

• U



C •

Departamento de Engenharia Mecânica

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Definição dos limites de carga a impor num sistema de produção gerido de acordo com o conceito de controlo de carga

Emanuel de Almeida Venade

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Júri

Presidente: Marta Cardoso Oliveira

Orientador: Cristóvão Silva

Vogal: Rogério Pereira Leal

Junho de 2008

Agradecimentos

Quero expressar a minha gratidão a um conjunto de pessoas que contribuíram para a realização desta tese.

Começo por agradecer ao meu orientador de tese, Professor Doutor Cristóvão Silva, pela sua inspiração, empenho e paciência na orientação desta tese. As suas sugestões e críticas contribuíram para que os objectivos desta tese fossem alcançados.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra por todos os meios disponibilizados, em especial ao Grupo de Controlo e Gestão.

A todos os meus amigos os meus sinceros agradecimentos pelo seu encorajamento e apoio incondicional.

Á Cláudia o meu agradecimento especial por todo o apoio, paciência e carinho.

Ao Mauro, João Cancela, João Alexandre, Marta, José Rui, Nilton, Eduardo, Robin, Nuno, Rodrigo, João Pedro e Isabel os meus mais sinceros agradecimentos pelo seu apoio em todos os momentos.

Á minha avó, irmão e restante família o meu agradecimento por todo o apoio e carinho.

Aos meus pais, o meu agradecimento mais profundo por todo o apoio, dedicação e encorajamento durante toda a minha vida.

Resumo

O controlo de carga, apontado por alguns autores como sendo um conceito recente de planeamento e controlo de produção disponível para aplicações práticas, tem como principal objectivo o controlo das filas de espera do espaço fabril, com vista a respeitar as datas de entrega impostas pelos recursos disponíveis ou pelos seus clientes. Se as filas de espera permanecerem relativamente pequenas e controladas, os tempos de espera associados a essas filas e consequentemente os tempos de percurso no shop-floor manter-se-ão também controlados. Segundo Kingsman (2000), o lançamento imediato das ordens de produção para o shop-floor constitui uma forma de controlo pouco eficaz. O lançamento das ordens de produção, segundo o mesmo autor, torna-se eficaz se for realizado um lançamento controlado das ordens de produção para o shop-floor, envolvendo este lançamento o uso de uma pool, onde são armazenadas as ordens de produção, sendo o seu lançamento para o shop-floor realizado num instante de tempo pré-definido.

Neste trabalho foram desenvolvidos dois modelos de simulação de shop-floor's: o primeiro com uma sequência de rotas, criadas aleatoriamente, com um fluxo indirecto, chamado de job-shop puro, e o segundo com uma sequência de rotas com fluxo dominante, chamado job-shop com uma direcção de fluxo dominante.

A optimização das cargas a impor aos centros de trabalho foi realizada por dois processos diferentes, o primeiro recorrendo a um optimizador em que a meta-heurística utilizada foram os algoritmos genéticos, e o segundo optimizador a ser utilizado foi o OptQuest que utiliza a meta-heurística "Scatter Search".

Os optimizadores utilizados neste trabalho foram testados variando a população inicial, no caso do optimizador que recorre à meta-heurística dos algoritmos genéticos, e no optimizador OptQuest foram variados as cargas dos centros de trabalho e o número de corridas executadas em cada simulação.

Analisando os resultados obtidos através dos dois optimizadores, pode-se concluir que o OptQuest, dos optimizadores analisados neste trabalho, é aquele que melhor nos permite atingir o objectivo deste trabalho, que é determinar os parâmetros do conceito de controlo de carga, combinando um modelo de simulação com um modelo de optimização.

Palavras chaves: Planeamento e controlo da produção, Controlo de carga, Algoritmos genéticos, Scatter Search, OptQuest.

Abstract

The main objective of the workload control methodology, highlighted by some authors as a new concept of production planning and control available for practical applications, is the control of the length of queues on the shop-floor, to meet the delivery dates imposed by available resources or by the customers. If the queues remain relatively small and controlled, the waiting times associated with these queues and consequently the shop-floor throughput time will remain well controlled. Accordingly to Kingsman (2000), the immediate release of production orders to the shop-floor is an inefficient form of control. The release of the production orders, accordingly to the same author, becomes effective if a controlled release of production orders to the shop-floor is carried out, involving the use of a pool, where the production orders are stored, until a pre-defined release time has been attained.

In this work two simulation models of shop-floor's were developed: the first one with a sequence of routes, with an indirect flow, called pure job-shop, and the second one with a sequence of routes with dominant flow, called job-shop with a dominant direction of flow.

The optimization of the loads to impose on work centers was done by two different processes, the first one using an optimizer where the meta-heuristic used were genetic algorithms, and the second optimizer used was the OptQuest using the meta-heuristic "Scatter Search."

The optimizers used in this study were tested varying the initial population, for the optimizer that use the meta-heuristic of genetic algorithms, and in the optimizer OptQuest different loads of the work centers and number of simulation runs were tested.

Analyzing the results obtained using the two optimizers, we can conclude that the OptQuest, is the optimizer best fitted to achieve the objective of this work, which is to determine the parameters of the workload concept, combining a simulation model with an optimization model.

Keywords: Production planning and control, Workload control, Genetic Algorithms, Scatter Search, OptQuest.

Índice

Agradecimentos.....	i
Resumo.....	ii
Abstract	iii
Índice.....	iv
Índice de figuras.....	vi
Índice de tabelas.....	viii
Abreviaturas	ix
Capítulo 1	1
1. Introdução.....	1
Capítulo 2	3
2. Conceito de controlo de carga.....	3
2.1. Definição de tempo de ciclo e dos seus componentes	3
2.2. O modelo do funil	5
2.3. Metodologia WLC.....	6
2.4. Benefícios da metodologia WLC	8
2.5. Relação entre limites de carga e tempos de ciclo.....	10
Capítulo 3	12
3. Metodologia proposta.....	12
Capítulo 4	14
4. Modelos de simulação.....	14
Capítulo 5	19
5. Algoritmos genéticos.....	19
Capítulo 6	24
6. Resultados	24
Capítulo 7	29
7. Discussão dos resultados.....	29
Capítulo 8	33
8. Optimizador OptQuest	33
Capítulo 9	38

9. Resultados finais	38
Capítulo 10	45
10. Conclusão final.....	45
Referências bibliográficas	47

Índice de figuras

Figura 1. Componentes do tempo de ciclo de operação.....	4
Figura 2. Modelo do funil (adaptado de Bechte, 1988).....	6
Figura 3. Representação esquemática do estágio de revisão e lançamento das ordens de fabrico num sistema de planeamento e controlo da produção.	7
Figura 4. Relação entre tempo de passagem pelo shop-floor e o tempo de ciclo de produção.	11
Figura 5. Uma abordagem para a simulação – optimização.....	12
Figura 6. Job-shops (a) puro e (b) com direcção de fluxo dominante [4].	16
Figura 7. Interface do simulador de um job-shop em SIMUL8 ©.	17
Figura 8. Interface do optimizador desenvolvido em Visual Basic 6.0 ©.	22
Figura 9. Melhor fitness e fitness médio de cada geração para o primeiro caso de job-shop puro.....	26
Figura 10. Melhor fitness e fitness médio de cada geração para o segundo caso de job-shop puro.	27
Figura 11. Melhor fitness e fitness médio de cada geração para o primeiro caso de job-shop com fluxo dominante.....	27
Figura 12. Melhor fitness e fitness médio de cada geração para o primeiro caso de job-shop com fluxo dominante.....	28
Figura 13. Optimização para simulação: perspectiva prática [2].	31
Figura 14. Modelo da caixa negra do OptQuest.....	34
Figura 15. Conjunto de referência a duas dimensões [9].	35
Figura 16. Definição das variáveis de decisão no optimizador OptQuest.....	36
Figura 17. Definição das restrições no optimizador OptQuest.....	36
Figura 18. Definição do objectivo do optimizador OptQuest.	36
Figura 19. Definição do número de simulações a serem realizadas pelo optimizador OptQuest.....	37
Figura 20. Definição do número de corridas a serem realizadas por simulação pelo optimizador OptQuest.	37
Figura 21. Resultados obtidos a partir do optimizador OptQuest.	37

Figura 22. Experiência 1 do modelo de job-shop puro.	40
Figura 23. Experiência 2 do modelo de job-shop puro.	40
Figura 24. Experiência 3 do modelo de job-shop puro.	41
Figura 25. Experiência 4 do modelo de job-shop puro.	41
Figura 26. Experiência 1 do modelo de job-shop com fluxo dominante.....	42
Figura 27. Experiência 2 do modelo de job-shop com fluxo dominante.....	42
Figura 28. Experiência 3 do modelo de job-shop com fluxo dominante.....	43
Figura 29. Experiência 4 do modelo de job-shop com fluxo dominante.....	43
Figura 30. Experiência 5 do modelo de job-shop com fluxo dominante.....	44

Índice de tabelas

Tabela 1. Características do shop-floor.....	14
Tabela 2. Probabilidades do job-shop puro [4].	16
Tabela 3. Probabilidades do job-shop com direcção de fluxo dominante [4].	16
Tabela 4. Parâmetros de optimização.....	24
Tabela 5. Melhor cromossoma da última geração obtida nas duas experiências para o job-shop puro e para o job-shop com fluxo dominante.....	25
Tabela 6. Implementações de simuladores/optimizadores.	32
Tabela 7. Parâmetros e resultados obtidos nas experiências para o job-shop puro.....	39
Tabela 8. Parâmetros e resultados obtidos nas experiências para o job-shop com fluxo dominante.....	39

Abreviaturas

WLC – método de controlo de carga

PME's – pequenas e médias empresas

TCP – tempo de ciclo de produção

SFT – tempo médio no shop-floor

$TLT_{máx}$ – tempo total médio de processamento, considerando um lançamento imediato das ordens de fabrico

Capítulo 1

1. Introdução

O método de controlo de carga (WLC¹) é um importante método de planeamento e controlo da produção, que tem recebido muita atenção por parte de investigadores e industriais, desde o seu aparecimento nos anos 80. Este método tem sido apontado como o mais relevante para o planeamento da produção em empresas com produção por encomenda.

Os avanços conseguidos em metodologias de planeamento da produção e sistemas de informação têm trazido melhorias substanciais ao desempenho dos sistemas produtivos. O recurso a sistemas de informação ou metodologias de planeamento e controlo da produção tem permitido, nalguns casos, melhorar o fluxo de materiais, aumentar a fiabilidade das datas de entrega ou aumentar a produtividade e controlar os tempos de ciclo.

A ideia central da metodologia WLC é particularmente simples. As ordens de produção que chegam ao sistema de produção não são lançadas imediatamente para fabrico no “shop-floor”, sendo antes mantidas numa pool de ordens de fabrico. A cada máquina do “shop-floor” associa-se um limite de carga, representando o número máximo de horas de trabalho que pode estar à espera de ser processado nesse centro de trabalho. Periodicamente, a pool de ordens de fabrico é analisada para verificar quais as que devem ser lançadas para processamento no shop-floor. Quando uma ordem de fabrico é avaliada, a carga de trabalho que esta irá impor a todos os centros de trabalho por onde tem de passar é adicionada à carga de trabalho já à espera de ser processada pelos centros de trabalho. Se a adição da carga de trabalho da nova ordem de produção levar à violação do limite imposto num determinado centro de trabalho, essa nova ordem de produção não é lançada para processamento, sendo mantida na pool até ao próximo período de avaliação.

Uma das razões apontadas para que a metodologia WLC não esteja mais disseminada na indústria é a dificuldade associada à definição correcta dos limites de carga a impor a cada centro de trabalho, parâmetro fundamental para o bom desempenho da metodologia.

¹ Workload Control.

Assim, pretende-se com este trabalho desenvolver uma metodologia para determinar os parâmetros do conceito de controlo de carga, combinando um modelo de simulação com um modelo de optimização.

Capítulo 2

2. Conceito de controlo de carga

O controlo de carga (WLC) é um conceito de planeamento e controlo da produção, especialmente desenvolvido para as exigências das PME's que operam em ambiente de produção por encomenda². Muitas dessas empresas têm sistemas produtivos do tipo “job-shop”. O termo job-shop é utilizado para indicar um tipo de situação industrial onde um grande número de produtos diferentes é produzido com rotas e tempos de processamento variáveis.

2.1. Definição de tempo de ciclo e dos seus componentes

As encomendas recebidas por uma empresa dão origem a uma ou mais ordens de fabrico necessárias para a execução da encomenda. As ordens de fabrico são compostas por um conjunto de operações a realizar nos diferentes postos de trabalho.

Para uma melhor compreensão dos tempos em análise neste trabalho, irão ser definidos em seguida, os seguintes tempos:

- Tempo de ciclo da operação;
- Tempo de passagem pelo shop-floor;
- Tempo de ciclo de produção;
- Tempo de ciclo total.

O tempo de ciclo de uma operação pode ser decomposto em cinco componentes: tempo de espera antes de entrar no centro de trabalho, tempo de preparação, tempo de processamento, tempo de espera após o processamento e tempo de transporte para o centro de trabalho seguinte. Estes componentes apresentam-se esquematicamente na figura 1, onde se

² Caracteriza-se pelo fabrico descontínuo de produtos não padronizados e de acordo com determinadas especificações do cliente, em volumes relativamente baixos.

representam duas operações consecutivas de uma ordem de fabrico. Considera-se que o tempo de ciclo da operação i , representado na figura 1, é o somatório do tempo de espera após o processamento da operação $i-1$, do tempo de transporte para o centro de trabalho que processa a operação i , do tempo passado na fila de espera desse centro de trabalho e do seu tempo de preparação e processamento.

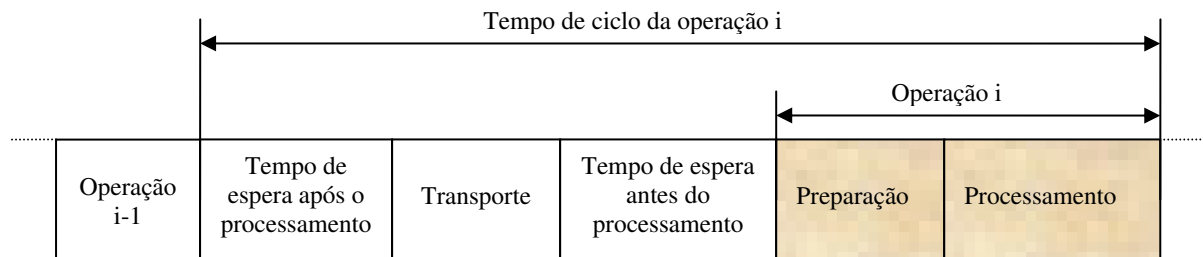


Figura 1. Componentes do tempo de ciclo de operação [3].

Importa ainda mencionar que das cinco componentes referidas anteriormente, aquela que geralmente contribui com maior percentagem para o tempo de ciclo da operação é o tempo de espera antes do processamento.

O tempo de passagem pelo shop-floor representa o tempo de permanência de uma ordem de fabrico no shop-floor, sendo este composto pelo somatório de todos os tempos de ciclo das operações necessárias à sua realização.

O tempo de ciclo de produção é o tempo decorrido entre a emissão de uma ordem de fabrico e a sua entrada no armazém de produto acabado. A emissão de uma ordem de fabrico poderá ter origem numa encomenda recebida pela empresa, em sistemas de produção por encomenda, ou pelo baixo nível de stock, em sistemas de produção para stock. Se o instante em que uma ordem de fabrico é emitida coincide com o instante em que a ordem é lançada para o shop-floor, tem-se um tempo de ciclo de produção igual ao tempo de passagem pelo shop-floor (lançamento imediato das ordens de fabrico). No entanto, nalguns sistemas de produção, a emissão de uma ordem de fabrico não implica o seu lançamento, sendo antes mantida numa pool até que se atinja um instante considerado ideal para a sua entrada no shop-floor. Neste tipo de sistemas, o tempo de ciclo de produção é igual ao tempo de passagem pelo shop-floor, acrescido do tempo de espera na pool.

