CORDENONSI, A. Z.; SANTOS, W. B. Resolução do Problema de Roteamento de Veículos Utilizando a Heurística de Savings. Revista do Centro de Ciências da Economia e Informática, Bagé - RS, v. 5, n. 7, p. 7-14, 2001.

RESOLUÇÃO DO PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS UTILIZANDO A HEURÍSTICA DE *SAVINGS*

Willian Bolzan dos Santos[1]

Msc. Andre Zanki Cordenonsi[2]

RESUMO

Este artigo tem por objetivo apresentar um estudo sobre a resolução do Problema de Roteamento de Veículos (PRV) utilizando técnicas de Inteligência Artificial and Pesquisa Operacional. O PRV é um classico problema de Otimização Combinatorial sendo um dos mais difíceis de serem resolvidos por exigir grande esforço computacional. O problema consiste, basicamente, em estabelecer rotas eficientes para veículos entregarem mercadorias. Utilizou-se a Heurística de *Saving* como método de resolução para o problema, já que sua implementação é simples e fornece bons resultados. Problemas desse tipo estão presentes em praticamente todas as empresas que trabalham com transporte, já que a escolha de rotas mais eficientes representa ganho de tempo e redução no número de veículos, proporcionando menor consumo de combustível, menor desgaste dos veículos, etc.

Palavras-chave: Roteamento, Otimização Combinatorial, Inteligência Artificial, Heurística.

ABSTRACT

The objective of this paper is present a study about the Vehicle Rotering Problem, using techniques of Artificial Intelligence and Operational Research. The VRP is classical problem of Combinatorial Optimization and it is one of the most difficult problem to be solved. The problem is find a efficiently rout for a set of vehicles to delivery merchandise. This kind of problem, usually, requires a lot of computational effort to find the best rout. The Savings Heuristic was the algorithm choosed to solve this problem, because it is simple and supply good results. This kind of problems can be viewed in a lot of real problems, like the transport companies. The benefits reached by the use of heuristics can be summarized in three points: global time reduction, reduction of the number of vehicles and reduction of the global path of the all vehicles.

Keywords*: Routering, Combinatorial Optimization, Artificial Intelligence, Operational Research, Heuristic.*

1 INTRODUÇÃO

Pode-se definir um PRV de maneira simples. Para o problema que será abordado neste trabalho, dispoem-se de uma frota de veículos e deseja-se atender um conjunto de clientes, cada um com uma demanda específica. Os veículos devem partir e retornar ao depósito, visitando os clientes uma única vez. O objetivo principal é minimizar os "custos" de transporte no atendimento aos clientes.

A idéia principal é criar rotas para os veículos percorrerem todos os pontos de entrega de modo que a capacidade do veículo não exceda e que o percurso inicie e termine no depósito. Devido a sua complexidade, torna-se difícil a obtenção de soluções ótimas se o número de clientes for grande. Para tanto, existem procedimentos ou critérios chamados heurísticas que exploram de maneira inteligente o problema, buscando soluções de boa qualidade, mas sem garantir a obtenção da solução ideal.

[1] Aluno do Curso de Informática – URCAMP / Campus São Gabriel. *E-mail: wbolzan@hotmail.com*

[2] Prof. Curso Informática – URCAMP / Campus São Gabriel. *E-mail: andrezc@uol.com.br*

2 OTIMIZAÇÃO COMBINATORIAL

Otimização Combinatorial pode ser definida como sendo o estudo matemático para encontrar um arranjo, agrupamento, ordenação ou seleção ótima de objetos discretos (Lawler – 1976). A maioria dos Problemas de Otimização Combinatoriais – (POCs) são bem definidos, isto é, uma solução ótima sempre existirá se um conjunto de soluções factíveis não é vazio.

Mas esta solução ótima não é o principal objetivo dos pesquisadores e sim uma forma de encontrar uma boa solução (próxima da solução ótima) em um tempo computacional razoável. POC são considerados fáceis e difíceis e podem ser classificados em quatro classes de problemas: *P, NP, NP-Árduo* e *NP-Completo*

Os POC da classe *P* podem ser resolvidos por algoritmos de tempo polinomial; *NP* tem dificuldade crescente, sendo os problemas *NP-Completos,* os tipos mais difíceis de se resolver, dentre esses problemas, podemos citar, entre outros, o Problema do Caixeiro Viajante e o Problema de Roteamento de Veículos.

Uma forma de resolver tais problemas seria simplesmente enumerar todas as soluções possíveis e guardar aquela de menor custo. Entretanto, para qualquer problema de um tamanho minimamente interessante (e útil), este método torna-se impraticável já que o número de soluções possíveis é imenso. Portanto, técnicas de Inteligência Artificial são necessárias.

O objetivo principal em trabalharmos com técnicas de Inteligência Artificial e Otimização é estudar como minimizar (ou maximizar, dependendo do problema) variáveis ligadas a determinadas tarefas.

3 O PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS

3.1 Introdução

Um PRV consiste basicamente em estabelecer e organizar rotas ou itinerários eficientes para veículos realizarem entregas de mercadorias.

