros(n,1);
W = 0;
BetaAT=zeros(n,m);
BetaANT=zeros(n,m);
Beta=zeros(n,m);
Sequencia(1) = find(A==B(1),1,'first');
F(Sequencia(1), :) = nan;
for c=2:n
    G(1,1) = max(G(1,1) + Pjk(Sequencia(c-1),1),G(1,2));
    for j=2:m-1
        G(1,j) = max(G(1,j-1)+ Pjk(Sequencia(c-1),j),G(1,j+1));
    end
    G(1,m)=G(1,m-1)+ Pjk(Sequencia(c-1),m);
    for i=1:n
        D(i,1)=max(G(1,1) +F(i,1),G(1,2));
        for j=2:m-1
            D(i,j) = max(D(i,j-1)+ F(i,j),G(1,j+1));
        end
        for j=m
            D(i,j) = D(i,j-1) + F(i,j);
        end
    end
    for i=1:n
        O = 0;
        for j=1:m
            W = m/(j + (c-1)*(m-j)/(n-1));
            O = W*abs(D(i,j) - G(1,j) - F(i,j)) + O;
        end
        R(i) = O;
    end
    M = sort(R);
    Sequencia(c) = find(R==M(1),1,'first');
    F(Sequencia(c), :) = nan;
    D = zeros(n,m);
end
MatrizBASE = Pjk(Sequencia,:);
BetaAT(1:2,:)=MatrizBASE(1:2,:);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Cálculo do Makespan 1 até 2 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
[~,DANT] = Cm(BetaAT);
BetaANT=BetaAT;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Segunda possibilidade %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
BetaAT(2:-1:1,:)=MatrizBASE(1:2,:);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Cálculo do Makespan 1 até 2 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
[~,DAT] = Cm(BetaAT);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Teste para guardar o menor valor de Makespan %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if DAT<DANT
    BetaANT=BetaAT;
end

```



```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Criação das possíveis matrizes para t de 3 até n %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
for t=3:n %DAT e DANT servem p/ comparar apenas matrizes com o msm valor
de t
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% MatrizBASE na linha 1 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    BetaAT(1,:)=MatrizBASE(t,:);
    BetaAT(2:t,:)=BetaANT(1:t-1,:);
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Cálculo do Makespan 1 até t %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    [~,DANT] = Cm(BetaAT);
    Beta=BetaAT;
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% MatrizBASE nas linhas 2 até t-1 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    for c=2:t-1
        BetaAT(c,:)=MatrizBASE(t,:);
        BetaAT(1:c-1,:)=BetaANT(1:c-1,:);
        BetaAT(c+1:t,:)=BetaANT(c:t-1,:);
        %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Cálculo do Makespan 1 até t %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
        [~,DAT] = Cm(BetaAT);
        %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Teste para guardar o menor valor de Makespan %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
        if DAT<DANT;
            DANT=DAT;
            Beta=BetaAT;
        end
    end
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% MatrizBASE na linha t %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    BetaAT(1:t-1,:)=BetaANT(1:t-1,:);
    BetaAT(t,:)=MatrizBASE(t,:);
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Cálculo do Makespan 1 até t %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    [~,DAT] = Cm(BetaAT);
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Teste para guardar o menor valor de Makespan %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    if DAT<DANT
        DANT=DAT;
        Beta=BetaAT;
    end
    BetaANT=Beta;
end
P=BetaANT;
TC=toc;

```

APÊNDICE E - Algoritmo PWE

```

function [P,TC] = PWE(Pjk)
tic;
[n,m]= size(Pjk);
Sequencia= zeros(1,n);
C = zeros(n,m);
D = zeros(n,m);
E = zeros(n,m);
F = Pjk;
H = Pjk;
G = zeros(1,m);
R = zeros(n,1);
S = zeros(n,1);
T = zeros(n,1);
W = 0;
BetaAT=zeros(n,m);
BetaANT=zeros(n,m);
Beta=zeros(n,m);
for i=1:n
    D(i,1) = Pjk(i,1);
    for j=2:m
        D(i,j)= D(i,j-1)+ Pjk(i,j);
    end
end
for i=1:n
    for j=1:m
