

Sequenciamento da Produção em uma Linha de Usinagem Industrial utilizando a Metaheurística Simulated Annealing

Marcelo Vilela Figueiredo
marcelo_mvf@yahoo.com.br
FEG-Unesp

José Roberto Dale Luche
dluche@feg.unesp.br
FEG-Unesp

Bruno Chaves Franco
francosjc@hotmail.com
FEG-Unesp

Andréia Maria Pedro Salgado
andreaia@feg.unesp.br
FEG-UNESP

Resumo: Na programação da produção as empresas podem alcançar diferentes objetivos, tais como: prazo de entrega, ordem de pedido, lucratividade, redução de ociosidade das máquinas, entre outros. Dentre os objetivos listados, o nível de ociosidade das máquinas é um importante indicador de produtividade nas fábricas, responsável muitas vezes por problemas nos processos precedentes, falta de matéria prima ou mão de obra, baixa demanda de produção e também pelo mau sequenciamento da produção. Esta última causa pode ser amenizada através da utilização de técnicas de sequenciamento da produção. Este trabalho trata o problema de sequenciamento da produção encontrada em uma linha de usinagem, cujo objetivo foi minimizar o makespan. Dois métodos foram desenvolvidos e os resultados foram satisfatórios, uma vez que os provenientes do algoritmo de simulated annealing são bastante competitivos com os resultados obtidos por meio do algoritmo Exato ao retornar a solução ótima nas duas instâncias resolvidas.

Palavras Chave: Simulated Annealing - Metaheurística - Sequenciamento - usinagem -

1. INTRODUÇÃO

Tubino (2000) apresenta o setor de Planejamento e Controle da Produção (PCP) dividido em três níveis de planejamento: Planejamento Estratégico; Planejamento Mestre da Produção (PMP) e Programação da Produção. Planejar estrategicamente consiste no gerenciamento e constante desenvolvimento das relações entre os objetivos e recursos das empresas e as oportunidades de mercado, sempre tendo em vista o longo prazo (KOTLER, 1998). Para Vieira et al. (2002), o Plano Mestre de Produção (PMP) é uma antecipação da programação da produção. Esta etapa abrange o levantamento de necessidades de materiais (MRP) e representa o que a empresa planeja produzir, levando-se em consideração a disponibilidade de material, de capacidade, demandas pendentes, entre outros. Por fim, chega-se à última subdivisão do planejamento da produção: a Programação da Produção que, de acordo com Corrêa et. al. (2001), consiste em se definir detalhadamente a sequência de execução das atividades produtivas, o dimensionamento de lotes e a atribuição de recursos (mão-de-obra, máquinas, matéria-prima, etc.) para produzir o que foi planejado no PMP.

Johnson e Montgomery (1974) descrevem que a constante variação da demanda de mercado e a criação de novos produtos criam a necessidade de se realizar sempre o sequenciamento da produção que, juntamente com o dimensionamento de lotes, tem o objetivo de minimizar os tempos de preparação e de ociosidade dos recursos, aumentando assim a produtividade. Desta forma, as fábricas que realizam um bom sequenciamento da produção conseguem alcançar resultados como: redução de custos com hora/homens, redução de atrasos de entrega de produtos, aumento da capacidade de produção, entre outros.

De acordo com Slack *et al* (2009) a programação é uma das atividades mais complexas no gerenciamento da produção, pois deve lidar com uma quantidade grande de produtos, máquinas e processos. À medida que a quantidade das referidas variáveis aumenta, o número de possíveis programações aumenta proporcionalmente. Rezende *et al* (2012) atenta para o problema do gerenciamento das restrições do sistema para identificar os recursos que limitam os resultados da organização. Adicionalmente em relação à complexidade de tal atividade, Pereira e Librantz (2011) afirmam que gerar uma programação de ordens de produção em tempo computacional viável é um grande desafio.

Para Luche *et al* (2009), Gomes (2008) e Sucupira (2004), Problemas de Programação da Produção (PPP) podem ser resolvidos por algoritmos heurísticos e metaheurísticos capazes de obter soluções de boa qualidade em tempos de execução aceitáveis. Buzzo e Moccellin (2000), Souza *et al* (2002), Rodrigues *et al* (2004) e Vivan (2010) apresentam aplicações da metaheurística *Simulated Annealing* para resolver respectivamente, problemas de programação da produção, alocação de salas, planejamento florestal e sequenciamento da produção.