Nos sistemas de produção para stock pode existir algum tempo entre a verificação de uma necessidade e a emissão da correspondente ordem de fabrico, para se proceder à encomenda de matérias-primas ou componentes, ou providenciar as ferramentas necessárias ao seu processamento. Esse intervalo de tempo é ainda mais significativo em sistemas de

produção por encomenda. Neste caso, após a recepção de uma encomenda é necessário proceder a um conjunto de actividades, como: clarificar os requisitos tecnológicos necessários à sua realização, verificar a possibilidade de produzir o que é requerido, negociar preços e datas de entrega e encomendar matérias-primas e componentes. Existe ainda um intervalo de tempo não considerado nas definições anteriores que corresponde ao tempo necessário à expedição do produto acabado para o cliente, preparação de documentos, embalagem e outros. Todos os tempos referidos anteriormente neste parágrafo, somados ao tempo de ciclo de produção, dão origem ao tempo de ciclo total, que corresponde ao tempo decorrido entre a verificação de uma necessidade e a sua satisfação. Este tempo de ciclo é particularmente importante em sistemas de produção por encomenda, visto que, representa o tempo de espera sentido pelo cliente após a colocação da sua encomenda.

2.2. O modelo do funil

A metodologia WLC tem como princípio básico o controlo da dimensão das filas de espera existentes nos vários centros de trabalho, de modo a que o tempo de ciclo de produção seja controlado.

De modo a compreender como é que a redução das filas de espera pode contribuir para a redução do tempo de ciclo de produção, é necessário compreender a relação entre o input, o output, o stock de produtos intermédios e o tempo de ciclo de produção, que ocorre para um determinado centro de trabalho.

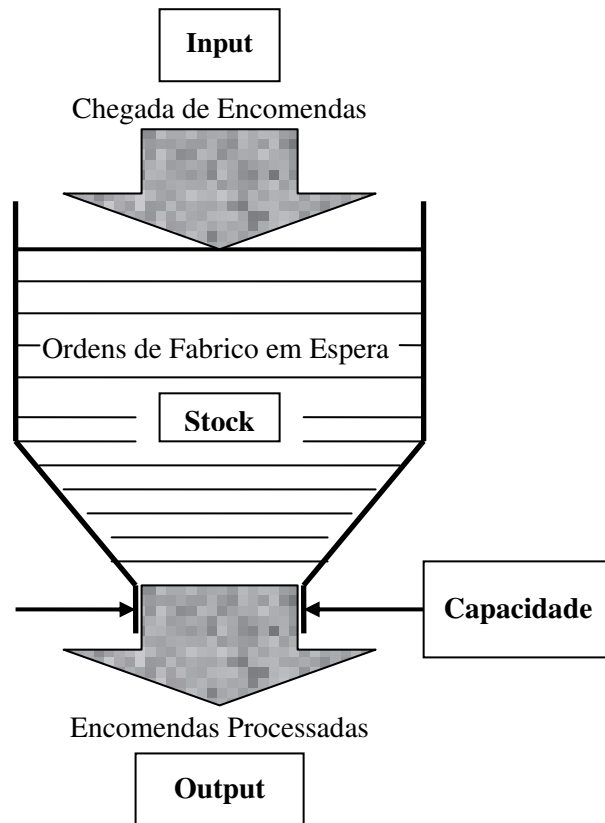


Figura 2. Modelo do funil (adaptado de Bechte, 1988) [3].

Esta relação pode ser explicada recorrendo ao modelo do funil, ver figura 2, originalmente apresentado por Bechte (1988). As ordens de fabrico que chegam a um determinado centro de trabalho (input) ficam em fila de espera (stock em vias de fabrico). Após algum tempo, as ordens de fabrico em fila de espera são processadas (output), seguindo para os centros de trabalho seguintes. Em função da urgência das ordens de fabrico, estas são preferidas ou preteridas, levando a uma variabilidade do tempo de ciclo associado a cada uma delas, verificando-se no entanto que o tempo de ciclo médio é igual à razão entre o input e o output médio.

2.3. Metodologia WLC

O WLC procura tirar proveito das relações que foram referidas anteriormente, recorrendo a um estágio de revisão e lançamento de ordens de fabrico, como se pode verificar na figura 3. Este estágio permite gerir a transição do sistema de planeamento para a fase de execução (shop-floor).

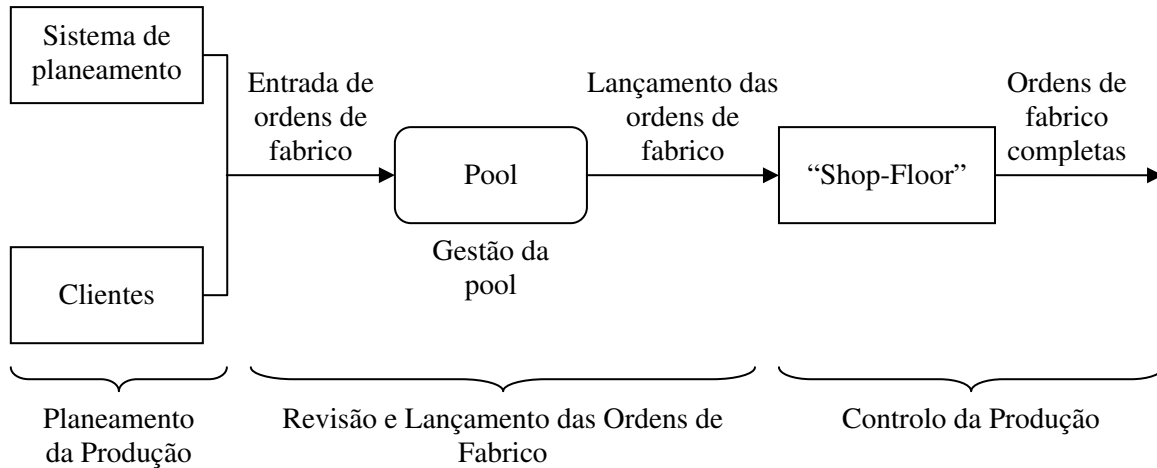


Figura 3. Representação esquemática do estágio de revisão e lançamento das ordens de fabrico num sistema de planeamento e controlo da produção.

Com a metodologia WLC, a chegada das ordens de fabrico, sejam estas geradas por um sistema de planeamento de necessidades ou pelas encomendas dos clientes, não implica o seu lançamento para o shop-floor, sendo as mesmas mantidas numa pool, que as separa do sistema de planeamento (Bergamashi et al, 1997). Portanto, o estágio de revisão e lançamento das ordens de fabrico pode ser considerado como a ligação entre o planeamento da produção e o controlo da produção (Zapfel e Missbauer, 1993), ou entre a gestão estratégica e a gestão operacional da produção (Malhotra et al, 1994).

Na metodologia WLC, o estágio de lançamento de ordens de fabrico para o shop-floor funciona da seguinte forma:

- (1) As ordens de fabrico que vão chegando ao sistema são mantidas numa pool, onde são ordenadas em função da sua urgência relativa. Para determinar a urgência relativa de uma ordem de fabrico, calcula-se a sua data limite de lançamento, dada pela diferença entre a sua data de entrega e o seu tempo de processamento. Quanto menor a data limite de lançamento de uma ordem de fabrico, maior é a urgência relativa desta. Se uma ordem de fabrico for lançada após a sua data limite de lançamento, a sua entrega será feita com atraso;
- (2) Periodicamente, a pool é analisada para se decidir que ordens de fabrico devem ser lançadas para o shop-floor. Esse período de análise da pool é denominado intervalo entre lançamentos e é uma decisão de gestão;
- (3) No shop-floor, a cada centro de trabalho é atribuído um limite de carga. O limite de carga de um centro de trabalho representa o número máximo de horas de trabalho que se pretende ter presente no shop-floor para esse centro de

trabalho. Por exemplo, se o limite de carga dos centros de trabalho i for de 30 horas, isso significa que o somatório do tempo de processamento no centro de trabalho i de todas as ordens de fabrico presentes no shop-floor, que têm o centro de trabalho i na sua rota, não poderá exceder as 30 horas;

- (4) Quando o período de lançamento é atingido, todas as ordens de fabrico da pool são analisadas, por ordem crescente da sua data limite de lançamento, para verificar se estas podem ser lançadas para fabrico. O tempo de processamento de uma ordem de fabrico para cada um dos centros de trabalho da sua rota é adicionado à carga de trabalho já presente nesses centros de trabalho. Se essa adição não levar à violação dos limites de carga dos centros de trabalho por onde a ordem de fabrico deve passar, esta é lançada para o shop-floor. Pelo contrário, se a adição dos tempos de processamento da ordem de fabrico fizer com que o limite de carga em um, ou mais, centros de trabalho da sua rota seja ultrapassado, a ordem de fabrico é mantida na pool até ao próximo período de lançamento;
- (5) No shop-floor, as ordens de fabrico lançadas são processadas pela ordem definida por uma regra de sequenciamento pré-determinada.

Como é evidente, a metodologia acima descrita, permite limitar a dimensão das filas de espera no shop-floor, o que conduz a uma redução do tempo de passagem pelo shop-floor. No entanto, a redução do tempo de passagem pelo shop-floor poderá não se traduzir numa redução do tempo de ciclo de produção, uma vez que o tempo de espera no shop-floor é transferido para a pool.

2.4. Benefícios da metodologia WLC

Conforme se referiu no ponto anterior, o objectivo da metodologia WLC consiste num controlo do stock de produtos em vias de fabrico e na equilibragem da carga de cada centro de trabalho. Pode-se assim garantir uma boa taxa de utilização de todos os centros de trabalho e obter um menor tempo de ciclo total de produção.

Os principais benefícios da metodologia WLC são então:

- (1) O controlo das filas de espera no shop-floor, de modo a serem atingidos tempos de percurso mais estáveis e reduzidos, e consequentemente, proporcionar tempos de entrega mais curtos. Neste controlo são ajustadas e

limitadas as cargas a impor aos centros de trabalho de forma a assegurar uma utilização adequada dos recursos, evitando tempos mortos (resultante da paragem dos centros de trabalho) e simultaneamente, reduzindo os tempos de percurso no shop-floor;

- (2) Controlo do lançamento das ordens de fabrico. Após o registo de uma ordem de fabrico, é necessário realizar um conjunto de operações de preparação (aquisição de matéria prima, projecto de fabrico e planeamento de processo), antes que a ordem de fabrico esteja disponível para lançamento. Portanto, o lançamento de uma ordem de fabrico para o shop-floor não é imediato. As ordens de fabrico que estão em processo de preparação são mantidas numa pool. Enquanto as ordens de fabrico aguardam na pool, as mesmas podem sofrer alterações inesperadas relativamente a quantidades encomendadas e a especificações técnicas dos produtos a fabricar. Estas alterações são de fácil implementação, uma vez que a ordem de fabrico ainda não foi lançada para processamento no shop-floor;
- (3) Controlo da produtividade. Se a carga nos centros de trabalho do shop-floor é muito baixa, os operadores dos centros de trabalho tendem a realizar as suas tarefas mais lentamente. Isso deve-se ao facto de tentarem evitar ficar sem trabalho para realizar, o que os leva a reduzir a sua velocidade de processamento das ordens de fabrico. Quando a carga é demasiado elevada existem dificuldades de comunicação entre os vários níveis hierárquicos a fim de serem definidas as prioridades de fabrico e surgem dificuldades nas tarefas a realizar. Além disso, espera-se que o número de ordens de fabrico retidas em cada centro de trabalho aumente, devido ao aumento do número de ordens de fabrico urgentes, o que leva a uma perda de produtividade do operador. Assim, uma carga demasiado elevada ou baixa leva a que o tempo de processamento das ordens de fabrico seja superior ao tempo de processamento em condições normais. Portanto, o controlo da carga nos centros de trabalho tem influência na produtividade dos operadores;
- (4) Qualidade dos produtos. Se a carga nos centros de trabalho no shop-floor for demasiado elevada, os operadores encontram-se sob maior pressão, o que pode originar um decréscimo da qualidade, o que implica um aumento do tempo passado em tarefas de reparação ou no fabrico de novos produtos. Isto pode

conduzir a uma diminuição da produtividade e a um aumento dos tempos de ciclo.

2.5. Relação entre limites de carga e tempos de ciclo

Pelo exposto na secção 2.3. é fácil perceber que o desempenho da metodologia WLC está muito dependente dos limites de carga impostos aos diferentes centros de trabalho. Se os limites de carga forem demasiado elevados não se conseguirá reduzir significativamente a dimensão das filas de espera e conseqüentemente não se conseguirá uma redução do tempo de passagem pelo shop-floor.

Por outro lado, se os limites de carga forem demasiado baixos poderá ser difícil lançar atempadamente as ordens de fabrico, que ficarão retidas demasiado tempo na pool, com prejuízo para o tempo de ciclo de produção.

A relação entre o tempo de passagem pelo shop-floor, o tempo de ciclo de produção e os limites de carga vem sendo estudada por vários autores. A relação entre as três variáveis referidas anteriormente encontra-se representada na figura 4.

O ponto 1 representa a situação em que não existem limites de carga nos centros de trabalho, ou seja, em que o lançamento das ordens de fabrico é imediato. Verifica-se que nesta situação o tempo de passagem pelo shop-floor é igual ao tempo de ciclo de produção, o que neste caso, é natural dada a inexistência de uma pool. Impondo limites de carga aos centros de trabalho cada vez mais baixos, o tempo de ciclo de produção e o tempo de passagem pelo shop-floor decresce, como se pode verificar nos pontos 2, 3 e 4. O ponto 5 representa o valor óptimo do limite de carga a impor aos centros de trabalho, sendo obtido neste caso, o menor tempo de ciclo de produção de uma ordem de fabrico.

No entanto, se diminuirmos o limite de carga abaixo do valor óptimo de que resulta o valor mínimo de tempo de ciclo de produção de uma ordem de fabrico (pontos 6, 7 e 8), o valor do tempo de passagem pelo shop-floor diminui, mas o tempo de ciclo de produção aumenta significativamente, o que permite inferir que o tempo de uma ordem de fabrico na pool aumenta significativamente, estando um maior número de ordens de fabrico na pool e um reduzido número de ordens de fabrico no shop-floor.

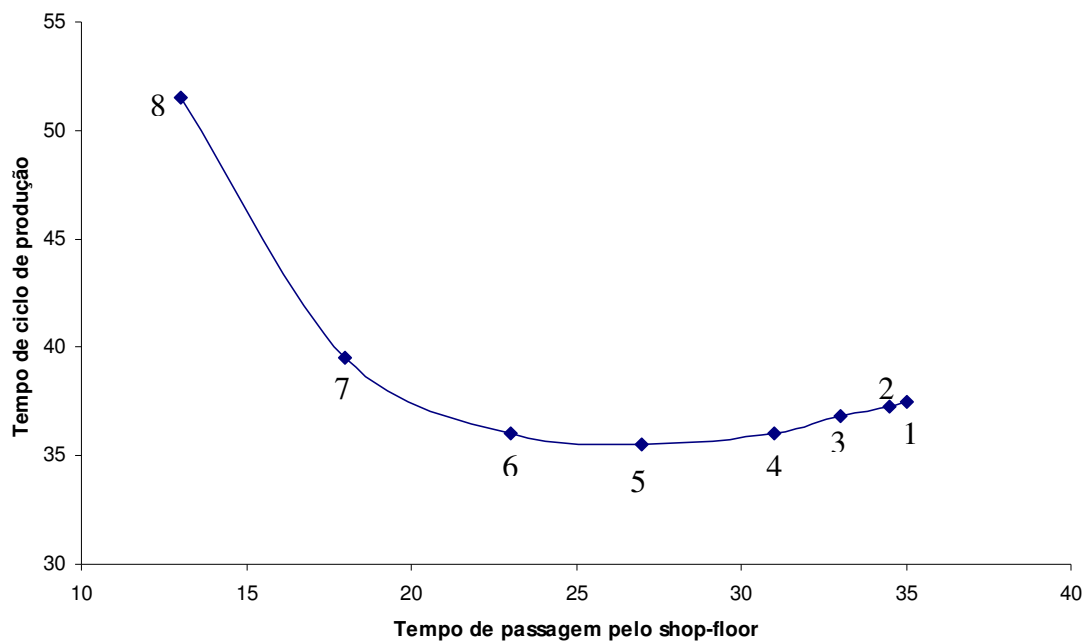


Figura 4. Relação entre tempo de passagem pelo shop-floor e o tempo de ciclo de produção.