        E(i,j)= (sum(Pjk(:,j)) - Pjk(i,j))/(n-1);
    end
end
for i=1:n
    for j=2:m-1
        C(i,j)= max(C(i,j-1)+ E(i,j),D(i,j+1));
    end
    for j=m
        C(i,j) = C(i,j-1) + E(i,j);
    end
end
for i=1:n
    O = 0;
    Y = 0;
    for j=1:m
        W = m/j;
        Y = W*abs(D(i,j) - F(i,j)) + Y;
        O = W*abs(C(i,j) - D(i,j) - E(i,j)) + O;
    end
    T(i) = Y;
    S(i) = O;
    R(i)= [(n-1)*T(i)] + S(i);
end
M = sort(R);
Sequencia(1) = find(R==M(1),1,'first');
F(Sequencia(1),:) = nan;
for c=2:n-1
    G(1,1) = max(G(1,1) + Pjk(Sequencia(c-1),1),G(1,2));
    for j=2:m-1
        G(1,j)= max(G(1,j-1)+ Pjk(Sequencia(c-1),j),G(1,j+1));
    end
    G(1,m)=G(1,m-1)+ Pjk(Sequencia(c-1),m);
end

```



```

if DAT<DANT
    BetaANT=BetaAT;
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Criação das possíveis matrizes para t de 3 até n %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
for t=3:n %DAT e DANT servem p/ comparar apenas matrizes com o msm valor
de t
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% MatrizBASE na linha 1 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    BetaAT(1,:)=MatrizBASE(t,:);
    BetaAT(2:t,:)=BetaANT(1:t-1,:);
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Cálculo do Makespan 1 até t %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    [~,DANT] = Cm(BetaAT);
    Beta=BetaAT;
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% MatrizBASE nas linhas 2 até t-1 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    for c=2:t-1
        BetaAT(c,:)=MatrizBASE(t,:);
        BetaAT(1:c-1,:)=BetaANT(1:c-1,:);
        BetaAT(c+1:t,:)=BetaANT(c:t-1,:);
        %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Cálculo do Makespan 1 até t %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
        [~,DAT] = Cm(BetaAT);
        %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Teste para guardar o menor valor de Makespan %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
        if DAT<DANT;
            DANT=DAT;
            Beta=BetaAT;
        end
    end
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% MatrizBASE na linha t %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    BetaAT(1:t-1,:)=BetaANT(1:t-1,:);
    BetaAT(t,:)=MatrizBASE(t,:);
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Cálculo do Makespan 1 até t %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    [~,DAT] = Cm(BetaAT);
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Teste para guardar o menor valor de Makespan %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    if DAT<DANT
        DANT=DAT;
        Beta=BetaAT;
    end
end
BetaANT=Beta;
end
P=BetaANT;
TC=toc;

```

APÊNDICE F - Algoritmo PW-NEH(x)

```

function [P,TC] = PWNEHX(Pjk)
tic
[n,m]= size(Pjk);
A = sum(Pjk(:, :), 2);
B = sort(A);
D = zeros(n,m);
F = Pjk;
G = zeros(1,m);
R = zeros(n,1);
BetaAT=zeros(n,m);
BetaANT=zeros(n,m);
Beta=zeros(n,m);
Sequencia= zeros(1,n);
x=20;
l=5;
MfANT=5000000000000000000;
C = zeros(n,m);
E = zeros(n,m);
F = Pjk;
H = Pjk;
S = zeros(n,1);
T = zeros(n,1);
W = 0;
for i=1:n
    ALPHA(i)=find(A==B(i),1,'first');
    A(ALPHA(i))=0;
end
for u=1:l
    Sequencia(1)=ALPHA(u);
    F(ALPHA(u), :)=nan;
for c=2:n-1
    G(1,1) = max(G(1,1) + Pjk(Sequencia(c-1),1),G(1,2));
    for j=2:m-1
        G(1,j)= max(G(1,j-1)+ Pjk(Sequencia(c-1),j),G(1,j+1));
    end
    G(1,m)=G(1,m-1)+ Pjk(Sequencia(c-1),m);
    for i=1:n

        D(i,1)=max(G(1,1) +F(i,1),G(1,2));
        for j=2:m-1
            D(i,j)= max(D(i,j-1)+ F(i,j),G(1,j+1));
        end
        for j=m
            D(i,j) = D(i,j-1) + F(i,j);
        end
    end
end
for i=1:n
    H(Sequencia(c-1), :) = 0;
    for j=1:m
        if H(i,j)~=0
            E(i,j)= (sum(H(:,j)) - H(i,j))/(n-c);
        end
    end
end
end
for i=1:n
    if E(i,1)~=0
        C(i,1)=max(D(i,1) + E(i,1),D(i,2));
        for j=2:m-1

```



```

[~, DAT] = Cm(BetaAT);
%%%%%%%%%%%%%% Teste para guardar o menor valor de Makespan %%%%%%%%%%%%%%%