A principal contribuição deste trabalho está no desenvolvimento de um método de solução que auxilia na tomada de decisões em uma das principais etapas da fabricação, ou seja, na decisão do sequenciamento da produção em uma linha de usinagem com máquinas paralelas visando minimizar o tempo total utilizado para a fabricação de todos os itens (*makespan*). A sequência definida dos itens a serem usinados (dentre as 720 possíveis sequências) sempre foi definida com base apenas na experiência dos funcionários e chegava a consumir algumas horas, justificando assim, a necessidade de métodos de solução mais eficientes e também capazes de gerar soluções de melhor qualidade. Uma ferramenta computacional foi desenvolvida a partir dos algoritmos propostos e disponibilizada para uso na empresa.

Este artigo está organizado da seguinte forma: Na Seção 2 é apresentado o problema de sequenciamento da empresa utilizada no estudo. A discussão é baseada na planta da empresa estudada nesta pesquisa, mas também se aplica a outras empresas deste setor. Na Seção 3 são discutidos os métodos de solução, onde é apresentado um algoritmo Exato e um outro algoritmo baseado na metaheurística *simulated annealing*. Na Seção 4 são analisados os resultados obtidos com os métodos propostos quando aplicados a duas instâncias disponibilizadas pela empresa. Finalmente, na seção 5 é feita a discussão das conclusões e perspectivas para pesquisa futura.

2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

A empresa objeto de estudo está instalada na cidade de Cruzeiro, SP. O grupo à qual pertence esta unidade é um dos maiores na América latina no desenvolvimento e fabricação de vagões de carga em aço e alumínio, rodas de aço fundido, truques, rodeiros e sistemas de choque e tração, além de prestar serviços de reparação, adaptação e modernização de vagões e componentes. No problema estudado, itens de grande porte são usinados, os pesos desses itens variam entre 500 e 1000 kg e são feitos de aço. Tais itens são utilizados como componentes nos sistemas de locomoção de tratores de esteira.

A linha de usinagem da empresa processa seis modelos diferentes de itens (rodas), o que torna importante o sequenciamento da produção devido à disponibilidade escassa dos recursos de produção. A partir da demanda mensal, o departamento de planejamento e controle da produção (PCP) realiza a programação diária da produção, a qual é realizada procurando atender a prioridade dos clientes e evitar a falta de abastecimento de processos subsequentes. Após o dimensionamento do lote de produção diário, é necessário fazer o sequenciamento da produção para a utilização dos recursos de forma mais eficiente. O problema consiste em encontrar a sequência de usinagem que apresenta o menor *makespan* para o processamento de determinadas demandas de produção.

2.1. DADOS DA LINHA DE USINAGEM

Cada item deve passar pelas seguintes operações de usinagem:

- 1) Operação 1: Realizada pela máquina 11 ou 12;
- 2) Operação 2: Realizada pela máquina 21 ou 22;
- 3) Operação 3: Realizada somente pela máquina 31.

Durante as transições entre determinados modelos, há tempos dedicados ao *setup* das máquinas. As tabelas 1 e 2 apresentam os tempos (em minutos) de *setup* em cada máquina. As tarefas predecessoras são listadas nas linhas e as sucessoras nas colunas:

Tabela 1: Tempos de *Setup* (em minutos) entre os modelos nas máquinas 11 e 12.

Modelo	A	B	C	D	E	F
A	0	3	3	3	3	0
B	3	0	0	3	3	3
C	3	0	0	3	3	3
D	3	3	3	0	3	3
E	3	3	3	3	0	3
F	0	3	3	3	3	0

Note que, com exceção dos modelos B e C (similares), os tempos de *setup* são os mesmos entre todas as demais transições de modelos.

Tabela 2: Tempos de *Setup* entre os modelos nas máquinas 21, 22 e 31.