Conforme se referiu na introdução, o objectivo deste trabalho consiste no desenvolvimento de uma metodologia que permita encontrar os limites de carga a impor aos centros de trabalho de um shop-floor, de modo a minimizar o tempo de ciclo de produção.

Capítulo 3

3. Metodologia proposta

A escolha de um conjunto de cargas a impor a um conjunto de centros de trabalho num determinado shop-floor é um problema de análise combinatória. Se considerarmos um shop-floor com m máquinas, este problema consiste em determinar m valores de cargas que permitam a optimização de um critério de desempenho definido para o shop-floor em questão.

As técnicas mais populares para a resolução de problemas de optimização combinatória são as meta-heurísticas. Para o nosso problema, dada a dificuldade associada à determinação por via analítica do valor da função objectivo, decidiu-se utilizar a metodologia de optimização proposta por April [12]. Essa metodologia está representada esquematicamente na figura 5 e combina um optimizador meta-heurístico com um modelo de simulação.

O optimizador meta-heurístico escolhe um conjunto de valores para os parâmetros de entrada e utiliza as respostas geradas pelo modelo de simulação para tomar decisões relativamente à selecção do próximo conjunto de soluções a gerar.

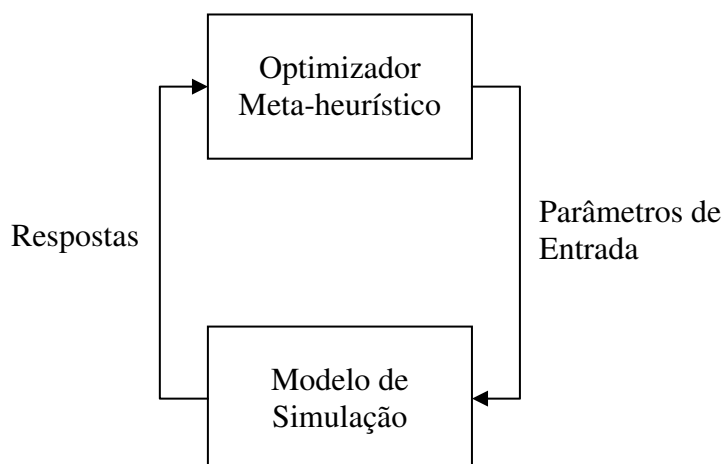


Figura 5. Uma abordagem para a simulação – optimização.

Assim, para a optimização dos limites de carga a impor aos centros de trabalho de um shop-floor, foi necessário desenvolver um modelo de simulação de um sistema de produção, controlado de acordo com a metodologia WLC e uma meta-heurística de optimização.

O modelo de simulação foi desenvolvido utilizando o software SIMUL8 © e será apresentado no capítulo seguinte.

Existe uma grande variedade de meta-heurísticas. No nosso caso, optou-se pela implementação de um algoritmo genético. Esta escolha deveu-se ao facto de já terem sido desenvolvidos algoritmos genéticos no Grupo de Controlo e Gestão do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra, para a resolução de outros problemas, o que poderia acelerar o trabalho de programação necessário à implementação da meta-heurística.

Os dois sistemas, o simulador e o optimizador, estão ligados entre si, de forma a determinar a carga óptima a impor a cada centro de trabalho. O algoritmo genético define um conjunto de cargas a impor a cada centro de trabalho. Este conjunto de cargas é utilizado como parâmetro de entrada pelo modelo de simulação, que calcula um indicador de desempenho (fitness) a ser optimizado. Os resultados de cada iteração do processo de simulação são utilizados pelo algoritmo genético para o cálculo de um novo conjunto de cargas, sendo este ciclo repetido até que o critério de paragem seja alcançado.

Capítulo 4

4. Modelos de simulação

Vários autores têm testado o desempenho da metodologia WLC, recorrendo a modelos de simulação. Na maioria dos estudos da metodologia WLC por simulação, o shop-floor simulado tem um conjunto de características comuns. As características do shop-floor geralmente utilizadas nos estudos da metodologia WLC por simulação, encontram-se resumidas na tabela 1.

Shop-floor	Composto por 6 centros de trabalho
Comprimento da rota	Distribuição discreta uniforme, em [1;6]
Capacidade dos centros de trabalho	Capacidades iguais em todos os centros de trabalho
Taxa de utilização dos centros de trabalho	90%
Sequenciamento das ordens de fabrico no shop-floor	“First Come, First Served”
Número de operações por ordem de fabrico	Uniforme [1;6]
Tempos de processamento	Distribuição Exponencial, $(1/\lambda)=1$
Tempo entre chegada de ordens de fabrico	Distribuição Exponencial, $(1/\lambda)=0,65$

Tabela 1. Características do shop-floor.

Neste trabalho decidiu-se recorrer a um modelo de shop-floor com características semelhantes aos dos modelos utilizados por outros autores no passado. Assim, modelou-se um shop-floor com 6 centros de trabalho.

Todos os centros de trabalho têm a mesma capacidade, sendo esta invariável durante todas as experiências. Para cada centro de trabalho, o tempo de processamento de uma ordem de fabrico é gerado de acordo com uma distribuição exponencial negativa de média 1. A rota e o tempo de processamento de uma ordem de fabrico são conhecidos quando a ordem de lançamento é dada. O comprimento da rota, determinado como o número de centros de trabalho pelos quais uma ordem de produção passa, varia entre um e seis. Um centro de trabalho é visitado no máximo uma vez por cada ordem de produção. O tempo entre chegada de ordens de fabrico foi escolhido de modo a garantir um nível de utilização média de 90%, para todos os centros de trabalho pertencentes ao shop-floor. É assumido que as datas de entrega são impostas externamente e são modeladas como sendo uma variável aleatória.

Foram desenvolvidos dois modelos de simulação de um sistema de produção, compostos por um shop-floor com as características acima mencionadas, controlado pela metodologia WLC. Os modelos de simulação foram desenvolvidos recorrendo ao software SIMUL8 ©. A única diferença entre os dois modelos é o tipo de rota seguida pelas ordens de fabrico:

- Modelo 1 – Job-shop puro. A rota das ordens de fabrico é completamente aleatória. A ordem de fabrico pode passar por qualquer centro de trabalho e por qualquer ordem (ver figura 6 (a));
- Modelo 2 – Job-shop com fluxo dominante. A ordem de fabrico pode passar por qualquer número de centro de trabalho, mas sempre do posto 1 para o posto 6 (ver figura 6 (b)).

Nas tabelas 2 e 3 apresenta-se a probabilidade de transição entre centros de trabalho. O elemento (a, b) de cada matriz representa a probabilidade de uma ordem de produção passar do centro de trabalho a para o centro de trabalho b , sendo a parte da rota pela qual a ordem de produção vai passar. O elemento (0, b) dá-nos a probabilidade de uma ordem de produção ao sair da pool, entrar no shop-floor no centro de trabalho b . O elemento (a, 0) dá-nos a probabilidade de uma ordem de produção sair do shop-floor a partir do centro de trabalho a , pertencendo a à rota da ordem de fabrico.

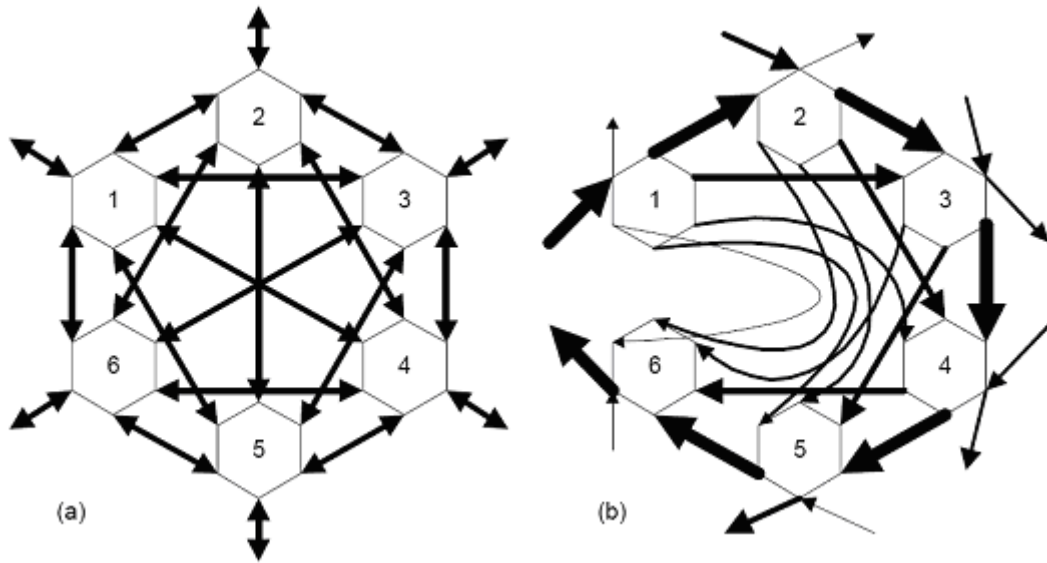


Figura 6. Job-shops (a) puro e (b) com direcção de fluxo dominante [16].

(a)	0	1	2	3	4	5	6
0	0	1/6	1/6	1/6	1/6	1/6	1/6
1	1/6	0	1/6	1/6	1/6	1/6	1/6
2	1/6	1/6	0	1/6	1/6	1/6	1/6
3	1/6	1/6	1/6	0	1/6	1/6	1/6
4	1/6	1/6	1/6	1/6	0	1/6	1/6
5	1/6	1/6	1/6	1/6	1/6	0	1/6
6	1/6	1/6	1/6	1/6	1/6	1/6	0

Tabela 2. Probabilidades do job-shop puro [16].

(b)	0	1	2	3	4	5	6
0	0	7/12	7/36	7/72	7/120	7/180	7/252
1	1/21	0	2/3	1/6	1/15	1/30	2/105
2	1/15	0	0	2/3	1/6	1/15	1/30
3	1/10	0	0	0	2/3	1/6	1/15
4	1/6	0	0	0	0	2/3	1/6
5	1/3	0	0	0	0	0	2/3
6	1	0	0	0	0	0	0

Tabela 3. Probabilidades do job-shop com direcção de fluxo dominante [16].

Na figura 7 apresenta-se a interface do modelo de simulação do shop-floor desenvolvido em SIMUL8 ©.

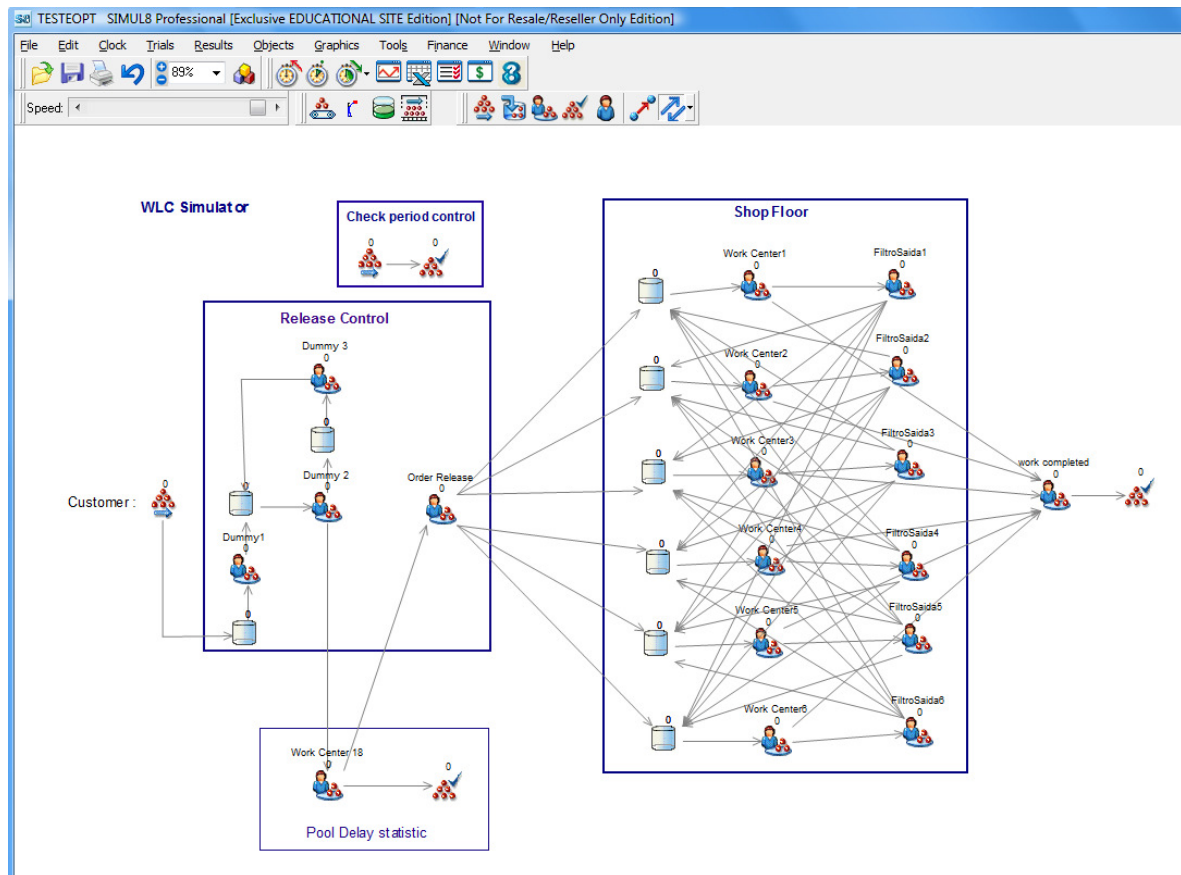


Figura 7. Interface do simulador de um job-shop em SIMUL8 ©.

Em seguida, proceder-se-á a uma breve explicação do modo de funcionamento do modelo de simulação desenvolvido, ver figura 7.

O elemento “Customer” gere a chegada de ordens de fabrico ao job-shop. É neste elemento que é calculado o tempo de entrada no sistema, a dimensão da rota, a rota seguida pela ordem de fabrico, o tempo de processamento em cada centro de trabalho da ordem de fabrico e a data limite de lançamento.

Na secção “Check period control” é definido o instante de lançamento das ordens de fabrico.

A secção do “Release Control” representa a pool das ordens de fabrico. O “Dummy 1” calcula a urgência relativa das ordens de fabrico, ordenando-as de acordo com essa urgência. O “Dummy 2”, que é activado sempre que o instante de lançamento é atingido, analisa as ordens de fabrico e verifica se o limite de carga de todos os centros de trabalho por onde passa cada ordem de fabrico é ultrapassado, se esta for lançada. No caso de ultrapassar os limites de

carga impostos, a ordem de fabrico regressa novamente para a pool através do “Dummy 3” e aguarda pelo instante de lançamento seguinte. Se os limites de carga impostos não forem ultrapassados, a ordem de fabrico passa para a secção do “Pool Delay statistic”. O “Order Release” envia as ordens de fabrico para o shop-floor, distribuindo-as pelos respectivos centros de trabalho.