if DAT<DANT
    DANT=DAT;
    Beta=BetaAT;
end
BetaANT=Beta;
end
MfAT=DANT;
if MfAT<MfANT;
    MatrizPWNEH=BetaANT;
    MfANT=MfAT;
end
C = zeros (n,m);
D = zeros (n,m);
E = zeros (n,m);
F = Pjk;
G = zeros (1,m);
H = Pjk;
R = zeros (n,1);
S = zeros (n,1);
T = zeros (n,1);
W = 0;
BetaAT=zeros (n,m);
BetaANT=zeros (n,m);
Beta=zeros (n,m);
Psoma=zeros (n,1);
MatrizBASE=zeros (n,m);
DANT=0;
DAT=0;
Sequencia= zeros (1,n);
end
P=MatrizPWNEH;
TC=toc;

```

APÊNDICE G - Tabelas de resultados dos métodos direcionados para a minimização do *makespan* (menores valores em destaque)

CLASSE 20X5 (menor melhor)												
	MME		PFE		wPFE		PWE		NEH		PW-NEH(x)	
	Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC
P1	1450	0,03	1457	0,05	1462	0,03	1449	0,04	1435	0,02	1399	0,15
P2	1476	0,03	1454	0,02	1485	0,02	1469	0,04	1477	0,03	1463	0,14
P3	1358	0,04	1386	0,04	1321	0,03	1385	0,04	1353	0,02	1321	0,14
P4	1522	0,03	1479	0,04	1518	0,02	1505	0,04	1552	0,03	1466	0,14
P5	1413	0,02	1394	0,03	1408	0,03	1393	0,04	1398	0,02	1385	0,14
P6	1421	0,03	1438	0,02	1439	0,02	1436	0,03	1464	0,04	1403	0,14
P7	1423	0,03	1451	0,03	1451	0,03	1471	0,03	1458	0,03	1441	0,14
P8	1487	0,03	1499	0,04	1499	0,02	1480	0,04	1449	0,04	1442	0,14
P9	1467	0,03	1472	0,03	1450	0,03	1450	0,04	1457	0,03	1441	0,14
P10	1382	0,03	1369	0,03	1367	0,02	1351	0,04	1349	0,02	1325	0,14
CLASSE 20X10 (menor melhor)												
	MME		PFE		wPFE		PWE		NEH		PW-NEH(x)	
	Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC
P1	1823	0,03	1851	0,04	1757	0,04	1801	0,04	1767	0,02	1757	0,15
P2	1915	0,03	1939	0,04	1881	0,03	1932	0,04	1903	0,03	1872	0,16
P3	1759	0,03	1729	0,03	1725	0,03	1740	0,04	1772	0,04	1723	0,15
P4	1668	0,04	1639	0,04	1629	0,03	1608	0,03	1622	0,03	1595	0,15
P5	1678	0,03	1726	0,03	1719	0,03	1717	0,03	1722	0,04	1691	0,15
P6	1671	0,03	1673	0,04	1702	0,03	1695	0,03	1679	0,04	1664	0,15
P7	1674	0,03	1731	0,03	1749	0,04	1659	0,05	1738	0,03	1651	0,16
P8	1852	0,03	1809	0,04	1866	0,03	1825	0,04	1814	0,02	1793	0,16
P9	1802	0,03	1877	0,02	1877	0,04	1848	0,05	1832	0,03	1823	0,15
P10	1892	0,02	1889	0,04	1897	0,03	1870	0,05	1854	0,02	1870	0,16
CLASSE 20X20 (menor melhor)												
	MME		PFE		wPFE		PWE		NEH		PW-NEH(x)	
	Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC
P1	2519	0,03	2569	0,04	2539	0,03	2503	0,04	2530	0,02	2503	0,2
P2	2292	0,04	2291	0,03	2311	0,03	2390	0,04	2285	0,03	2316	0,18
P3	2608	0,03	2703	0,04	2656	0,03	2588	0,05	2564	0,02	2566	0,17
P4	2393	0,03	2477	0,04	2429	0,04	2446	0,04	2399	0,03	2425	0,17
P5	2533	0,03	2548	0,04	2552	0,03	2528	0,05	2538	0,03	2528	0,17
P6	2449	0,04	2511	0,03	2498	0,03	2509	0,05	2472	0,04	2482	0,17
P7	2470	0,04	2507	0,03	2496	0,04	2489	0,04	2498	0,03	2489	0,18
P8	2396	0,03	2452	0,03	2497	0,03	2444	0,05	2411	0,03	2439	0,18
P9	2459	0,04	2524	0,03	2517	0,03	2427	0,04	2421	0,03	2456	0,17
P10	2399	0,03	2461	0,03	2429	0,04	2470	0,05	2425	0,02	2367	0,17

CLASSE 50X5 (menor melhor)												
MME		PFE		wPFE		PWE		NEH		PW-NEH(x)		
Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC	
P1	3184	0,28	3232	0,3	3211	0,29	3251	0,33	3321	0,29	3160	1,05
P2	3364	0,28	3412	0,29	3424	0,29	3511	0,33	3550	0,28	3348	1,06
P3	3237	0,28	3310	0,3	3214	0,29	3241	0,32	3223	0,27	3173	1,05
P4	3319	0,28	3363	0,3	3344	0,31	3378	0,33	3343	0,28	3275	1,07
P5	3320	0,28	3375	0,3	3394	0,3	3430	0,32	3431	0,28	3301	1,05
P6	3397	0,3	3358	0,3	3365	0,3	3358	0,32	3413	0,28	3306	1,06
P7	3201	0,28	3098	0,3	3207	0,31	3249	0,33	3256	0,27	3192	1,07
P8	3248	0,28	3349	0,3	3330	0,32	3231	0,34	3326	0,28	3218	1,05
P9	3089	0,28	3115	0,29	3081	0,3	3082	0,34	3118	0,27	3024	1,05
P10	3308	0,27	3319	0,3	3329	0,3	3337	0,32	3460	0,28	3258	1,07
CLASSE 50X10 (menor melhor)												
MME		PFE		wPFE		PWE		NEH		PW-NEH(x)		
Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC	
P1	3888	0,34	3815	0,31	3927	0,3	3851	0,35	3947	0,29	3874	1,15
P2	3697	0,28	3782	0,31	3737	0,32	3774	0,36	3795	0,31	3633	1,15
P3	3764	0,28	3705	0,32	3726	0,32	3711	0,35	3789	0,29	3656	1,15