Modelo	A	B	C	D	E	F
A	0	3	3	3	3	0
B	3	0	0	5	3	3
C	3	0	0	3	3	3
D	3	3	3	0	3	3
E	3	3	3	3	0	3
F	0	3	3	3	3	0

Nos tempos de *setup* entre as operações 2 e 3, exibidos na Tabela 2, há o caso da transição do modelo B para o modelo D, onde o tempo de *setup* é de 5 minutos, as demais são 3 ou zero. Já os tempos de processamento variam em função dos modelos e das operações. Os pares de máquinas que realizam as operações 1 e 2 são compostos por máquinas paralelas idênticas, enquanto apenas uma máquina realiza a operação 3. Na Tabela 3 encontram-se os tempos de processamento envolvidos na modelagem:

Tabela 3: Tempo de processamento de cada modelo em cada operação.

Operação	Modelo					
	A	B	C	D	E	F
1	23	23	29	33	45	25
2	23	23	27	31	45	22
3	12	12	15	15	24	12

Nota-se aqui, que os tempos de processamento são distintos em relação a praticamente todos os modelos, sendo idênticos apenas para os modelos A e B.

Foi considerado também um OEE (*Overall Equipment Effectiveness*) de 85% e disponibilidade de 900 minutos por dia, considerando-se pausas de almoço, diálogo diário de segurança e limpeza do setor no fim do expediente.

As operações apresentam as seguintes restrições:

- Uma vez iniciada, a operação não pode ser interrompida (não preemptiva);
- As relações de precedência entre as três operações fazem com que a operação 2 só possa ser iniciada após a operação 1 e que a operação 3, somente após as operações 1 e 2 terem sido concluídas;
- O algoritmo deverá alocar operações na sequência enquanto houver tempo disponível para a execução das mesmas. Desta forma, as operações restantes deverão ser postergadas para o dia útil seguinte;

É permitido o uso de horas extras, porém estas são definidas pela supervisão depois de constatada a sua necessidade.

3. MÉTODOS DE SOLUÇÃO

Neste trabalho foram estudados dois métodos de solução para o problema do sequenciamento diário de produção da empresa, na seção 3.1 é apresentado um algoritmo exato que percorre todo o espaço de soluções viáveis, enquanto na seção 3.2, é discutida a implementação de uma metaheurística *Simulated annealing*.

3.1. ALGORITMO EXATO

Um algoritmo exato foi criado para a solução do problema aqui tratado. O método utilizado consiste na análise do *makespan* de todas as permutações de modelos a serem usinados no dia. Tal algoritmo sempre retornará uma solução ótima, porém, o tempo de execução do mesmo é relativamente longo e, dependendo do número de itens a serem sequenciados, sua aplicação torna-se inviável pois o número de sequências geradas é igual a fatorial do número de modelos utilizados.

3.2. METAHEURÍSTICA *SIMULATED ANNEALING*

Segundo Callister (1991) os materiais sólidos são constituídos por redes cristalinas formadas por grãos. Na medida em que ocorre o aquecimento dos sólidos, os grãos adquirem gradativamente diâmetros maiores. Isso ocorre devido à migração de átomos para redes cristalinas vizinhas, aumentando assim o diâmetro médio dos grãos. A intensidade deste fenômeno é proporcional também à taxa de resfriamento dos sólidos (quanto menor for a taxa de resfriamento, maiores serão os grãos). Analogamente, se o sólido é submetido a aquecimento e resfriamento rápidos, este apresentará uma estrutura grosseira, composta por grãos pequenos.

A criação do algoritmo *Simulated Annealing* foi proposta por Kirkpatrick (1983). Conceitualmente, é um método de busca em vizinhança no qual o critério de seleção consiste nas regras de transição do algoritmo de Metrópolis: o algoritmo seleciona aleatoriamente um candidato dentre os que compõem a vizinhança da solução atual. Se o candidato é melhor que a solução atual em termos do critério de avaliação, ele será aceito como solução atual. Caso contrário, será aceito com uma probabilidade que diminui segundo o crescimento da diferença entre os valores da função objetivo da solução candidata e da atual (problema de minimização). Quando o candidato é rejeitado, o algoritmo seleciona aleatoriamente outro candidato e o processo é repetido.

A lógica de um algoritmo de *simulated annealing* evita o aprisionamento em ótimos locais, escolhendo soluções da vizinhança aleatoriamente e permitindo com certa probabilidade (cada vez menor, conforme a proximidade do ótimo diminui) o movimento a soluções piores. Desta forma, quanto maior a temperatura do sistema, mais facilmente será aceito uma solução de menor qualidade (LIBRANTZ *et al*, 2010).