A secção do “Pool Delay statistic” é um posto de trabalho fictício, no qual são obtidos factores de desempenho, como por exemplo, o tempo de permanência das ordens de fabrico na pool.

Na secção “Shop-Floor” encontram-se representados os centros de trabalho constituintes do shop-floor. As ordens de fabrico são processadas de acordo com a rota e tempo de processamento determinadas inicialmente. Os filtros de saída são postos fictícios, que recebem as ordens de fabrico processadas pelo centro de trabalho correspondente e que enviam posteriormente para a fila de espera do centro de trabalho seguinte. No caso de estar concluída a ordem de fabrico, a mesma é enviada para o “work completed”, que regista o instante em que a ordem de fabrico sai do job-shop. A jusante ao “work completed” encontra-se um contador de ordens de fabrico concluídas.

Capítulo 5

5. Algoritmos genéticos

Os algoritmos genéticos são uma metodologia que utiliza os princípios inspirados pela reprodução de populações naturais para desenvolver soluções para problemas.

Num algoritmo genético existe um grupo de indivíduos que competem entre si, de forma a garantir a sua própria sobrevivência e a passagem das suas características às gerações futuras.

O algoritmo genético começa com uma população inicial de cromossomas gerados aleatoriamente, sendo gerados posteriormente melhores cromossomas aplicando os operadores genéticos. A partir de sucessivas iterações, os cromossomas na população são avaliados para que seja verificada a sua adaptação como soluções e na base destas avaliações, uma nova população de cromossomas é gerada usando um critério de selecção e os operadores genéticos, tais como o cruzamento (crossover) e a mutação. Para avaliar a qualidade da solução de um cromossoma é calculado, através de uma função, o fitness desse cromossoma. O fitness é proporcional à utilidade ou adaptação da solução que esse cromossoma representa.

Em seguida, descreve-se detalhadamente o algoritmo genético que se desenvolveu para a obtenção do conjunto de cargas para o sistema de simulação do método de controlo de carga, descrito anteriormente. Começa-se por indicar como é que um conjunto de cargas é representado na forma de um cromossoma e o fitness utilizado na quantificação da qualidade de um cromossoma.

- *Cromossoma:*

Cada cromossoma deve representar, sem nenhuma ambiguidade, a solução para o problema que se pretende resolver. Neste caso, o objectivo é achar seis cargas para impor a cada centro de trabalho do shop-floor em questão. Portanto, a solução irá ser representada por

um cromossoma composto por 6 genes, representando cada um deles a carga de um centro de trabalho, que é dada pela equação (1):

$$C = (c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6) \quad (1)$$

onde, c_i é um valor real, arredondado à primeira casa decimal, representando a carga do centro de trabalho i .

▪ *Avaliação do cromossoma:*

Cada cromossoma é caracterizado por um fitness. O fitness de um indivíduo representa uma medida da qualidade do mesmo. O fitness de um cromossoma, para o algoritmo genético desenvolvido, é calculado recorrendo à equação (2):

$$Fitness = (TCP + SFT) + (TCP - TLT_{m\acute{a}x}) \quad (2)$$

Onde:

- ✓ TCP é o tempo de ciclo de produção médio de processamento para as cargas testadas,
- ✓ SFT é o tempo médio no shop-floor para as cargas testadas,
- ✓ $TLT_{m\acute{a}x}$ é o tempo total médio de processamento, considerando um lançamento imediato das ordens de fabrico.

A equação (2) demonstra que foi decidido procurar um conjunto de cargas que nos levasse a obter os melhores resultados para o sistema do método de controlo de carga em termos de tempo de fluxo de trabalho. Com esta função de fitness, o algoritmo genético irá procurar o conjunto de cargas que conduzam a uma maior redução do SFT sem que se aumente o $TLT_{m\acute{a}x}$. Notar que a segunda parte da equação (2) penaliza as soluções para as quais o SFT é reduzido à custa do TCP alcançado por um sistema de lançamento imediato.

Tendo sido apresentado como uma solução é codificada e avaliada, o processo iterativo do algoritmo genético que é descrito em seguida, é composto por 5 etapas.

• *Etapa 1: Inicialização do algoritmo genético*

Para inicializar o algoritmo genético, são gerados aleatoriamente 75 cromossomas. Isto é, o algoritmo genético começa o processo iterativo com uma população de 75 indivíduos.

- *Etapa 2: Mecanismo de selecção*

A partir da população do processo de inicialização o algoritmo genético selecciona dois indivíduos para gerar um cromossoma descendente. O algoritmo genético utilizado utiliza o mecanismo de selecção proporcional, em que a probabilidade de seleccionar o cromossoma c_i ($p_s(c_i)$) é dada por:

$$p_s(c_i) = \frac{\sum_{j=1}^{75} f(c_j)}{f(c_i)} \quad (3)$$

onde, $f(c_i)$ representa o fitness do cromossoma i .

Desta forma, os cromossomas com menor fitness médio tendem a ser seleccionados com mais frequência para produzir descendentes.

- *Etapa 3: Operação de crossover*

O operador de crossover combina o par de indivíduos escolhidos cruzando-os a fim de gerarem um descendente. Este operador combinará as características dos dois cromossomas, seleccionados na etapa 2, para formar um descendente. É esperado que dois bons cromossomas gerem um cromossoma com ainda melhores qualidades. No algoritmo genético optou-se por implementar o “extended intermediate crossover” [9]. Este crossover actua do seguinte modo:

Se $C_1 = (c_1^1, c_2^1, c_3^1, c_4^1, c_5^1, c_6^1)$ e $C_2 = (c_1^2, c_2^2, c_3^2, c_4^2, c_5^2, c_6^2)$ são os dois cromossomas que foram escolhidos para a aplicação do operador de crossover, então o descendente é gerado de acordo com a equação (4):

$$O_i = \lambda_i \times c_i^1 + (1 - \lambda_i) \times c_i^2 \quad (4)$$

onde, o valor de λ_i é escolhido aleatoriamente no intervalo $[-0,2; 1,2]$.

- *Etapa 4: Mutação*

O cromossoma gerado na etapa 3 pode sofrer mutação. O operador de mutação muda aleatoriamente um dos genes do cromossoma seleccionado. No algoritmo genético desenvolvido definiu-se que a probabilidade de mutação era de 5%. Isto quer dizer que o

cromossoma formado na etapa anterior tem uma probabilidade de 5% de sofrer mutação. Se um cromossoma é seleccionado para sofrer mutação, um dos seus genes é seleccionado aleatoriamente e o seu valor sofre um incremento ou decréscimo, com a mesma probabilidade, de 10%.

- *Etapa 5: Substituição da população*

As etapas 2, 3 e 4 são repetidas até que sejam gerados 73 descendentes. Estes 73 descendentes serão adicionados aos dois melhores indivíduos da população anterior para formar uma nova população. Esta nova população substitui a população anterior e o processo é repetido até que um dado número de gerações seja alcançado.

O algoritmo genético, apresentado anteriormente, foi implementado recorrendo à linguagem de programação Visual Basic 6.0 ©.

Na figura 8 apresenta-se a interface do modelo de optimização das cargas a impor aos centros de trabalho de um shop-floor.

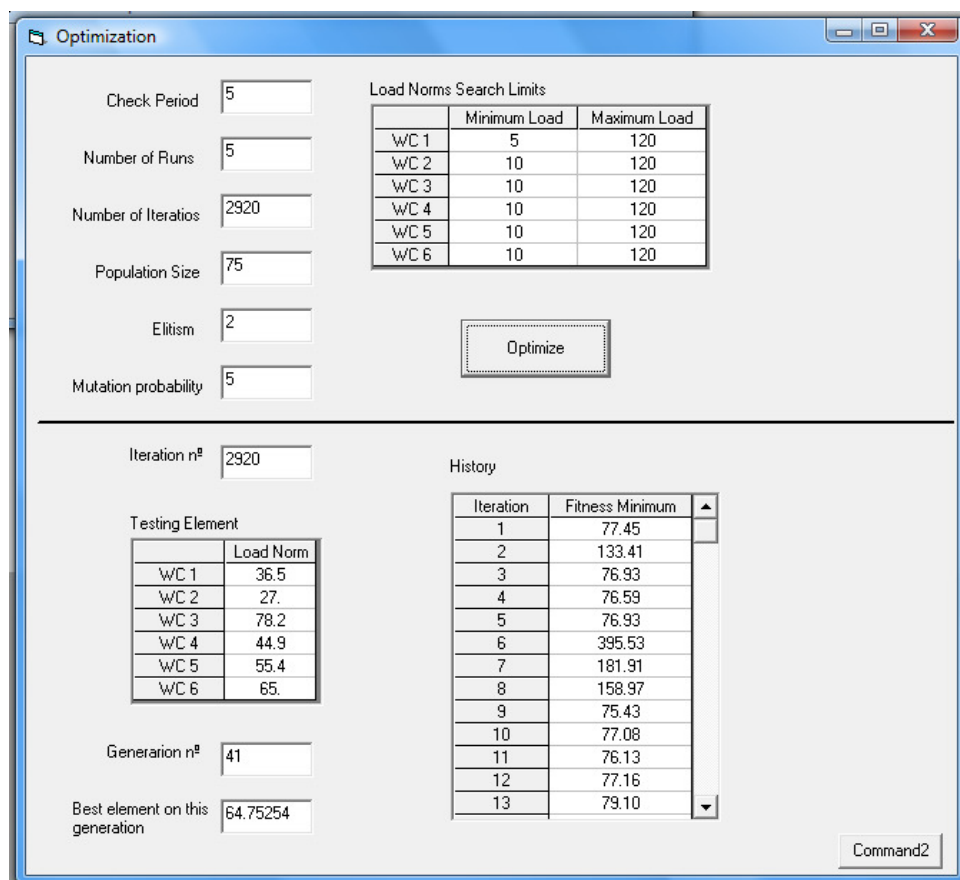


Figura 8. Interface do optimizador desenvolvido em Visual Basic 6.0 ©.

Em seguida, proceder-se-á a uma breve explicação do modo de funcionamento do modelo de optimização desenvolvido segundo a meta-heurística dos algoritmos genéticos, ver figura 8.

Os valores das variáveis de entrada: instante de lançamento das ordens de fabrico (“Check Period”), número de corridas (“Number of Runs”), número de iterações (“Number of Iterations”), tamanho da população (“Population Size”), elitismo (“Elitism”), probabilidade de mutação (“Mutation probability”) e os limites das cargas de pesquisa dos centros de trabalho (“Load Norms Search Limits”) são definidos pelo utilizador. Posteriormente, procede-se ao processo de optimização (“Optimize”). O processo de optimização tem a duração do número de iterações (que é igual à multiplicação do número de populações geradas e o tamanho da população), cujo valor é definido pelo utilizador.

As variáveis de saída decorrentes do processo de optimização são: o número da iteração que está a ser executada (“Iteration n^o”), as cargas impostas aos centros de trabalho nessa iteração (“Testing Element”), o número da população gerada (“Generation n^o”), o melhor elemento gerado da população (“Best element on this generation”) e uma tabela com o valor do fitness mínimo obtido em cada iteração (“Fitness Minimum”). Os elementos gerados de cada população são guardados num documento de texto, possibilitando a posterior análise dos resultados decorrentes da geração das várias populações.

Capítulo 6

6. Resultados

Os dois softwares anteriormente descritos foram combinados, tendo-se obtido os resultados que se apresentam em seguida.

O primeiro passo no desenvolvimento do algoritmo genético consiste na geração de uma população inicial composta por 75 indivíduos.

A partir da população inicial gerada, iniciou-se o processo iterativo do algoritmo genético, descrito anteriormente, sendo realizadas no mínimo 40 gerações de novas populações.

Para as experiências realizadas para o job-shop puro e para o job-shop com fluxo dominante, forem utilizados os seguintes parâmetros na otimização da população inicial:

Experiência	Job-shop puro		Job-shop com fluxo dominante	
	1	2	1	2
Período de lançamento	5 unidades de tempo	5 unidades de tempo	5 unidades de tempo	5 unidades de tempo
Número de corridas	5	5	5	5
Dimensão da população	75	75	75	75
Elitismo	2	2	2	2
Mutação	5 %	5 %	5 %	5 %
Intervalo das cargas de WC 1	[10; 120]	[10; 120]	[10; 120]	[5; 120]
Intervalo das cargas de WC 2, WC 3, WC4, WC 5 e WC 6	[10; 120]	[10; 120]	[10; 120]	[10; 120]

Tabela 4. Parâmetros de otimização.

As figuras 9 e 10 representam o fitness médio e o fitness mínimo que foram alcançados em cada uma das gerações para o job-shop puro. Analisando os dois gráficos, podemos constatar que o algoritmo genético começa o processo iterativo com uma população em que o fitness médio é igual a 117,32 e 120,58, respectivamente para a primeira e segunda experiência, e um fitness mínimo de 68,7 e de 67,6. A partir das figuras 9 e 10 podemos constatar que ao longo do número de gerações, a qualidade da população gerada aumenta. Na última geração foi alcançado um fitness médio de 72,43 e 71,17, respectivamente para a primeira e segunda experiência. O melhor cromossoma obtido no final do processo iterativo nas duas experiências para o job-shop puro está apresentado na tabela 5.

As figuras 11 e 12, por seu lado, representam o fitness médio e o fitness mínimo que foram alcançados em cada uma das gerações para o job-shop com fluxo dominante. Analisando os dois gráficos, podemos constatar que o algoritmo genético começa o processo iterativo com uma população em que o fitness médio é igual a 120,58 e 134,07, respectivamente para a primeira e segunda experiência, e um fitness mínimo de 65 e de 70,9. A partir das figuras 11 e 12 podemos constatar que ao longo do número de gerações, a qualidade da população gerada aumenta. Na última geração foi alcançado um fitness médio de 68,58 e 72,74, respectivamente para a primeira e segunda experiência. O melhor cromossoma obtido no final do processo iterativo nas duas experiências para o job-shop com fluxo dominante está apresentado na tabela 5.

Analisando os valores dos genes obtidos nas sucessivas gerações das populações para o job-shop com fluxo dominante, conclui-se que na primeira experiência o gene do centro de trabalho 1 é igual ao limite mínimo (10 unidades de tempo) a partir da geração número 25. Portanto, conclui-se que o limite mínimo que se deveria impor deveria ser menor que 10 unidades de tempo. Portanto, na segunda experiência optou-se por reduzir o limite mínimo do centro de trabalho 1 para o mesmo valor do período de lançamento.

	Experiência	Gene						Fitness
		1	2	3	4	5	6	
Job-shop puro	1	80,7	34,6	55,5	36,8	29,7	38,9	67,6
	2	54,9	31,8	39,3	31	88,7	30	67,6
Job-shop com fluxo dominante	1	10	12	42,1	45,8	36,1	51,7	64,7
	2	5	13,5	81,4	52,7	59,4	63,4	64,5

Tabela 5. Melhor cromossoma da última geração obtida nas duas experiências para o job-shop puro e para o job-shop com fluxo dominante.

Analisando as figuras 9, 10, 11 e 12 pode-se constatar que enquanto que na população inicial existe uma elevada variabilidade entre os valores da população em cada um dos genes, na população obtida no final do processo iterativo todos os elementos da população em cada um dos genes tendem para o mesmo valor. Portanto, quando os valores de um gene tendem para uma gama apertada de valores, nas gerações seguintes cruzando quaisquer dois elementos da população, não se consegue obter uma solução com um fitness menor que o obtido anteriormente. Esta situação acontece no caso das experiências realizadas para o job-shop puro e para o job-shop com fluxo dominante. Nas experiências realizadas, a variação do fitness mínimo é mínima, sendo que no caso da segunda experiência para o job-shop puro não existe alteração do valor do fitness mínimo.