P4	3869	0,29	3923	0,33	3933	0,31	3937	0,34	3938	0,31	3814	1,15
P5	3853	0,29	3858	0,32	3861	0,32	3891	0,35	3897	0,3	3779	1,16
P6	3857	0,29	3856	0,32	3825	0,31	3914	0,35	3828	0,3	3730	1,14
P7	3975	0,31	4011	0,31	4014	0,32	3987	0,34	3942	0,29	3896	1,15
P8	3833	0,29	3804	0,31	3839	0,31	3836	0,34	3794	0,3	3726	1,14
P9	3795	0,29	3799	0,3	3806	0,33	3817	0,35	3887	0,28	3770	1,15
P10	3845	0,29	3827	0,3	3830	0,31	3864	0,36	3943	0,31	3801	1,15
CLASSE 50X20 (menor melhor)												
MME		PFE		wPFE		PWE		NEH		PW-NEH(x)		
Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC	
P1	4808	0,33	4792	0,34	4792	0,35	4733	0,4	4881	0,31	4718	1,34
P2	4454	0,32	4622	0,34	4577	0,33	4554	0,4	4597	0,33	4497	1,33
P3	4493	0,33	4645	0,34	4529	0,34	4529	0,4	4645	0,31	4476	1,33
P4	4556	0,33	4611	0,35	4617	0,33	4565	0,39	4711	0,35	4520	1,33
P5	4491	0,32	4531	0,34	4514	0,34	4561	0,41	4456	0,33	4516	1,34
P6	4556	0,31	4654	0,34	4572	0,34	4581	0,4	4566	0,32	4545	1,33
P7	4544	0,33	4619	0,33	4561	0,34	4584	0,41	4575	0,32	4555	1,33
P8	4640	0,31	4570	0,34	4569	0,34	4596	0,39	4751	0,31	4555	1,35
P9	4519	0,33	4517	0,34	4537	0,33	4653	0,39	4575	0,33	4604	1,33
P10	4648	0,32	4770	0,34	4689	0,38	4620	0,41	4802	0,32	4686	1,33

CLASSE 100X5 (menor melhor)												
MME		PFE		wPFE		PWE		NEH		PW-NEH(x)		
Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC	
P1	6595	2,03	6725	2,12	6613	2,1	6656	2,24	6813	2,04	6252	4,44
P2	6374	2,05	6418	2,1	6403	2,09	6447	2,25	6494	2,03	6167	4,46
P3	6258	2,04	6293	2,11	6309	2,1	6316	2,24	6370	2,02	6116	4,43
P4	6136	2,03	6124	2,1	6043	2,1	6124	2,24	6228	2,03	5901	4,43
P5	6411	2,03	6340	2,12	6346	2,12	6316	2,25	6419	2,03	6072	4,43
P6	6229	2,05	6249	2,1	6142	2,11	6198	2,23	6376	2,02	5981	4,43
P7	6427	2,03	6427	2,1	6387	2,1	6386	2,28	6480	2,02	6184	4,46
P8	6358	2,03	6323	2,11	6378	2,1	6358	2,23	6401	2,06	6085	4,43
P9	6574	2,02	6605	2,1	6518	2,11	6518	2,23	6672	2,03	6308	4,44
P10	6560	2,04	6510	2,14	6602	2,12	6683	2,23	6632	2,02	6291	4,42
CLASSE 100X10 (menor melhor)												
MME		PFE		wPFE		PWE		NEH		PW-NEH(x)		
Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC	
P1	7453	2,14	7386	2,21	7410	2,21	7501	2,39	7607	2,19	7244	4,84
P2	7262	2,16	7216	2,23	7213	2,22	7163	2,41	7311	2,15	7028	4,85
P3	7193	2,15	7307	2,22	7298	2,21	7475	2,39	7413	2,14	7156	4,85
P4	7587	2,15	7630	2,22	7638	2,22	7632	2,4	7719	2,14	7361	4,85
P5	7237	2,15	7263	2,23	7296	2,23	7304	2,39	7361	2,15	7002	4,85
P6	7098	2,14	7114	2,23	7187	2,24	7156	2,43	7343	2,15	6892	4,86
P7	7176	2,16	7223	2,24	7313	2,22	7303	2,39	7341	2,16	6987	4,85
P8	7271	2,15	7293	2,22	7286	2,22	7246	2,39	7356	2,15	7013	4,85
P9	7511	2,14	7483	2,21	7442	2,22	7484	2,39	7655	2,15	7171	4,86
P10	7387	2,15	7378	2,23	7485	2,21	7420	2,41	7573	2,14	7232	4,85
CLASSE 100X20 (menor melhor)												
MME		PFE		wPFE		PWE		NEH		PW-NEH(x)		
Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC	
P1	8226	2,37	8249	2,45	8202	2,46	8148	2,71	8425	2,37	8094	5,68
P2	8200	2,37	8324	2,46	8266	2,43	8233	2,72	8305	2,37	8227	5,68
P3	8128	2,37	8224	2,46	8355	2,45	8226	2,7	8242	2,35	8159	5,65
P4	8198	2,36	8342	2,44	8287	2,44	8356	2,73	8293	2,36	8108	5,67
P5	8250	2,36	8275	2,46	8193	2,45	8198	2,7	8294	2,36	8089	5,68
P6	8315	2,37	8219	2,5	8252	2,45	8189	2,71	8350	2,35	8157	5,67
P7	8320	2,37	8414	2,46	8418	2,46	8363	2,7	8358	2,35	8124	5,67
P8	8384	2,38	8481	2,46	8461	2,45	8434	2,71	8568	2,35	8265	5,65
P9	8332	2,37	8319	2,46	8246	2,44	8272	2,73	8318	2,36	8122	5,67
P10	8341	2,36	8358	2,46	8443	2,44	8418	2,71	8424	2,37	8309	5,66

CLASSE 200X10 (menor melhor)												
MME		PFE		wPFE		PWE		NEH		PW-NEH(x)		
Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC	
P1	14249	16,734	14265	16,98	14336	16,951	14206	17,765	14446	16,664	13600	20,049
P2	14147	16,659	14017	17	14254	16,969	14221	17,734	14391	16,688	13604	19,998
P3	14125	16,645	14250	16,974	14404	16,917	14334	17,689	14418	16,691	13562	20,083
P4	14198	16,654	14158	16,967	14305	16,932	14311	17,697	14427	16,706	13594	20,056