Na Figura 1 é apresentado o algoritmo aplicado ao problema baseado no método *Simulated Annealing*, para calcular a probabilidade de se aceitar a nova solução quando de qualidade inferior que a atual, uma função conhecida por fator de Boltzmann foi utilizada.

$N(S)$: conjunto de soluções vizinhas que é gerado por meio da troca de posição de dois itens de S ;
 S^* : a melhor solução encontrada;
 α : Fator de redução da temperatura;
 $U(0,1)$: número aleatório entre zero e um.

1. Entrada
 - T_0 = temperatura inicial do sistema;
 - T_f = temperatura final do sistema;
 - Iter = número de iterações em cada temperatura;
2. Faça
 - S = sequência inicial aleatória da usinagem dos 6 modelos;
 - $S^* = S$;
 - $T = T_0$; (T será a temperatura atual do sistema)
3. Enquanto $T \geq T_f$
 - 3.1. Para i de 1 até iter faça:
 - 3.1.1. Seleciona aleatoriamente uma solução candidata S' de $N(S)$;
 - 3.1.2. $\Delta = \text{custo}(S) - \text{custo}(S')$;
 - 3.1.3. Se $(U(0,1) < e^{(-\Delta/T)})$ ou $(\Delta > 0)$
 - 3.1.3.1. $S = S'$
 - 3.1.3.2. Se $S < S^*$
 - 3.1.3.2.1. $S^* = S$;
 - 3.2. $T = \alpha(T)$;
4. Resultado final = S^* ;

Figura 1: Metaheurística *simulated annealing*

Neste caso, o algoritmo termina ao se alcançar uma temperatura mínima T_f . No trabalho de Kirkpatrick (1983), o algoritmo termina sua execução quando após três temperaturas sucessivas não tenha sido produzido um número mínimo aceitável de melhorias na solução.

4. RESULTADOS COMPUTACIONAIS

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos com a aplicação dos algoritmos *Simulated Annealing* e Exato. Foi utilizado um computador com processador i5 com 4gb de memória RAM e os algoritmos foram implementados em ambiente Delphi XP. São analisadas diferentes sequencias de produção em uma linha de usinagem composta por cinco máquinas com a produção de seis modelos de rodas, com a análise de duas situações distintas, as quais representam dias normais de produção. Os dados de entrada são apresentados nas Tabelas 4 e 5:

Tabela 4: Demandas a serem sequenciadas.

Modelo	Demanda Diária	
	Caso I	Caso II
A	10	10
B	3	10
C	3	10
D	15	15
E	10	6
F	10	6

A Tabela 5 exibe a situação inicial da linha de produção, onde cada máquina está pronta para os modelos que foram usinados no dia anterior. O fato de não haver operações de usinagem precedentes à operação 1 confere a liberdade de escolha dos modelos a serem usinados inicialmente pela mesma.

Tabela 5: Itens presentes nas máquinas no momento do sequenciamento.

Máquina	Carga Inicial	
	Caso I	Caso II
11	Vazia	Vazia
12	Vazia	Vazia
21	D	C
22	D	C
31	B	E
31	B	E

Caso I

Foram analisadas 100 sequencias pelo Algoritmo *Simulated Annealing*, enquanto o Algoritmo Exato analisou todas as 720 sequencias possíveis. As sequencias com *makespan* mínimo encontradas por cada algoritmo são apresentadas nas Tabelas 6 e 7:

Tabela 6: Sequenciamentos ótimos do algoritmo Exato (Caso I).

Identificador da solução (ID)	Sequência de Produção						Makespan
99	A	F	B	C	E	D	898
146	B	C	F	A	E	D	898
151	B	C	A	F	E	D	898
164	B	C	E	F	A	D	898
166	B	C	E	A	F	D	898
167	B	C	E	D	A	F	898
168	B	C	E	D	F	A	898
611	F	A	B	C	E	D	898

Na Tabela 7, o S* representa a solução encontrada pelo algoritmo *Simulated Annealing*.

Tabela 7: Resultado do *Simulated Annealing* (Caso I).