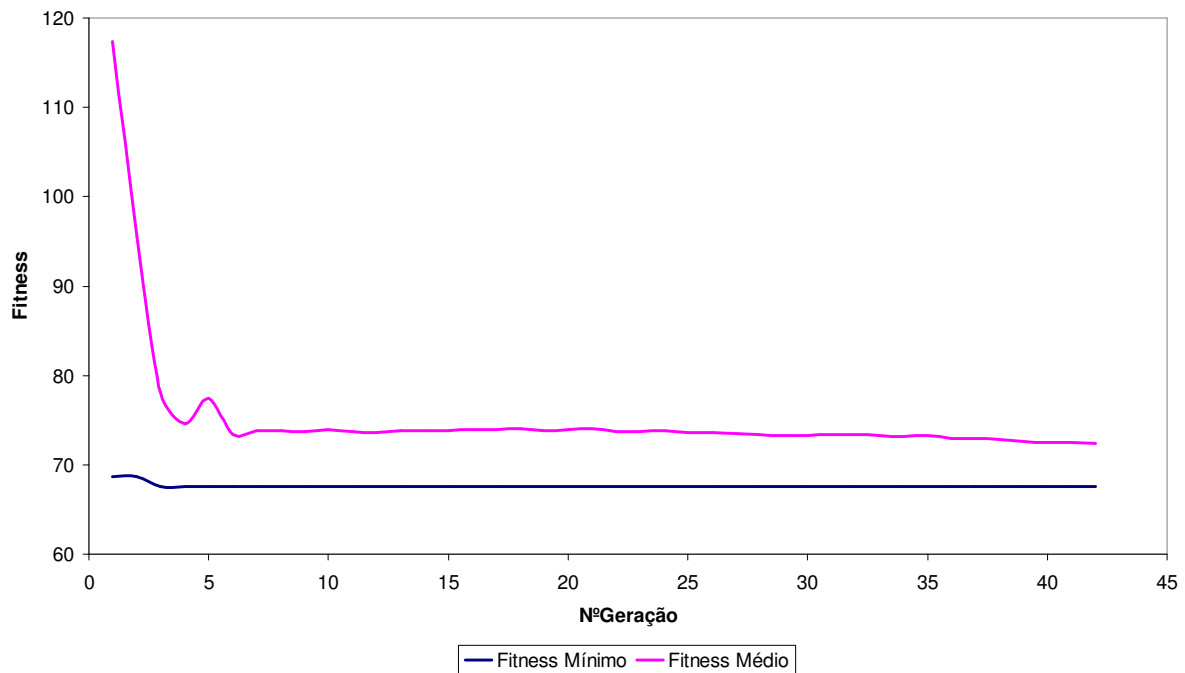


Figura 9. Melhor fitness e fitness médio de cada geração para o job-shop puro, experiência 1.

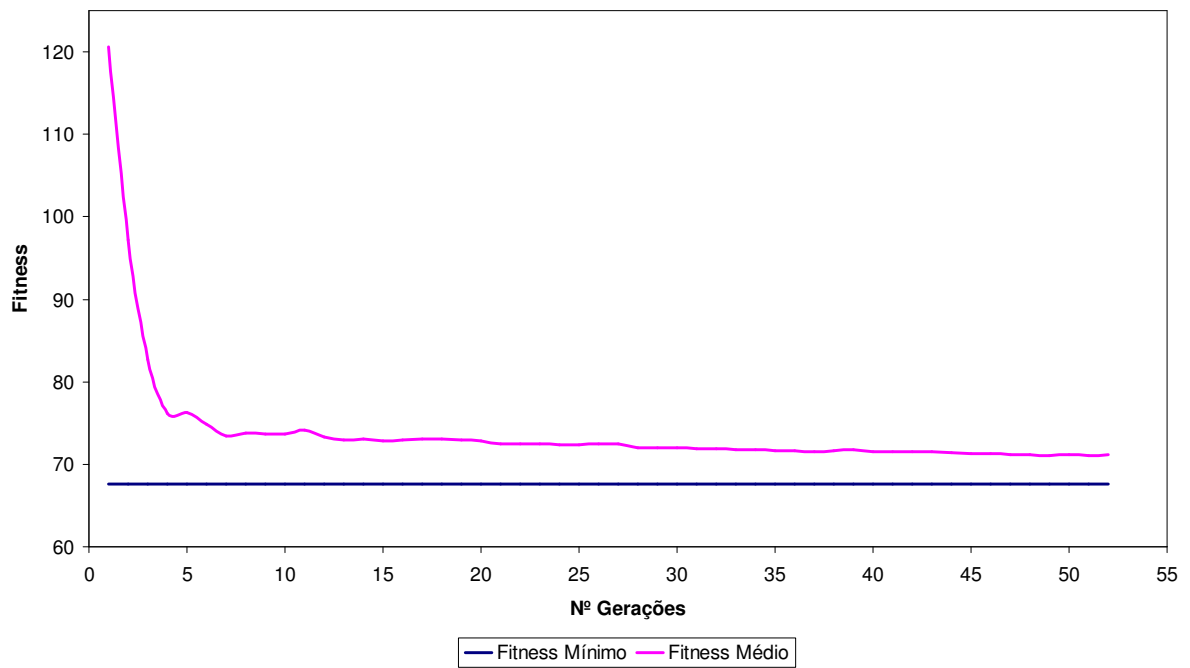


Figura 10. Melhor fitness e fitness médio de cada geração para o job-shop puro, experiência 2.

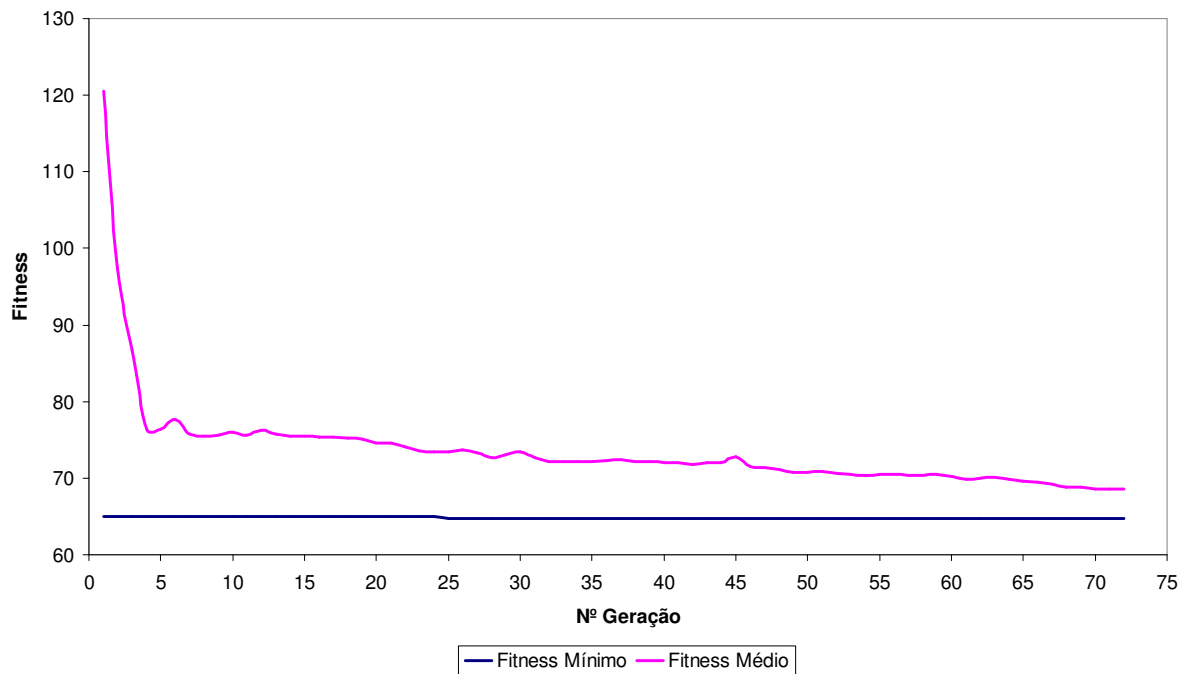


Figura 11. Melhor fitness e fitness médio de cada geração para o job-shop com fluxo dominante, experiência 1.

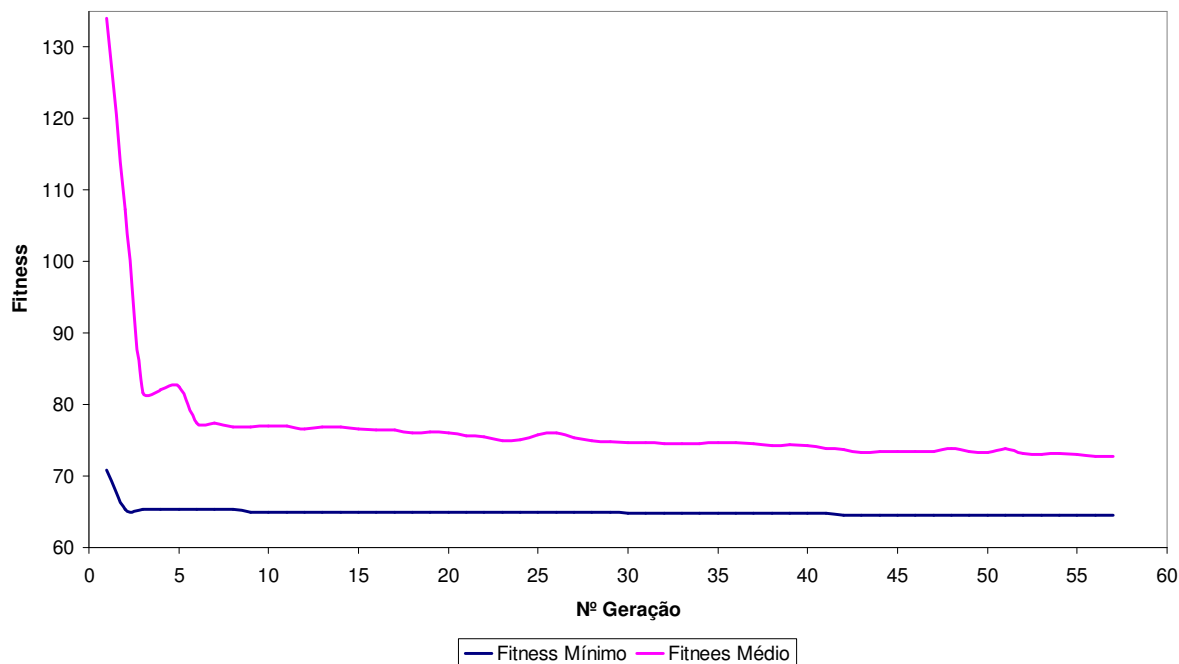


Figura 12. Melhor fitness e fitness médio de cada geração para o job-shop com fluxo dominante, experiência 2.

No job-shop puro espera-se que as cargas em todos os centros de trabalho sejam da mesma ordem de grandeza. Como se pode verificar a partir da análise dos resultados preliminares obtidos para o job-shop puro, existe uma grande dispersão das cargas para os vários postos de trabalho, o que permite inferir que a meta-heurística tal como está formulada pode não ser a mais apropriada para a determinação das cargas a aplicar aos centros de trabalho de um shop-floor puro.

No job-shop com fluxo dominante espera-se que as cargas a impor aos centros de trabalho tenha uma variação crescente desde o centro de trabalho um até ao sexto. Como se pode verificar a partir da análise dos resultados preliminares obtidos para o job-shop com fluxo dominante, não existe uma variação crescente das cargas desde o centro de trabalho um até ao sexto, o que também permite inferir que a meta-heurística tal como está formulada pode não ser a mais apropriada para a determinação das cargas a aplicar aos centros de trabalho de um shop-floor com fluxo dominante.

É ainda de notar que a meta-heurística desenvolvida, apesar de promover uma melhoria acentuada do fitness médio, não consegue melhorar significativamente o fitness do melhor elemento de cada geração (fitness mínimo).

Capítulo 7

7. Discussão dos resultados

Os resultados apresentados no capítulo anterior demonstram que a metodologia proposta para a resolução do problema em causa neste trabalho não é a mais adequada. Com efeito, verifica-se que apesar de haver uma melhoria da população de geração para geração, a solução óptima (fitness mínimo) não sofre melhorias significativas ao longo do processo iterativo quando comparada com a melhor solução obtida aleatoriamente na população inicial.

Após a análise dos primeiros resultados obtidos com a meta-heurística dos algoritmos genéticos, decidiu-se “suspender” o processo de optimização, de maneira a tentar perceber o porquê de tais resultados.

De forma a perceber o porquê de tais resultados, foi realizada uma revisão bibliográfica mais aprofundada das várias metodologias que combinam simulação e optimização. Dessa pesquisa, concluiu-se que o problema que se estava a verificar se devia a não se considerar no algoritmo genético a natureza estocástica do simulador. Isto quer dizer que, quando se comparavam duas soluções, utilizava-se a média dos fitness do conjunto de corridas realizadas. No entanto, essas médias não representam o valor exacto do fitness, mas sim uma estimativa desse valor. Por exemplo, considerando duas soluções, uma com um fitness igual a 20 e outra com fitness igual a 18, poderíamos afirmar que a melhor solução seria a que tem um fitness de 18, mas tal afirmação pode não ser correcta, visto que se os intervalos de confiança (com uma certeza de 95%) forem coincidentes, nada se pode concluir sobre qual das soluções é a melhor.

Um resumo das principais dificuldades da simulação/optimização, quando se utilizam simuladores de eventos discretos, é dado por Banks et al. (2000):

“Mesmo quando não há nenhuma incerteza, a optimização pode ser muito difícil se o número de variáveis for elevado, se o problema conter diversos tipos de variáveis e se pouco se sabe sobre a estrutura da função de desempenho. A optimização via simulação apresenta

uma dificuldade adicional, porque o desempenho de um determinado modelo não pode ser avaliado com exactidão, tendo de ser estimado. Como são obtidas estimativas, pode não ser possível determinar com certeza, se um modelo é melhor do que outro, podendo os algoritmos de optimização falhar na tentativa de pesquisa de melhores direcções, de forma a serem obtidas melhores soluções. Em princípio, pode-se eliminar esta dificuldade realizando tantas simulações do modelo, ou corridas mais longas, em cada ponto do modelo, de modo a que a estimativa do desempenho não apresentará nenhuma variação. Na prática, isto poderia significar que serão exploradas poucas alternativas de modelos, devido ao tempo necessário para simular cada um deles.”

A metodologia de optimização seguida, apresentada na figura 5, pode ser dividida em duas partes distintas:

- (1) Geração de soluções candidatas;
- (2) Avaliação das soluções.

A metodologia seguida, que como se verificou não conduziu aos resultados esperados, concentra-se essencialmente no passo (1).

O simulador é tratado essencialmente como um gerador da função objectivo, considerando-se que o valor gerado é determinístico. Esta abordagem será adequada para alguns tipos de simulação, por exemplo, simulação por elementos finitos, onde o mesmo conjunto de parâmetros de entrada gera sempre a mesma solução. Quando se utilizam simuladores por eventos discretos, como no nosso caso, a metodologia de optimização deve ser revista, considerando a natureza estocástica da solução, conforme se pode ver na figura 13. Note-se que a diferença entre a abordagem apresentada nos capítulos anteriores e a abordagem da figura 13, se encontra na saída do simulador que não é vista como o valor da função objectivo, mas sim como uma estimativa desse valor.