P5	14164	16,709	14155	16,987	14382	16,964	14246	17,729	14459	16,691	13546	20,032
P6	13985	16,673	14064	16,984	14235	16,985	14211	17,683	14187	16,703	13234	20,037
P7	14340	16,679	14531	16,976	14601	16,956	14566	17,752	14684	16,748	13894	20,057
P8	14423	16,666	14304	16,998	14532	16,95	14669	17,667	14519	16,736	13764	20,057
P9	14091	16,667	14145	16,992	14264	16,929	14211	17,687	14271	16,71	13503	20,025
P10	14288	16,647	14394	17,065	14452	16,955	14303	17,798	14557	16,658	13539	20,082
CLASSE 200X20 (menor melhor)												
MME		PFE		wPFE		PWE		NEH		PW-NEH(x)		
Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC	
P1	15426	18,426	15495	18,746	15586	18,619	15570	19,936	15696	18,374	15102	23,708
P2	15674	18,45	15732	18,723	15705	18,711	15653	19,903	15889	18,341	15177	23,695
P3	15814	18,444	15794	18,725	15733	18,676	15722	19,929	15993	18,374	15276	23,677
P4	15763	18,461	15716	18,719	15736	18,668	15734	19,944	16079	18,374	15372	23,682
P5	15607	18,399	15657	18,716	15618	18,671	15649	19,886	15795	18,434	15126	23,686
P6	15711	18,411	15757	18,729	15858	18,659	15791	19,894	15962	18,382	15256	23,731
P7	15703	18,394	15751	18,724	15711	18,632	15672	19,879	16070	18,321	15318	23,656
P8	15719	18,429	15737	18,678	15744	18,65	15751	19,907	15920	18,346	15269	23,674
P9	15700	18,453	15709	18,723	15673	18,635	15674	19,885	15934	18,322	15187	23,686
P10	15712	18,409	15719	18,704	15786	18,661	15786	19,91	15872	18,358	15222	23,668
CLASSE 500X20 (menor melhor)												
MME		PFE		wPFE		PWE		NEH		PW-NEH(x)		
Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC	Cnm	TC	
P1	37741	284,9	37691	286,36	37919	285,8	38010	295,58	38331	283,57	36075	158,31
P2	37993	284,63	38057	287,07	38298	285,6	38155	294,85	38538	283,73	36581	158,51
P3	37575	284,84	37633	288,07	38034	286,55	38018	295,2	37969	283,83	36024	158,42
P4	37917	284,51	38116	285,93	37981	285,56	38034	295,35	38648	283,66	36424	158,52
P5	37797	285,22	37934	286,74	38128	286,39	38033	295,07	38167	283,74	36300	158,43
P6	37998	284,07	38070	286,8	38363	286,08	38361	294,65	38640	284,18	36630	158,66
P7	37748	285,59	37622	286,8	37954	285,95	37759	294,43	38089	283,97	36272	158,22
P8	37823	285,82	37768	286,96	38010	286,36	38104	294,71	38338	284,13	36329	158,34
P9	37689	285,57	37671	286,68	37916	286,09	37920	294,36	37987	283,36	36204	158,31
P10	38095	285,06	37880	286,68	38021	286,37	38167	294,78	38525	283,69	36402	158,51

**APÊNDICE H - Tabelas de resultados dos métodos adaptados para o tempo de fluxo
(menores valores em destaque)**

CLASSE 500x20 (menor melhor)												
	MME		PFE		wPFE		PWE		NEH		PW-NEH(x)	
	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC
P1	9423754	284,8996	9540771	286,556	9521253	287,1353	9526883	294,4673	9546332	284,0771	9043877	164,5061
P2	9616682	284,849	9657895	287,2201	9666978	286,2258	9696615	294,7996	9848757	284,1978	9178944	164,8617
P3	9524692	285,2927	9484585	287,6265	9602667	286,6012	9642655	293,6199	9968338	284,0842	9083793	165,0604
P4	9524633	284,8254	9675428	287,1373	9671145	286,1599	9702845	293,6353	9850192	283,7791	9099013	165,1322
P5	9531218	284,7463	9545027	286,4847	9653729	285,8624	9691753	294,3874	10024319	283,911	9130661	165,1525
P6	9629595	285,0952	9701333	286,6964	9620637	286,2187	9800822	293,4762	10000934	283,9764	9199908	164,9444
P7	9420135	284,9691	9504801	287,6183	9599956	286,5853	9651341	294,4986	9657192	284,032	9011103	164,6538
P8	9559049	285,4259	9426931	286,7131	9522890	287,4243	9601980	294,5844	9668784	284,5776	9109642	164,3762
P9	9478686	285,3403	9537747	287,9506	9602586	286,7168	9537541	294,2482	9914130	283,779	9040682	164,8611
P10	9601783	285,0634	9523562	287,5971	9686232	287,1736	9661754	294,857	9752687	284,3049	9074397	164,5411
CLASSE 200x20 (menor melhor)												
	MME		PFE		wPFE		PWE		NEH		PW-NEH(x)	
	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC
P1	1656528	18,3725	1625838	18,6346	1659930	18,72145	1630330	19,90381	1650198	18,41806	1571007	24,75385
P2	1644590	18,36665	1653938	18,69224	1661094	18,69428	1646998	19,80183	1696851	18,34783	1594483	24,7018