Em outras palavras, dispomos de uma frota de K veículos idênticos ou não e desejamos atender um conjunto de *n* clientes, cada um com uma demanda específica. Todos os veículos devem partir e retornar a uma mesma origem (depósito) e cada cliente deve ser visitado uma única vez.

O objetivo geral será minimizar o "custo total" de transporte no atendimento aos clientes, isto é, minimizar custos fixos, custos operacionais e o número de veículos envolvidos no transporte.

3.2 Fatores Importantes

Alguns fatores importantes que podem ser considerados e que dificultam a construção das rotas são:

a) Frota heterogênea: Veículos com diferentes capacidades de carga.
b) Janelas de Tempo: Janelas de Tempo em um PRV representam o intervalo de tempo no qual a entrega da mercadoria pode ser feita. Um exemplo típico desse problema que podemos citar ocorre na distribuição de bebidas para restaurantes. Por exemplo, não seria conveniente para o restaurante receber suas mercadorias no horário do almoço. Portanto, as Janelas de Tempo em um PRV possuem valores limites para iniciar a entrega.
c) Viagens longas: A circulação entre cidades geralmente força os veículos a rodar durante mais de um dia. Devem então ser invocadas regras especiais na formação da rota que tornam o problema muito complexo.
d) Horários de início e fim das atividades: Alguns dos problemas requerem que todos os veículos devam começar e acabar na mesma hora. Outros permitem diferentes

especificações de horário de início e final para as rotas de cada um dos veículos, o que os torna mais realistas, pois na prática não seria sempre possível que todos os veículos deixem o depósito simultaneamente.

e) Questão de Assimetria: Em um PRV, a Questão de Assimetria é um fator muito importante. Um problema assimétrico é o que possui o caminho para ir de *i* até *j* diferente de *j* até *i* ($ij \neq ji$). Um exemplo prático disso são ruas de mão única e vértices separados por uma serra, se o custo for representado pelo tempo.

3.3 PRINCIPAIS APLICAÇÕES

O PRV possui um número extraordinário de aplicações práticas, pois implica tipicamente em uma série de situações reais que afetam principalmente a indústria, o comércio, o setor de serviços, a segurança, a saúde pública e o lazer. Dentre muitas outras, podemos destacar:

- Distribuição de jornais;
- Distribuição de bebidas;
- Distribuição de produtos químicos;
- Transporte escolar;
- Recolhimento de lixo;
- Distribuição de gás;
- Entrega de correspondência;
- Roteamento de linhas aéreas
- Sistema de transportes coletivos;
- Serviços de emergência..

4 ALGORITMOS HEURÍSTICOS

Heurísticas são critérios ou métodos utilizados para decidir, entre várias alternativas, a melhor forma de chegar a um objetivo. A maioria dos problemas de OC exigem a avaliação de um grande número de alternativas para determinar a sua solução exata. Heurísticas aumentam a eficiência do processo em detrimento da exploração de todas as alternativas.

A utilização de heurísticas em problemas práticos de grande dimensão e de solução inviável por métodos exatos de solução visam encontrar soluções de boa qualidade de maneira rápida, isto é, com baixo esforço computacional.

Para entendermos melhor tomemos um exemplo do Problema do Caixeiro Viajante - PCV: O PCV é uma variante do PRV, o qual consiste em encontrar uma rota em um grupo de cidades, tal que o caminho percorrido entre a primeira e a última cidade seja o menor possível.

Suponhamos que temos *N* clientes para atendermos, temos:

$(N-1)!$	Caminhos
N	para examinar um caminho
$N!$	para realizar a busca

Agora veja a comparação entre o uso de um algoritmo exaustivo (processa até encontrar a melhor solução: ($N!$)) com a heurística do vizinho mais próximo (partindo de uma cidade, a próxima cidade a ser visitada será aquela que estiver mais próxima da cidade atual, quando não houver mais cidades a inserir na rota, retorna a cidade de partida fechando a rota: (N^2)). Considerando um computador capaz de examinar cada solução em 10^{-9} segundos (1 nanosegundo) tem-se:

N	Algoritmo Exaustivo	Heurística
20	80 anos	0,4 ms
21	1.680 anos	0,44 ms

Tabela 1: Comparação entre metodologias

5 O ALGORÍTMO DE *SAVINGS*

O Algoritmo de Saving foi escolhido para a implementação do PRV por fornecer soluções de qualidade razoável, por ser simples e implementação fácil.

Conforme (Goldbarg 00), o algoritmo de *saving* realiza a progressão da uma configuração para outra segundo o critério de minimização da função objetivo, também chamado de *saving* (economia). Arcos de menor custo devem substituir arcos mais caros dentro da rota que vai sendo melhorada nesses termos. No procedimento de economia e inserção não existe a obrigatoriedade de que a rota seja viável ao longo do processo de melhoria. Se alguma solução alcançada for viável, então caracteriza-se a obtenção de um limite superior para o problema.