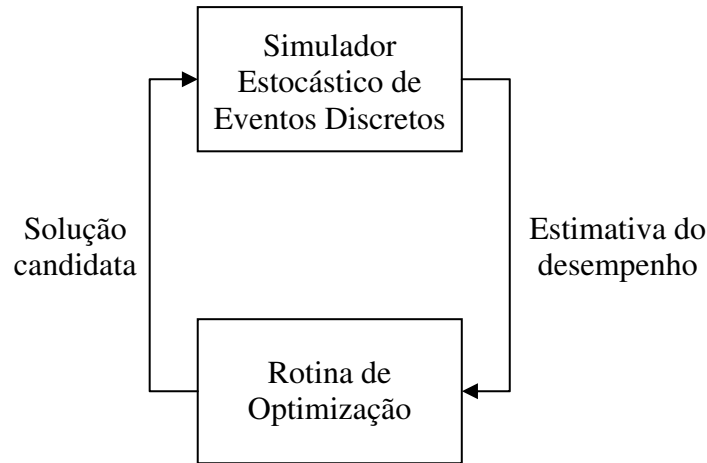


Figura 13. Otimização para simulação: perspectiva prática [2].

Este novo modelo de otimização para simulação pode ser dividido em duas partes:

- (1) Processo iterativo mas integrado, de pesquisa e comparação, de forma a encontrar a solução ótima (θ^*);
- (2) Estimar o valor ótimo da função objectivo, $j(\theta^*)$.

Neste modelo, a maior parte do tempo de optimização é dispendido na estimativa de $j(\theta)$ para valores de θ , o que é o inverso da configuração determinística, na qual a pesquisa do valor ótimo é o que depende maior tempo de optimização.

Esta nova abordagem levanta problemas complexos de estatística, que não poderiam ser resolvidos no tempo disponível para este trabalho de tese.

A revisão bibliográfica mais aprofundada acerca da combinação entre simulação e optimização permitiu encontrar um conjunto de optimizadores comerciais para simulação, que se encontram listados na tabela 6.

Analisando a tabela 6, pode-se verificar que o software de optimização OptQuest é utilizado pela maioria dos fabricantes de softwares de simulação. Uma vez que o simulador realizado até ao momento foi realizado em SIMUL8 ©, optou-se por recorrer ao OptQuest, que é um plug-in do SIMUL8 ©.

Optimizador	Tecnologia	Software de Simulação
OptQuest	Scatter Search	Any Logic Arena Crystal Ball CSIM19 Enterprise Dynamics Micro Saint ProModel Quest SimFlex SIMPROCESS SIMUL8 TERAS
Evolutionary Optimizer	Algoritmos Genéticos	Extend
Evolver	Algoritmos Genéticos	@Risk
AutoStat	Evolution Strategies	AutoMod

Tabela 6. Implementações de simuladores/otimizadores.

Como o otimizador utilizado, recorrendo à meta-heurística dos algoritmos genéticos, não nos permitiu obter os resultados esperados, houve uma redefinição dos objectivos deste trabalho de tese. O novo objectivo deste trabalho de tese passou a ser verificar a aplicabilidade do OptQuest ao problema em análise.

Capítulo 8

8. Optimizador OptQuest

O software OptQuest, desenvolvido pela OptTek, é reconhecido em todo o mercado de simulação e optimização pela sua qualidade, velocidade e serviços aos clientes. As avaliações externas do software demonstram que a meta-heurística utilizada produz soluções com maior rapidez e com maior qualidade, quando comparada com outros métodos de optimização disponíveis no mercado. O software integra processos de meta-heurísticas já conhecidas, incluindo a “Tabu Search”, “Neural Networks” e “Scatter Search”, num único método. Porém, é utilizada principalmente a metodologia “Scatter Search”. Este software foi desenvolvido por Glover, Kelly e Laguna (1996). Algumas das diferenças entre os métodos da OptTek e outros métodos, incluem:

- A capacidade de evitar a paragem da pesquisa de uma melhor solução óptima, no caso de serem encontrados mínimos ou máximos locais em problemas que não são lineares (situação que acontece na maioria dos casos reais).
- A habilidade para lidar com relações de descontinuidades e de não linearidade, que não são especificamente definidos pelas fórmulas e equações que são utilizadas na programação normal de formulações matemáticas.
- A capacidade de resolver problemas que envolvem incertezas, tais como as decorrentes de fornecimentos incertos, pedidos de encomendas, preços, custos, taxas de fluxos, taxas de fila de espera e muitos outros.
- A capacidade de resolver problemas de apoio à decisão de sistemas complexos.

Enquanto outros métodos que são aplicados actualmente em ambientes complexos e altamente incertos, tanto identificam soluções viáveis, como soluções óptimas de mínimos ou máximos locais.

Os métodos da OptTek, que são bem conhecidos, tanto nas comunidades da simulação, como da optimização, são baseadas na contribuição do professor Fred Glover, um

dos fundadores da OptTek e o vencedor do prêmio Von Neumann Theory em investigação operacional, que desenvolveu o método de memória adaptativa chamado “Tabu Search”, e o método evolucionário chamado “Scatter Search”, que é uma excelente técnica de pesquisa em otimização global.

O modelo utilizado pelo otimizador OptQuest, trata o avaliador da função objectiva como uma “caixa negra”, como descrito na figura 13.

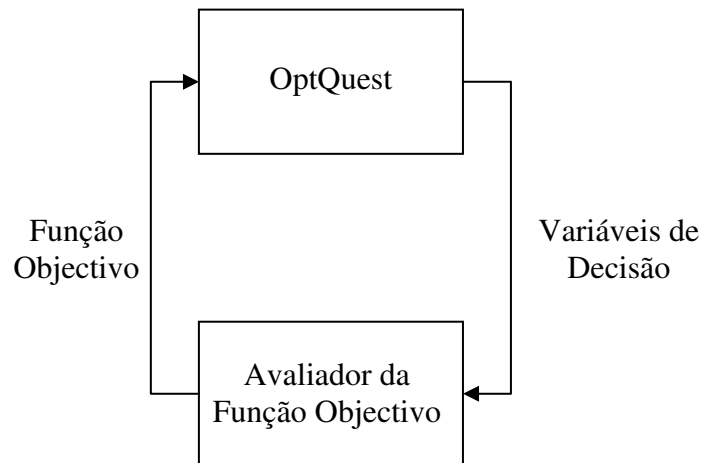


Figura 14. Modelo da caixa negra do OptQuest.

O modelo da “caixa negra”, representado na figura 14, ilustra que a meta-heurística de pesquisa dos valores óptimos das variáveis de decisão não é conhecida, não se sabendo portanto o modo como o valor da função objectiva é calculado. No entanto, o valor da função objectiva, juntamente com outras estratégias, é utilizado para orientar a pesquisa na procura de melhores soluções.

A metodologia de “Scatter Search” opera sobre um conjunto de soluções, conjunto de referência, combinando estas soluções para criar novas soluções. Quando o principal mecanismo para combinar soluções é tal que uma nova solução é criada a partir da combinação linear de duas outras soluções, o conjunto de referência poderá evoluir conforme ilustrado na Figura 15. Esta figura pressupõe que o conjunto de referência original de soluções consiste nos círculos marcados como A, B, e C. Após uma combinação não convexa das soluções de referência A e B, a solução 1 é criada. Mais precisamente, uma série de soluções no segmento de recta definido por A e B são criados. Porém, a solução 1 é a única que é introduzida no conjunto de referência. De uma forma semelhante, as combinações

convexas e não convexas do conjunto de referência inicial e das soluções de referência criadas ao longo de todo o processo dão origem aos pontos 2, 3 e 4.

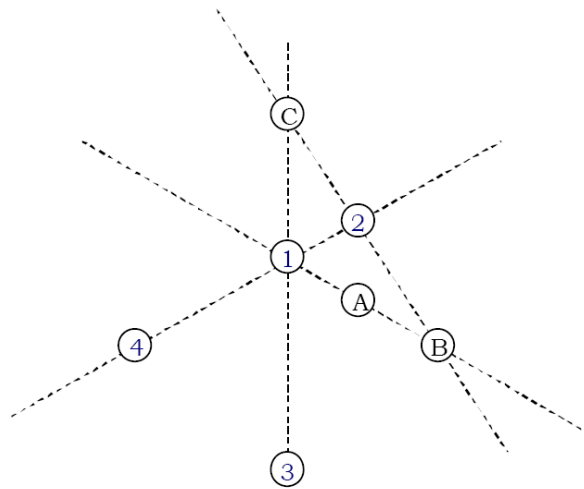


Figura 15. Conjunto de referência a duas dimensões [13].

O software do modelo de simulação calcula o valor da função objectivo tendo em conta as variáveis de entrada (variáveis de decisão). O OptQuest em função do valor da função objectivo define novos valores de entrada e volta a calcular o valor da função objectivo. Este ciclo é executado tantas vezes quantas as definidas pelo utilizador, tendo os factores de entrada iniciais influência na rapidez de convergência para o valor óptimo pretendido.

Nas figuras 16, 17, 18, 19 e 20 apresentam-se as interfaces de todos os passos que têm de ser executados para ser executado o optimizador OptQuest. Na figura 21 apresenta-se, como exemplo, a interface com os resultados obtidos a partir do optimizador OptQuest.

O primeiro passo a realizar é a definição das variáveis de decisão, ver figura 16. Após a sua definição, definem-se os limites inferiores e superiores de pesquisa que serão utilizados durante o processo de optimização. São igualmente definidos os valores da solução de partida das variáveis de decisão.

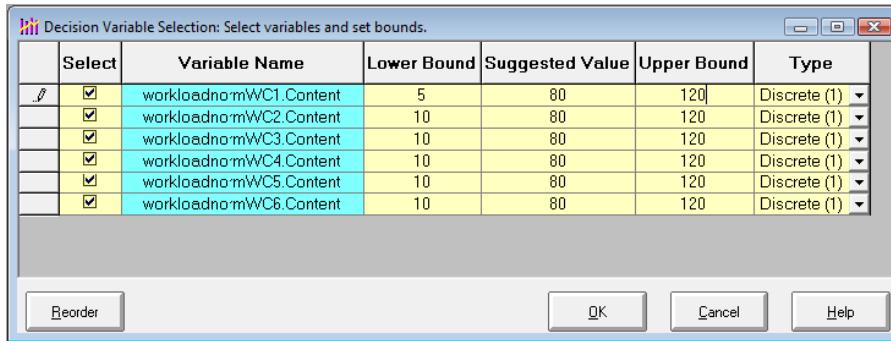


Figura 16. Definição das variáveis de decisão no otimizador OptQuest.

O segundo passo é a definição das restrições do problema em análise, ver figura 17. No problema em análise, não existem nenhuma restrições a aplicar.

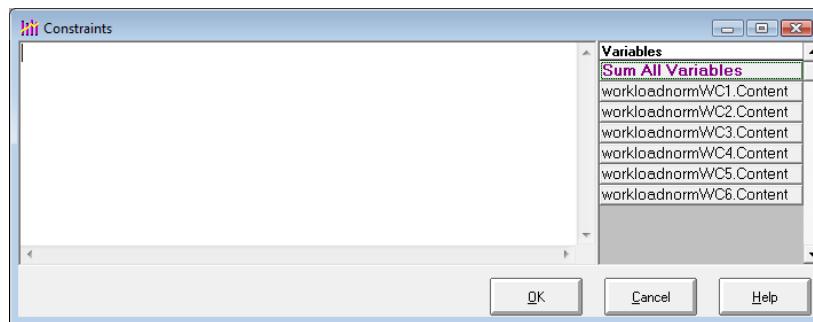


Figura 17. Definição das restrições no otimizador OptQuest.

O terceiro passo é a definição do objectivo da optimização que será realizada, ver figura 18. O objectivo do problema em análise é a minimização do valor da função objectivo.

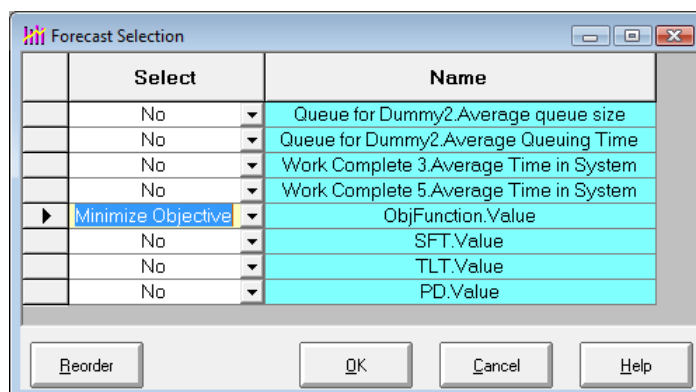


Figura 18. Definição do objectivo do otimizador OptQuest.

O quarto passo é a definição do número de simulações e o número de corridas a realizar por cada simulação, a serem realizadas no processo de optimização, ver figuras 19 e 20. O número de simulações e o número de corridas a realizar são definidas pelo utilizador.

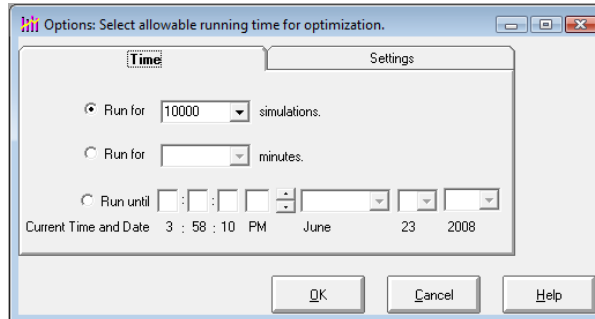


Figura 19. Definição do número de simulações a serem realizadas pelo optimizador OptQuest.

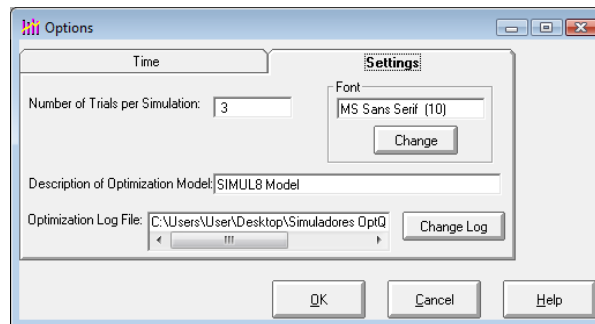


Figura 20. Definição do número de corridas a serem realizadas por simulação pelo optimizador OptQuest.

Finalizado o processo de optimização, procede-se à recolha dos dados obtidos, ver figura 21. Os dados obtidos pelo processo de optimização são as cargas impostas aos centros de trabalho, o respectivo valor da função objectivo e o número da simulação em que foi alcançado o valor da função objectivo correspondente.

Simulation	Minimize ObjFunction.Value	workloadnorm WC1.Content	workloadnorm WC2.Content	workloadnorm WC3.Content	workloadnorm WC4.Content	workloadnorm WC5.Content	workloadnorm WC6.Content
1	104.611	80	80	80	80	80	80
Best: 2	103.488	63	65	65	65	65	65
▶ Current: 3	2461.81	5	10	10	10	10	10

Figura 21. Resultados obtidos a partir do optimizador OptQuest.

Capítulo 9

9. Resultados finais

Os resultados finais, que irão ser apresentados em seguida, foram obtidos por recurso ao otimizador OptQuest.

Nas experiências realizadas, tanto para o modelo de job-shop puro, como para o modelo de job-shop com fluxo dominante, considerou-se um tempo de warm-up³ de 1500 minutos e um tempo de recolha de resultados de 4000 minutos.

Os resultados que se obtiveram para os dois modelos em análise, encontram-se ilustrados nas tabelas 7 e 8.