P3	1667469	18,32892	1676653	18,67267	1669659	18,74115	1671933	19,89454	1700735	18,42659	1590319	24,73032
P4	1664333	18,39377	1658532	18,64949	1669863	18,68431	1663943	19,89761	1682783	18,34714	1592592	24,77959
P5	1616808	18,33693	1653833	18,6389	1641246	18,69921	1656275	19,83472	1655399	18,33527	1577638	24,71994
P6	1657856	18,36737	1654669	18,63105	1682791	18,69283	1679669	19,78371	1676241	18,35426	1578860	24,7514
P7	1649244	18,38191	1654643	18,64215	1653587	18,72043	1655908	19,8315	1722725	18,35465	1580413	24,70673
P8	1661574	18,3644	1667067	18,68929	1664207	18,68168	1668244	19,8431	1670691	18,37975	1591143	24,75859
P9	1658533	18,36739	1664451	18,69593	1653803	18,6816	1651656	19,86502	1688001	18,30639	1573514	24,73637
P10	1681824	18,34465	1653746	18,59151	1688287	18,71116	1668597	19,80828	1681899	18,27386	1568183	24,7485
CLASSE 200x10 (menor melhor)												
	MME		PFE		wPFE		PWE		NEH		PW-NEH(x)	
	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC
P1	1426695	16,63866	1436112	16,94791	1412364	16,92994	1415133	17,75935	1415375	16,73836	1343870	21,01322
P2	1435961	16,55097	1398004	16,89014	1451370	16,92402	1455001	17,74162	1447826	16,6793	1365126	21,0675
P3	1397298	16,62041	1407554	16,95051	1427447	16,9595	1418073	17,7665	1446273	16,67655	1362642	21,10383
P4	1391036	16,6722	1421754	16,96103	1402660	16,97483	1406830	17,70045	1540591	16,68107	1342771	21,07377
P5	1421434	16,68746	1422529	16,96923	1437179	16,94107	1446917	17,65261	1438945	16,6228	1358762	21,09784
P6	1402943	16,6323	1415563	16,95548	1447970	16,96928	1416971	17,76165	1459332	16,66929	1328879	21,07347
P7	1440707	16,65029	1448139	16,93964	1481365	16,94048	1460768	17,74251	1479866	16,70091	1417386	21,03508
P8	1445924	16,65879	1427963	16,91707	1490719	16,97752	1479846	17,74375	1521105	16,64117	1379919	21,1112
P9	1404541	16,70812	1450196	16,92169	1446697	16,8892	1402796	17,73014	1460343	16,69813	1357215	24,36986
P10	1445386	16,60284	1433907	16,93833	1450572	16,98724	1457216	17,75826	1488698	16,68835	1353388	21,0564
CLASSE 100x20 (menor melhor)												
	MME		PFE		wPFE		PWE		NEH		PW-NEH(x)	
	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC
P1	459670	2,371366	467770	2,430887	452223	2,439524	451861	2,712614	486763	2,348211	442499	5,925171
P2	469167	2,350269	462904	2,43095	465054	2,442532	464313	2,706133	470084	2,366325	448961	5,945373
P3	465854	2,354294	460331	2,429001	470122	2,464615	466508	2,70289	472043	2,357018	443214	5,911328
P4	474128	2,351499	469240	2,434734	472707	2,448927	466454	2,705143	481606	2,366976	445292	5,932247
P5	458111	2,362269	463641	2,443011	462231	2,435989	461990	2,70433	469743	2,355578	441878	5,925045
P6	470254	2,359146	462682	2,443766	462632	2,440579	465357	2,696664	468286	2,399448	447700	5,927743
P7	476223	2,357168	475310	2,435074	476983	2,439764	468463	2,731969	482766	2,356424	446833	5,926459
P8	478543	2,373863	474566	2,457746	475057	2,439689	474749	2,702473	479959	2,378146	452611	5,912174
P9	468746	2,347769	473759	2,434841	461089	2,441678	460468	2,702794	469492	2,359384	450455	5,931372
P10	477843	2,350989	475180	2,430588	480890	2,438224	479364	2,7029	480474	2,346601	451247	5,913982

CLASSE 100x10 (menor melhor)												
	MME		PFE		wPFE		PWE		NEH		PW-NEH(x)	
	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC
P1	387709	2,138702	385931	2,218625	400089	2,22717	399322	2,397043	389800	2,149353	373099	5,078289
P2	376856	2,140655	361878	2,231914	378426	2,208036	381276	2,402107	395990	2,151167	349344	5,072731
P3	390583	2,151437	379823	2,224553	381003	2,224087	383717	2,392734	383597	2,132999	362227	5,080301
P4	401507	2,167738	401078	2,219063	407917	2,262632	406938	2,400752	404193	2,145053	374344	5,082725
P5	368740	2,132501	370068	2,226076	378513	2,210364	378658	2,394183	383127	2,154428	351008	5,117396
P6	373334	2,145196	376007	2,223178	363978	2,216312	370424	2,397834	374115	2,147712	357456	5,078042
P7	381686	2,144533	379428	2,250013	384226	2,214256	384335	2,397178	380361	2,176699	353186	5,066836