	Sequência de Produção						Makespan
S*	F	A	B	C	E	D	898

Como pode ser observado, o algoritmo Exato retornou oito sequencias com *makespan* de 898 minutos. No caso do algoritmo de *Simulated Annealing*, era esperada apenas uma sequência que seria a registrada em S*, qualquer outra sequência de mesmo *makespan* não substituiria a primeira encontrada, porém, nenhuma outra foi encontrada. É importante lembrar que a implementação do algoritmo de *simulated annealing* visa alcançar soluções de boa qualidade com um tempo bastante inferior ao exigido pelo algoritmo exato. Em relação ao tempo necessário para sua execução, foram necessários dois minutos contra dez do algoritmo exato.

Caso II

No caso II, foram analisadas novamente 720 sequencias pelo algoritmo Exato e 102 pelo algoritmo *Simulated Annealing*. Os resultados do algoritmo Exato e do algoritmo de *simulated annealing* são apresentados respectivamente nas Tabelas 8 e 9.

Tabela 8: Sequenciamentos ótimos do algoritmo Exato (Caso II).

ID	Sequencias de Produção						Makespan
146	B	C	F	A	E	D	945
151	B	C	A	F	E	D	945
164	B	C	E	F	A	D	945
166	B	C	E	A	F	D	945
167	B	C	E	D	A	F	945
168	B	C	E	D	F	A	945
266	C	B	E	A	F	D	945
267	C	B	E	D	A	F	945
268	C	B	E	D	F	A	945
269	C	B	E	F	A	D	945
271	C	B	F	A	E	D	945
278	C	B	A	F	E	D	945

Tabela 9: Resultado do *Simulated Annealing* (Caso II).

Descrição	Sequencias de Produção	Makespan
S*	B C E D A F	945
S'	C B E F A D	945
S'	C B E D A F	945

O algoritmo Exato retornou 12 soluções com o *makespan* de 945 minutos enquanto o algoritmo *Simulated Annealing* retornou três soluções com o mesmo *makespan* mínimo. Os tempos de execução despendidos para cada algoritmo foram semelhantes ao Caso I.

A Tabela 10 apresenta um resumo dos resultados encontrados pelos algoritmos:

Tabela 10: Resumo dos resultados encontrados pelos algoritmos.

Algoritmo	Análise		
		Caso I	Caso II
Exato	<i>Makespan</i> Mínimo	898	945
	Sequências ótimas	8	12
	Tempo (min)	10	11
<i>Simulated Annealing</i>	<i>Makespan</i> Mínimo	898	945
	Sequências ótimas	1	3
	Tempo (min)	2	2
Empresa	Sequências ótimas	1	1
	Tempo aproximado	1 hora	1 hora

Observa-se nos dois casos resolvidos que o algoritmo *Simulated Annealing* encontrou soluções ótimas. O algoritmo também exigiu menor esforço computacional em relação ao algoritmo Exato, o que mostra que o algoritmo de *simulated annealing* poderá ser bastante útil nos casos em que a quantidade de modelos a serem sequenciados some uma quantidade superior à utilizada nos dois casos resolvidos neste trabalho. Note que o número de soluções gerados pelo algoritmo exato é Fatorial(n), onde n é o número de modelos a serem sequenciados, com Fatorial de (10), o modelo exato precisaria gerar e analisar 3.628.800 sequencias diferentes, o que dispenderia um tempo computacional de aproximadamente 833 horas.

5. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS PARA PESQUISA FUTURA

Este trabalho tratou do problema de sequenciamento da produção encontrada em uma linha de usinagem, cujo objetivo foi minimizar o *makespan*. Os resultados foram satisfatórios, uma vez que os provenientes do algoritmo de *simulated annealing* são bastante competitivos com os resultados obtidos por meio do algoritmo Exato ao retornar a solução ótima nas duas instâncias resolvidas.

O problema do sequenciamento da produção para as duas instâncias resolvidas, onde o número de modelos é de apenas seis, não requer algoritmos sofisticados para encontrar soluções de boa qualidade. Porém, ao aumentar a quantidade de modelos a serem sequenciados, o algoritmo exato se torna proibitivo devido ao tempo necessário para analisar todas as soluções, nesses casos, a metaheurística *simulated annealing* proposta neste trabalho se torna uma ótima alternativa.

Embora simples, os algoritmos apresentados são capazes de gerar um ganho de tempo bastante importante no chão de fábrica da empresa. Atualmente estão sendo aplicados na

unidade e espera-se em breve poder reportar os ganhos e experiência com o uso da ferramenta.