Analisando os resultados obtidos, pode-se concluir que a carga imposta inicialmente aos postos de trabalho no início da optimização, pode levar a uma maior ou menor rapidez na convergência para o valor óptimo da carga. O aumento do número de corridas a realizar em cada simulação (“trial”), não implica uma maior rapidez na convergência para a solução óptima, mas induz a que a amplitude de variação dos intervalos de confiança diminuam, o que permite inferir que existe uma menor variabilidade (maior precisão) das cargas.

³ Tempo necessário para as medidas do sistema em análise atingir um regime representativo estável. Durante este tempo não são recolhidas estatísticas das medidas do sistema em análise.

Experiência	1	2	3	4	
Trial	3	3	6	6	
Carga WC1 [Min; Máx]	[10; 120]	[10; 120]	[10; 120]	[10; 120]	
Carga WC2 [Min; Máx]	[10; 120]	[10; 120]	[10; 120]	[10; 120]	
Carga WC3 [Min; Máx]	[10; 120]	[10; 120]	[10; 120]	[10; 120]	
Carga WC4 [Min; Máx]	[10; 120]	[10; 120]	[10; 120]	[10; 120]	
Carga WC5 [Min; Máx]	[10; 120]	[10; 120]	[10; 120]	[10; 120]	
Carga WC6 [Min; Máx]	[10; 120]	[10; 120]	[10; 120]	[10; 120]	
Carga inicial para todos os postos de trabalho	80	50	80	50	
Melhor Fitness	85,774	85,605	85,006	79,011	
Melhor Solução	WC 1	33	40	39	30
	WC 2	30	33	36	34
	WC 3	30	35	42	31
	WC 4	31	39	42	31
	WC 5	30	37	41	32
	WC 6	32	44	55	31
Simulações realizadas	10000	8800	10000	10000	
Nº da Simulação da Solução Ótima	2314	7720	4003	7700	

Tabela 7. Parâmetros e resultados obtidos nas experiências para o job-shop puro.

Experiência	1	2	3	4	5	
Trial	3	3	3	6	6	
Carga WC1 [Min; Máx]	[5; 120]	[5; 120]	[5; 120]	[5; 120]	[5; 120]	
Carga WC2 [Min; Máx]	[7; 120]	[7; 120]	[7; 120]	[7; 120]	[7; 120]	
Carga WC3 [Min; Máx]	[10; 120]	[10; 120]	[10; 120]	[10; 120]	[10; 120]	
Carga WC4 [Min; Máx]	[10; 120]	[10; 120]	[10; 120]	[10; 120]	[10; 120]	
Carga WC5 [Min; Máx]	[10; 120]	[10; 120]	[10; 120]	[10; 120]	[10; 120]	
Carga WC6 [Min; Máx]	[10; 120]	[10; 120]	[10; 120]	[10; 120]	[10; 120]	
Carga inicial para todos os postos de trabalho	80	80	50	50	80	
Melhor Fitness	57,183	57,183	59,179	58,218	58,093	
Melhor Solução	WC 1	5	5	5	5	
	WC 2	10	10	11	13	13
	WC 3	20	20	119	17	21
	WC 4	26	26	28	26	26
	WC 5	34	34	30	29	31
	WC 6	43	43	61	67	59
Simulações realizadas	10000	3750	10000	8200	10000	
Nº da Simulação da Solução Ótima	2517	2517	7378	7767	4624	

Tabela 8. Parâmetros e resultados obtidos nas experiências para o job-shop com fluxo dominante.

As figuras 22, 23, 24 e 25 mostram a evolução do valor da função objectivo com o número de simulações realizadas para o job-shop puro. Analisando os resultados obtidos conclui-se que as cargas a impor aos centros de trabalho têm a mesma ordem de grandeza, podendo ser adoptadas as cargas de 35, 35, 35, 35, 35 e 35, respectivamente para os centros de trabalho 1, 2, 3, 4, 5 e 6.

As figuras 26, 27, 28, 29 e 30 mostram a evolução do valor da função objectivo com o número de simulações realizadas para o job-shop com fluxo dominante. Analisando os resultados obtidos conclui-se que as cargas a impor aos centros de trabalho têm uma variação crescente, podendo ser adoptadas as cargas de 5, 11, 20, 26, 33 e 50, respectivamente para os centros de trabalho 1, 2, 3, 4, 5 e 6.

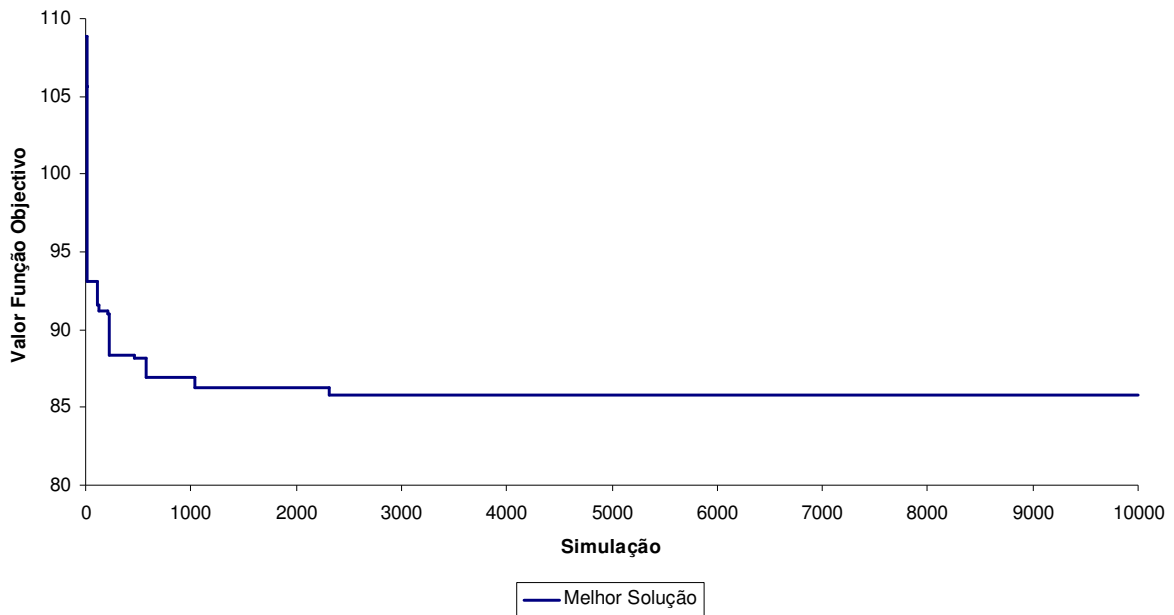


Figura 22. Experiência 1 do modelo de job-shop puro.

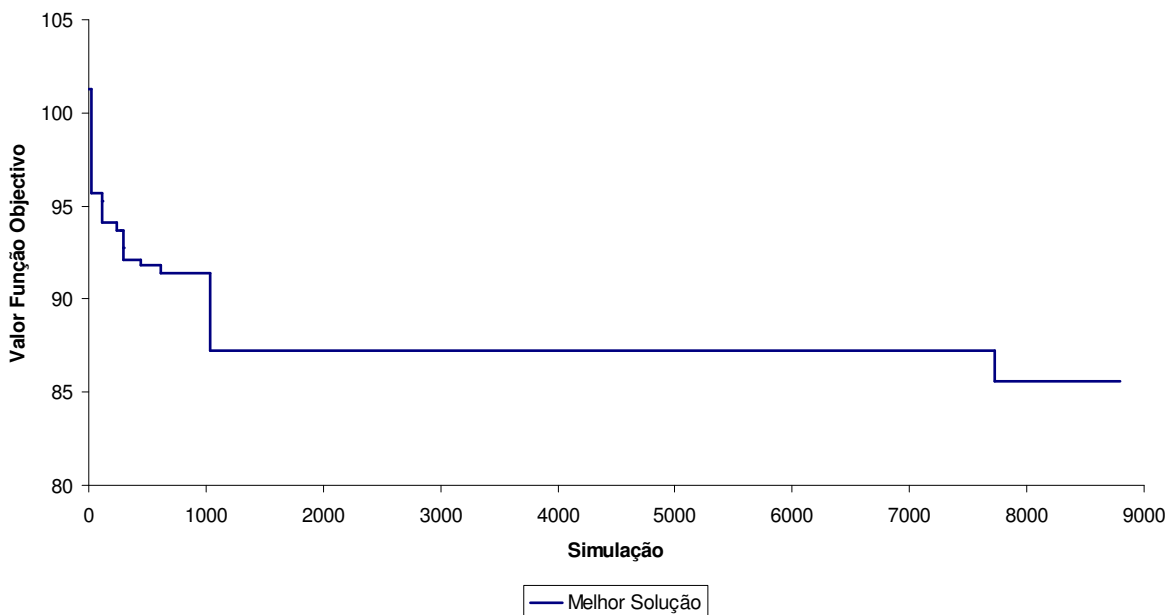


Figura 23. Experiência 2 do modelo de job-shop puro.

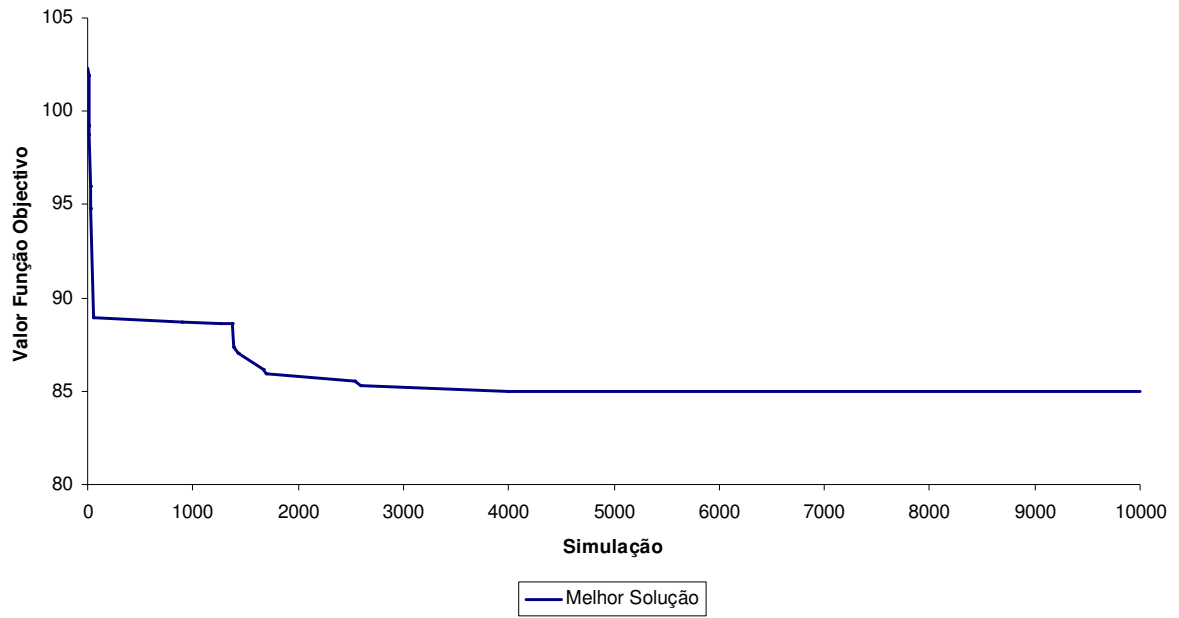


Figura 24. Experiência 3 do modelo de job-shop puro.

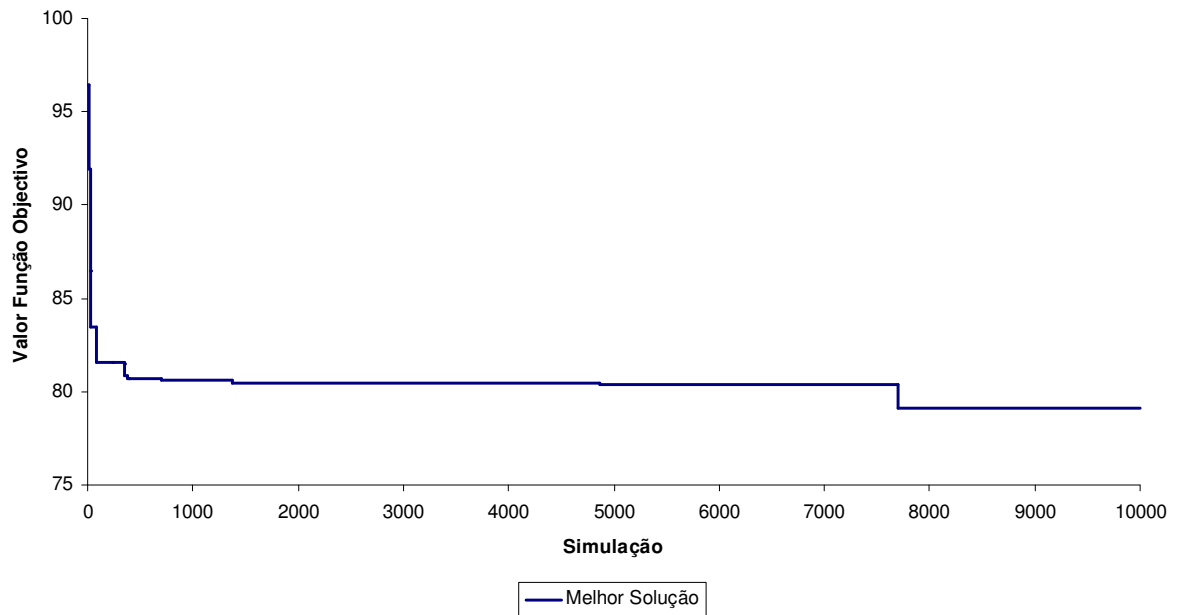


Figura 25. Experiência 4 do modelo de job-shop puro.

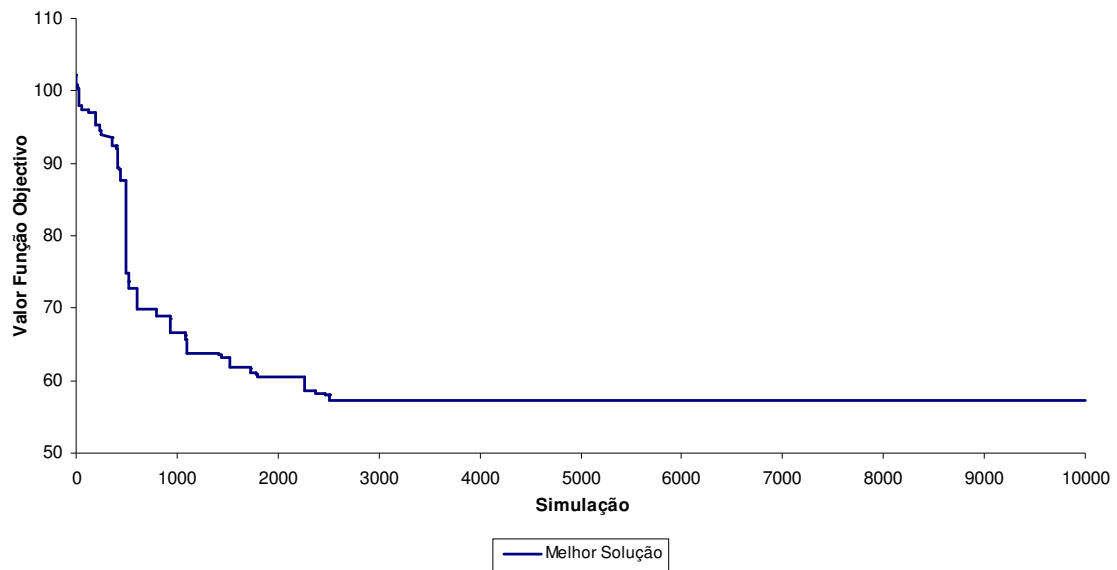


Figura 26. Experiência 1 do modelo de job-shop com fluxo dominante.