P8	383933	2,133269	379981	2,218145	379019	2,214357	375301	2,397928	383881	2,147265	368267	5,067627
P9	394513	2,177388	400965	2,215531	398053	2,234345	391224	2,434212	400605	2,155145	377763	5,078717
P10	395975	2,139954	393996	2,214449	387946	2,221385	393771	2,400767	402223	2,162637	375638	5,070399
CLASSE 100x5 (menor melhor)												
	MME		PFE		wPFE		PWE		NEH		PW-NEH(x)	
	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC
P1	326997	2,03598	327846	2,098453	318210	2,113634	318802	2,246041	354258	2,032021	305263	4,636106
P2	324303	2,027764	320702	2,107129	323381	2,099581	331246	2,250168	323716	2,052627	306133	4,646423
P3	308222	2,027658	320479	2,106592	315764	2,114914	315651	2,246839	339539	2,043135	296675	4,652845
P4	297940	2,047753	300600	2,09334	316151	2,104728	301750	2,240166	302051	2,047224	282249	4,645163
P5	326111	2,02978	303342	2,09372	316535	2,110512	326879	2,237241	316028	2,03953	294490	4,660285
P6	318978	2,03716	316072	2,097448	308015	2,109816	305039	2,27998	317466	2,023228	295242	4,63684
P7	314638	2,040245	319609	2,095327	316276	2,108983	304784	2,236875	313260	2,137613	293490	4,645617
P8	309062	2,022709	326668	2,112316	309575	2,097395	318404	2,237139	303040	2,038954	313242	4,650644
P9	328030	2,040411	313473	2,102633	322599	2,119168	322444	2,241245	323505	2,03761	313261	4,635283
P10	332816	2,037088	327997	2,108182	334420	2,105156	326130	2,245606	322445	2,045549	299112	4,650804
CLASSE 50x20 (menor melhor)												
	MME		PFE		wPFE		PWE		NEH		PW-NEH(x)	
	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC
P1	147416	0,309838	146719	0,332111	145756	0,333163	143308	0,399289	155777	0,319614	142073	1,396626
P2	138027	0,307145	135686	0,334262	138169	0,345684	140609	0,393237	141811	0,32031	133915	1,398513
P3	137501	0,316787	135780	0,330273	133831	0,330654	134182	0,404255	142580	0,319407	131348	1,387629
P4	141188	0,318302	140963	0,330677	142364	0,346906	139748	0,399948	145157	0,32684	135022	1,384064
P5	139533	0,31632	140170	0,333173	140815	0,345166	140309	0,396781	140129	0,317507	135264	1,385934
P6	141460	0,312302	142899	0,333145	142905	0,339734	142604	0,390845	140621	0,366094	136914	1,384708
P7	142382	0,324409	141959	0,334569	142074	0,337917	142410	0,391274	146543	0,313805	137368	1,380412
P8	143550	0,321685	142369	0,338715	141366	0,337981	142232	0,391942	146343	0,321042	139701	1,390979
P9	143178	0,31332	142656	0,343587	141407	0,333694	143605	0,400173	143415	0,313246	136426	1,405397
P10	144921	0,313845	145605	0,330848	145558	0,331047	141459	0,39706	147125	0,319267	140574	1,391832
CLASSE 50x10 (menor melhor)												
	MME		PFE		wPFE		PWE		NEH		PW-NEH(x)	
	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC
P1	110283	0,300661	106964	0,303956	108496	0,313886	108234	0,343386	108029	0,309691	104846	1,201266
P2	108253	0,287106	107938	0,318782	107175	0,310319	106617	0,35014	107313	0,305678	101320	1,208897
P3	99720	0,307528	101365	0,310348	102199	0,319326	101980	0,342323	100858	0,292904	97693	1,197502
P4	107200	0,290255	104946	0,301327	107386	0,301694	108628	0,352063	107359	0,295032	103220	1,197284
P5	109119	0,302843	107591	0,308792	108098	0,315525	107820	0,342115	111106	0,303039	101439	1,207159
P6	103756	0,284992	104942	0,309589	105047	0,318029	105545	0,348867	105847	0,291159	101206	1,209373
P7	112120	0,293067	110436	0,304988	111717	0,302727	111272	0,349203	109213	0,284588	107421	1,19803
P8	110799	0,291096	109331	0,321199	107751	0,304194	107453	0,349591	107220	0,295902	100798	1,212185
P9	109231	0,281726	106092	0,31775	104199	0,308784	104227	0,354514	109267	0,292517	101566	1,197055
P10	112760	0,283791	109824	0,308668	109103	0,304542	110331	0,389412	108067	0,295365	103552	1,214984

CLASSE 50x5 (menor melhor)												
	MME		PFE		wPFE		PWE		NEH		PW-NEH(x)	
	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC
P1	82606	0,276525	82573	0,291922	86710	0,29827	81738	0,323226	87731	0,280236	78272	1,099479