Youssef *et al* (2001) faz um estudo comparativo de três metaheurísticas: Algoritmos evolutivos, *simulated annealing* e busca tabu. Propõem-se como extensão da pesquisa realizada, estudos de outras metaheurísticas como Busca Tabu e Colônia de Formigas.

A ferramenta desenvolvida poderá ser incorporada ao sistema ERP da empresa.

O acompanhamento do processo de implantação da ferramenta, descrevendo as dificuldades e facilitadores encontrados, mudanças ocorridas e fatores comportamentais podem ser realizados e reportados.

Referências

- BUZZO, W. R.; MOCCELLIN, J. V.** Programação da produção em sistemas flow shop utilizando um método heurístico híbrido Algoritmo Genético – Simulated Annealing. USP: São Carlos, 2000.
- CALLISTER, W. D.** Material Science and Engineering an Introduction. Ed. John Willey & Sons, New York, USA, 1991.
- CORRÊA, Henrique L.; GIANESI, Irineu G.N.; & CAON, Mauro.** Planejamento, programação e controle de Produção. Editora Atlas. 4ª Edição. 2001.
- GOMES, H. C.** Relaxação Lagrangeana com Fixação de Variáveis Aplicada ao Problema de Sequenciamento em uma Máquina. UFMG: Belo Horizonte, 2008.
- JOHNSON, L. A.; MONTGOMERY, D. C.** Operations -research in production planning, scheduling and inventory control. New York: Wiley, 1974.
- KIRKPATRICK, S.** Optimization by Simulated Annealing. Revista Science, v. 220, pp. 671-680, 1983.
- KOTLER, P.** Administração de marketing: análise, planejamento, implementação e controle. 5. Ed. São Paulo: Atlas, 1998.
- LIBRANTZ, A. F. H.; ARAÚJO, S. A.; SANTANA, J. C. C.; BENVENGA, M. A. C.** Cinética e otimização do processo de secagem do malte de milho usando Simulated Annealing. XXX ENEGEP: São Carlos, 2010.
- LUCHE, J.R.D., MORABITO, R. e PUREZA, V.** Combining process selection and lot sizing models for the production scheduling of electrofused grains. Asia-Pacific Journal of Operations Research, v.26, pp.421-443, 2009.
- PEREIRA, V. O.; LIBRANTZ, A. F.** Proposta de framework para programação de produção de capacidade finita em indústria de fabricação de produtos compósitos. XXXI ENEGEP: Belo Horizonte, 2011.
- REZENDE, E.; SILVA, M. A.; VILELA, M. S. S.; PRADO, R. A. D. P.** Aplicação dos conceitos da teoria das restrições ao processo produtivo de uma indústria de doces: um estudo de caso. IX SEGET: Resende, 2012.
- RODRIGUES, F. L.; LEITE, H. G.; SANTOS, H. N.; SOUZA, A. L.; RIBEIRO, C. A. A.** Metaheurística Simulated Annealing para solução de problemas de planejamento florestal com restrições de integridade. UFV: Viçosa, 2004.
- SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R.** Administração da produção. 3ª Ed. São Paulo: Atlas, 2009.
- SOUZA, M. J. F.; MARTINS, A. X.; ARAÚJO, C. R.** Experiências com simulated annealing e busca tabu na resolução do problema de alocação de salas. In. XXXIV Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 34. Rio de Janeiro, 2002.
- SUCUPIRA, I. R.** Métodos heurísticos genéricos: metaheurísticas e hiper-heurísticas. USP: São Paulo, 2004.
- TUBINO, D.F.** Planejamento e Controle da Produção, 2. ed. São Paulo: Atlas, 2009.
- VIEIRA, G. E. V.; SOARES, M. M.; JUNIOR, O. G.** Otimização do planejamento mestre da produção através de algoritmos genéticos. XII Encontro Nacional de Engenharia de Produção: Curitiba, 2002.



VIVAN, C. J. Aplicação do método Simulated Annealing em um problema real de sequenciamento da produção. UFPR: Curitiba, 2010.

YOUSSEF, H.; SAIT, S. M.; ADICHE, H. Evolutionary algorithms, Simulated Annealing and tabu search: a comparative study. Engineering Applications of Artificial Intelligence, v. 14, pp. 167-181, 2001.