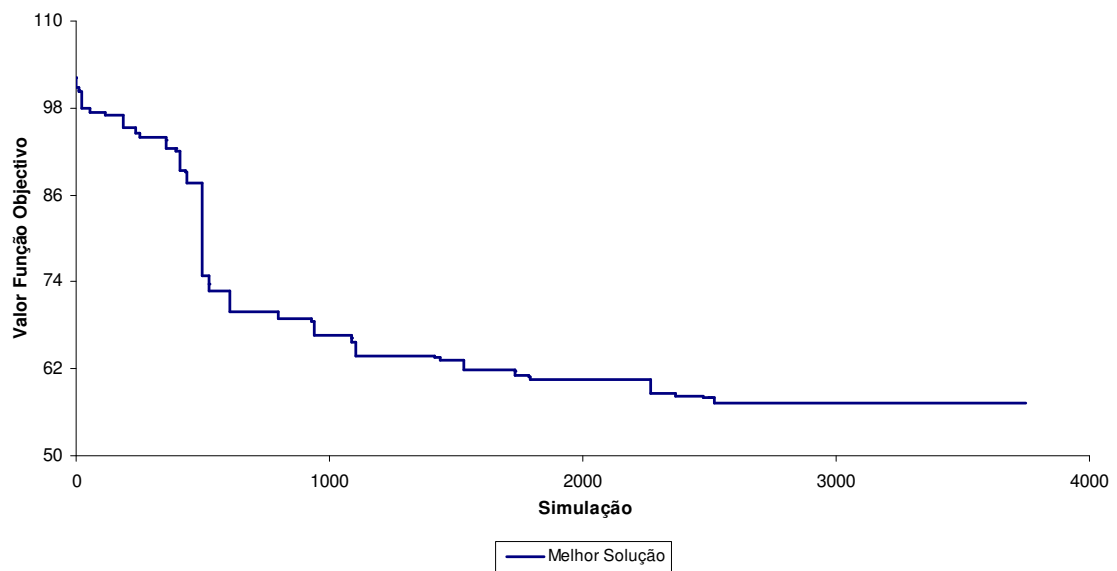


Figura 27. Experiência 2 do modelo de job-shop com fluxo dominante.

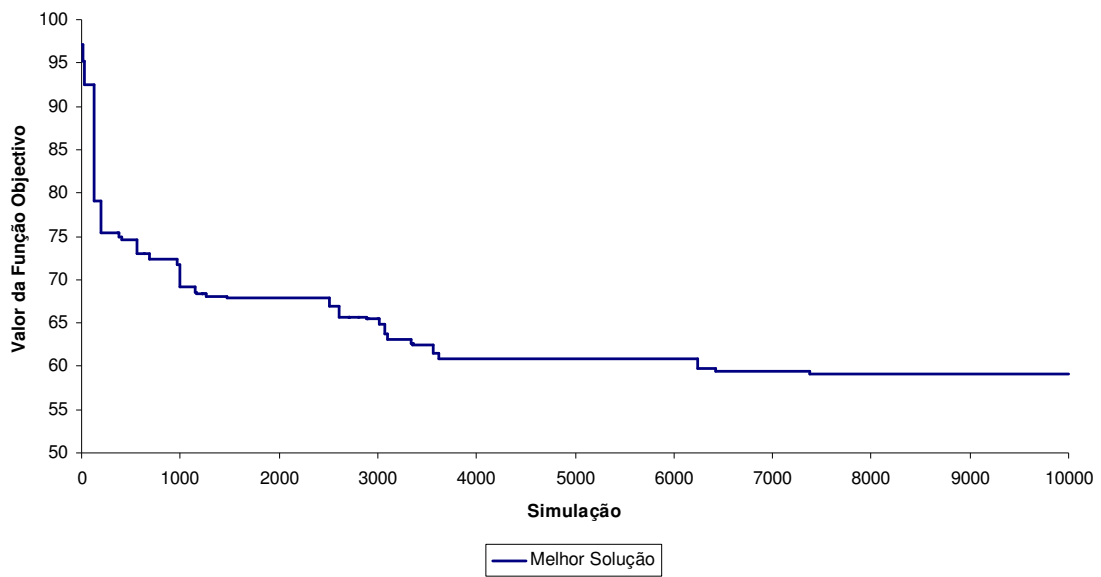


Figura 28. Experiência 3 do modelo de job-shop com fluxo dominante.

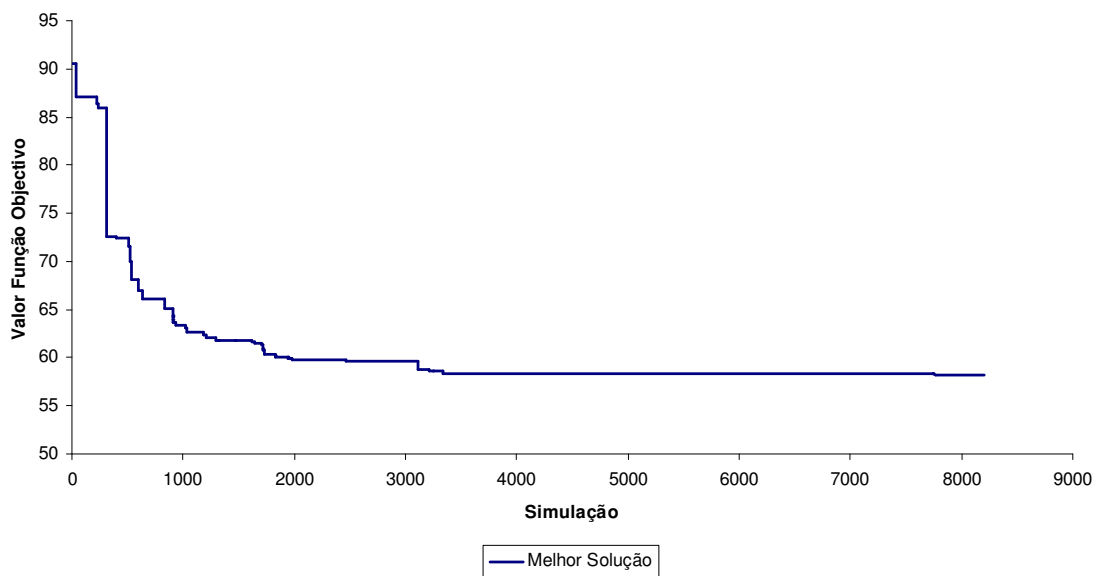


Figura 29. Experiência 4 do modelo de job-shop com fluxo dominante.

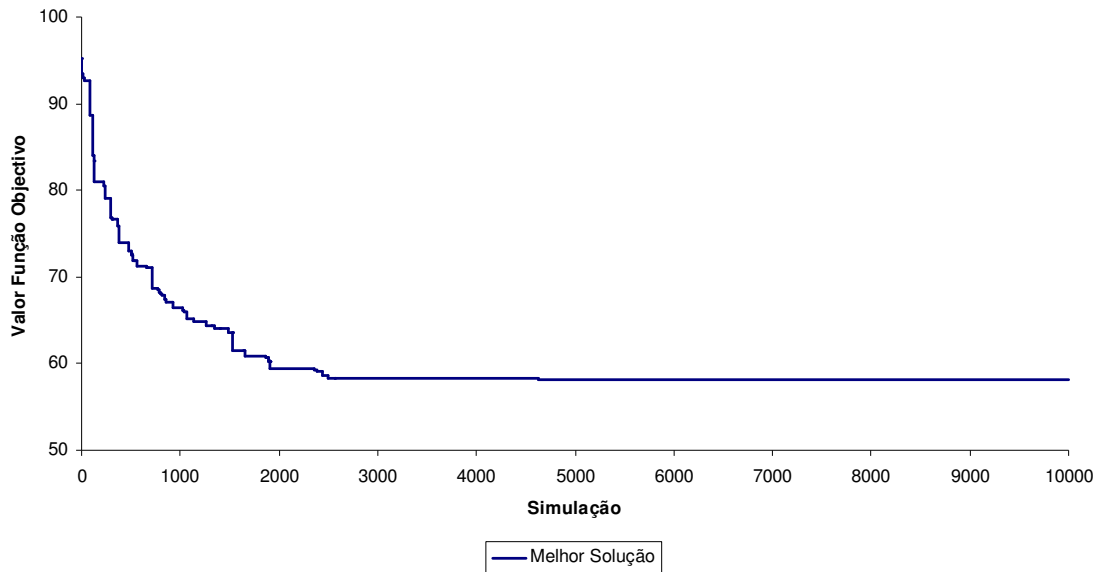


Figura 30. Experiência 5 do modelo de job-shop com fluxo dominante.

Para um job-shop puro pode-se constatar que os limites de carga de todos os centros de trabalho tendem para o mesmo valor, isto é, são todos iguais. Tal constatação é lógica, uma vez que as rotas de um job-shop puro são aleatórias.

Para um job-shop com fluxo dominante pode-se constatar que os limites de carga dos centros de trabalho têm uma variação crescente à medida que nos afastamos do ponto de lançamento, mesmo se verificando que as cargas impostas a todos os centros de trabalho na altura do lançamento não estejam fisicamente nos centros de trabalho a jusante. Tal constatação é lógica, devido ao fluxo dominante que um job-shop deste tipo apresenta.

A partir dos resultados obtidos, o optimizador OptQuest parece ser indicado para o processo de optimização do modelo de simulação desenvolvido neste trabalho. No entanto, é ainda necessário afinar o modelo de simulação, uma vez que as soluções obtidas são semelhantes, mas não são iguais (o que se esperava que acontecesse). Uma das razões para que tal aconteça pode estar na definição da função objectivo, que pode não ter sido a mais correcta para o problema em análise.

Capítulo 10

10. Conclusão final

Uma das razões que justificam o reduzido número de implementações do conceito de controlo de carga em aplicações industriais deve-se à dificuldade associada à definição das cargas a impor aos centros de trabalho. A definição das cargas aos centros de trabalho continua a ser um processo de tentativa e erro, que limita o número de cargas a impor que pode ser estudado. Além disso, o processo de tentativa e erro é um processo que ocupa bastante tempo e que pode conduzir a uma dificuldade acrescida na aceitação do conceito por parte dos gestores das empresas.

Neste trabalho é proposta uma metodologia para a obtenção de um conjunto de cargas a impor aos centros de trabalho, que optimizam um determinado critério de desempenho. Na primeira parte deste trabalho, foi desenvolvido um software, composto por um algoritmo genético que está ligado a um simulador, de forma a optimizar as cargas a impor aos centros de trabalho. Os resultados preliminares permitiram concluir que essa metodologia, recorrendo aos algoritmos genéticos, não era a metodologia mais apropriada para a optimização das cargas a impor aos centros de trabalho, uma vez que o optimizador desenvolvido não considerava a natureza estocástica do problema em análise. Os resultados finais mostram que o optimizador OptQuest é um software adequado para obter o melhor conjunto de cargas a impor aos centros de trabalho a utilizar num problema industrial, sem que para isso seja perdido muito tempo na optimização.

Portanto, para que o método seja melhor compreendido é necessário realizar um maior número de experiências variando as características do job-shop e os parâmetros de entrada, tais como a função objectivo, o número de corridas, a solução inicial, o instante de lançamento das ordens de fabrico, a capacidade dos centros de trabalho, a taxa de utilização dos centros de trabalho, a distribuição dos tempos de processamento e a distribuição do tempo entre chegada de ordens de fabrico, de forma a que o modelo de simulação/optimização seja

afinado. A afinação do modelo não foi executada neste trabalho de tese por falta de tempo, uma vez que o processo de optimização é um processo muito demorado.

Verificando como varia a solução final obtida pelo processo de optimização, face às variações dos factores referidos anteriormente, pode ser então encontrada uma relação entre a variação das características do job-shop e os limites de carga a impor aos centros de trabalho. A relação a obter, permitirá definir os limites de carga para qualquer shop-floor, sem a necessidade de realizar o processo de simulação/optimização utilizado neste trabalho. Essa relação permitirá que a implementação deste método em ambientes industriais seja rápido e eficiente.

Por último, é necessário referir que será muito importante procurar aprofundar o estudo do optimizador OptQuest. Os resultados obtidos mostram que ele pode ser utilizado com sucesso para a resolução do problema em causa, mas há, no nosso caso, muito desconhecimento sobre os princípios de optimização que são utilizados no OptQuest. O facto de estarmos a trabalhar com uma “caixa negra” poderá no futuro dificultar o desenvolvimento da investigação iniciada com este trabalho.

Referências bibliográficas

- [1] André da Motta Salles Barreto, *Uma Introdução aos Algoritmos Genéticos*.
- [2] Carlos Gomes da Silva, João Clímaco, José Figueira, 2003, *A scatter search method for the bi-criteria multi-dimensional {0,1}-knapsack problem using surrogate relaxation*.
- [3] Cristóvão Silva, 2000, *Um sistema de apoio à decisão para o planeamento da produção recorrendo ao conceito de controlo de carga*, Universidade de Coimbra, Tese de Doutoramento.
- [4] F. Herrera, M. Lozano, J. L. Verdegay, 1998, *Tackling Real-Coded Genetic Algorithms: Operators and Tools for Behavioural Analysis*, Kluwer Academic Publishers.
- [5] Fred Glover, 1999, *Scatter Search and Path Relinking*.
- [6] Fred Glover, Manuel Laguna, Rafael Martí, 2000, *Fundamentals of Scatter Search and Path Relinking*.
- [7] Fred Glover, Manuel Laguna, Rafael Martí, *Scatter Search*.
- [8] Gianluca Spina, Andrea Vinelli, Raffaella Cagliano, Matteo Kalchschmidt, Pietro Romano, Fabrizio Salvador, *One World? One View of Om? The Challenges of Integrating Research & Practice, Volume II*, SGEEditoriali Padova.
- [9] H. Mühlenbein & D. SchlierkampVoosen, 1993, *Predictive Models for the Breeder Genetic Algorithm I, Continuous Parameter Optimization*, Evolutionary Computation 1, 25–49.
- [10] J. E. Beasley, 1999, *Population heuristics*.
- [11] Jay April, Fred Glover, James Kelly, 2002, *Portfolio Optimization for Capital Investment Projects*, Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference, E. Yücesan, C.-H. Chen, J. L. Snowdon, and J. M. Charnes, eds.
- [12] Jay April, Fred Glover, James P. Kelly, Manuel Laguna, 2003, *Practical Introduction to Simulation Optimization*, Proceedings of the 2003 Winter

- Simulation Conference, S. Chick, P. J. Sánchez, D. Ferrin, and D. J. Morrice, eds.
- [13] Jay April, Marco Better, Fred Glover, James Kelly, Manuel Laguna, 2006, *Enhancing Business Process Management with Simulation Optimization*, Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference, L. F. Perrone, F. P. Wieland, J. Liu, B. G. Lawson, D. M. Nicol, and R. M. Fujimoto, eds.
- [14] Manuel Laguna, 1997, *Metaheuristic Optimization with Evolver, Genocop and OptQuest*.
- [15] Manuel Laguna, 1999, *Scatter Search*.
- [16] Martin J. Land, 2004, *Workload control in job shops, grasping the tap*, University of Groningen, PhD Thesis.
- [17] Michael C. Fu, 2002, *Optimization for Simulation: Theory vs. Practice*, Journal on Computing.
- [18] Michael C. Fu, Fred W. Glover, Jay April, 2005, *Simulation Optimization: A Review, New Developments, and Applications*, Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference, M. E. Kuhl, N. M. Steiger, F. B. Armstrong, and J.A. Joines, eds.
- [19] Peter Henrich, 2005, *Applicability aspects of workload control in job shop production*, University of Groningen, Msc Thesis.
- [20] SIMUL8 Corporation and OptTek Inc, *SIMUL8, Plug-In: OptQuest for SIMUL8*, OptTek.