P2	82894	0,2754	89089	0,298775	86303	0,290998	85020	0,319675	86581	0,27346	84793	1,098712
P3	84012	0,281702	83071	0,306457	82218	0,298129	81783	0,319268	84230	0,322244	79151	1,104151
P4	82728	0,278627	89258	0,293036	83565	0,302242	87848	0,320104	86880	0,28169	81832	1,110737
P5	85863	0,278813	84942	0,294241	89047	0,301934	94198	0,316759	95773	0,274071	84639	1,127089
P6	87260	0,279866	83154	0,286546	83845	0,300435	83686	0,318144	87784	0,287861	81701	1,099257
P7	85391	0,275191	82864	0,294185	86315	0,286968	86882	0,317485	80109	0,27935	79054	1,098394
P8	82345	0,273179	87358	0,289526	87190	0,305329	82737	0,319288	83784	0,273624	79246	1,110149
P9	78947	0,276584	77059	0,3044	78680	0,293961	78405	0,325272	78167	0,270755	74321	1,100615
P10	86739	0,273775	86875	0,298889	85298	0,297614	87649	0,328504	90974	0,28786	84348	1,101772
CLASSE 20x20 (menor melhor)												
	MME		PFE		wPFE		PWE		NEH		PW-NEH(x)	
	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC
P1	35764	0,04094	36143	0,033454	35614	0,027733	36252	0,036278	36444	0,023111	35614	0,182326
P2	34421	0,023702	34269	0,035122	34992	0,02727	34541	0,036467	34944	0,023568	34001	0,207259
P3	36442	0,037934	37413	0,037647	37258	0,032882	37338	0,041413	37905	0,034011	36428	0,189772
P4	33916	0,039559	34926	0,047241	34285	0,027109	34248	0,050733	33582	0,031093	34226	0,192896
P5	36903	0,036862	35976	0,036068	36270	0,027403	36385	0,040322	37675	0,033824	36385	0,182812
P6	35259	0,023956	34662	0,034488	34707	0,027434	35323	0,042624	35489	0,02372	34362	0,18921
P7	34633	0,03581	35612	0,031644	34864	0,034376	35403	0,051614	35677	0,032213	34758	0,180497
P8	35384	0,028178	35087	0,027129	34956	0,027337	35420	0,036627	35654	0,031791	34979	0,184512
P9	35647	0,032535	36717	0,033229	36313	0,042329	35565	0,036772	36707	0,023005	36144	0,176031
P10	33750	0,034	34690	0,027477	35303	0,040766	34742	0,036281	35326	0,03521	33401	0,176732
CLASSE 20x10 (menor melhor)												
	MME		PFE		wPFE		PWE		NEH		PW-NEH(x)	
	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC
P1	23220	0,022059	23489	0,040346	23944	0,025367	23808	0,03751	23605	0,030681	23364	0,163875
P2	25063	0,033179	25030	0,033348	25155	0,032092	25003	0,045065	24769	0,029607	24867	0,158251
P3	22655	0,032226	21684	0,031974	21598	0,028004	21649	0,031627	21732	0,033953	21649	0,160269
P4	20917	0,036981	20982	0,025715	21896	0,025306	20766	0,033396	21575	0,021533	20722	0,154599
P5	21945	0,031646	22302	0,026437	22123	0,025296	22219	0,031643	22294	0,038188	21455	0,159554
P6	20800	0,035791	20966	0,025205	21456	0,034356	21474	0,037796	22273	0,031427	21022	0,16509
P7	20725	0,030765	20996	0,035067	21103	0,025411	20065	0,031519	21317	0,02961	20065	0,162201
P8	23096	0,029188	22138	0,033091	22657	0,036216	22537	0,03156	22352	0,022222	21962	0,1641
P9	22605	0,03103	23267	0,029486	23267	0,025335	23222	0,036575	23523	0,033862	22582	0,155068
P10	23972	0,035173	23790	0,035043	23999	0,031758	24018	0,046183	23790	0,031129	23525	0,164134
CLASSE 20x5 (menor melhor)												
	MME		PFE		wPFE		PWE		NEH		PW-NEH(x)	
	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC	Mf	TC
P1	15845	0,028519	16546	0,029371	16245	0,029325	15746	0,039396	15905	0,023939	15495	0,152315
P2	17609	0,02115	17822	0,036071	18021	0,024038	18186	0,029728	17550	0,020334	16864	0,140899
P3	15833	0,020579	16213	0,042003	15210	0,031903	16511	0,042928	16513	0,036894	15292	0,140089
P4	17712	0,030809	18002	0,0278	17936	0,024517	17508	0,031401	17463	0,028478	17325	0,140871
P5	15650	0,034961	15571	0,033217	15248	0,033746	15042	0,029063	14956	0,037937	15042	0,153744
P6	15806	0,028435	17052	0,024544	16933	0,023839	15796	0,038671	16448	0,020323	15796	0,144456
P7	15999	0,03714	16192	0,026709	16192	0,033752	16600	0,04284	16989	0,030543	16239	0,142427
P8	15959	0,028571	16385	0,036319	16385	0,024121	16451	0,041448	16755	0,021634	15743	0,153698
P9	16602	0,02865	16894	0,035027	16692	0,032441	16692	0,036999	16353	0,027306	16398	0,14859
P10	15575	0,0213	15375	0,023776	16049	0,024873	15564	0,037252	15487	0,028082	15564	0,152222