Primeiramente, forma-se uma solução inicial para *n* pontos de entrega com *n* rotas, todas contendo o depósito e um ponto de entrega. Após esta fase, tenta-se unir duas rotas em uma rota factível a cada iteração. Sendo *i* e *j* dois pontos de entrega, o critério utilizado para eliminar o maior custo é dado por:

$S_{ij} = c_{i0} + c_{0j} - c_{ij}$ (1)

onde c_{i0} é a distância entre o ponto de entrega *i* e o depósito (aqui representado por *0*), c_{0j} é a distância entre o depósito *0* e o ponto de entrega *j* e c_{ij} é a distância entre os dois pontos de entrega.

A cada iteração as rotas são organizadas em conjuntos de pares. Um ponto *i* e um ponto *j* podem formar o par (*i*,*j*) se:

- os pontos de entrega *i* e *j* não estão na mesma rota;
- a capacidade de carga do veículo não é violada;
- nem *i* nem *j* são *pontos interiores* em uma rota.

Um ponto interior em uma rota significa que seu ponto anterior e seu ponto sucessor não podem ser o depósito .

6 RESULTADOS

Para a realização dos testes foram estabelecidos, primeiramente, alguns parâmetros, que estão listados à seguir:

- Número de Clientes: 10, 25, 50, 100, 150 e 200;
- Capacidade do Veículo: 2000 e 4000 kg;
- Limite da Demanda: 1000 , 2000 e 4000 kg. Esse parâmetro significa que o cliente terá um valor limite para sua encomenda não podendo, portanto, excedê-la.

Com os parâmetros estabelecidos, podemos formar as configurações. Para cada cliente temos 2 valores para a capacidade e 3 valores para o limite da demanda. Portanto, para 6 conjuntos de clientes temos 36 tipos de configurações.

De posse dos parâmetros e das configurações, é necessário um critério para iniciar os testes. Este critério refere-se ao fato de lidarmos com dados de entrada gerados aleatoriamente, o que causa pequenas variações nos dados finais.

O critério estabelecido é executar 5 testes para cada configuração e retirar a média. Agora, se temos 36 tipos de configurações e devemos executar 5 testes para cada configuração, temos 180 execuções do algoritmo.

6.1 Análise dos Resultados

A seguir, a Tabela 2 mostra a média dos resultados obtidos com a execução dos testes inicias., a qual contém as seguintes informações:

- Nº de Rotas: a quantidade de rotas geradas. Podemos deduzir que esta informação também representa o número de veículos necessários para atender todos os pontos de entrega;
- Nº de Clientes: a quantidade de clientes ou pontos de entrega envolvidos no roteamento;
- Capacidade (kg): o valor estabelecido para a capacidade de carga dos veículos;
- Economia (%): representa o valor da economia conquistada pelo roteamento. O cálculo da economia baseou-se na distância inicial antes do roteamento menos a distância final percorrida após o roteamento;
- Taxa de Ocupação (%): esta taxa refere-se à ocupação do veículo, o quanto da sua capacidade de carga está sendo utilizada;
- Limite da Demanda (kg): refere-se ao valor estipulado para o limite de produtos encomendados pelos clientes;
- Tempo (s): representa o tempo computacional gasto para a execução desta configuração;

Nº de Rotas	Nº de Clientes	Capacidade (kg)	Economia (%)	Taxa de Ocupação (%)	Limite da Demanda (kg)	Tempo (seg)
6,4	10	4000	24,17%	75,26%	4000	1,4
2,8	10	4000	31,45%	74,63%	2000	1
1,8	10	4000	27,48%	65,40%	1000	1,4
6,2	10	2000	24,99%	82,16%	4000	1,2
2,8	10	2000	36,77%	77,26%	2000	1,2
1,6	10	2000	19,11%	73,10%	1000	1
15,4	25	4000	43,47%	80,08%	4000	1,4
7,2	25	4000	48,81%	79,18%	2000	1,6
4,4	25	4000	30,02%	77,39%	1000	1,6
14,2	25	2000	43,20%	81,60%	4000	1,2
7,4	25	2000	47,45%	82,20%	2000	1,6
4	25	2000	13,55%	78,05%	1000	1,4
28,4	50	4000	50,60%	83,26%	4000	1,8
15,4	50	4000	48,19%	85,00%	2000	1,6
7,6	50	4000	11,84%	82,76%	1000	2
27,4	50	2000	49,74%	83,93%	4000	1,8
13,8	50	2000	38,38%	82,89%	2000	1,8
7,6	50	2000	15,34%	81,98%	1000	2
60,6	100	4000	49,37%	84,86%	4000	5,2
28	100	4000	43,51%	85,75%	2000	4,8
15,4	100	4000	13,02%	83,30%	1000	4,6
57	100	2000	52,53%	85,48%	4000	5,2
27,6	100	2000	32,87%	87,11%	2000	4,8
15,6	100	2000	11,80%	81,43%	1000	5
87,2	150	4000	50,44%	86,15%	4000	13
42,8	150	4000	41,94%	85,62%	2000	12
22,2	150	4000	7,36%	85,41%	1000	11,4
22,6	150	2000	8,31%	84,94%	4000	11,4
43,4	150	2000	43,55%	85,69%	2000	12,2
21,8	150	2000	8,92%	84,05%	1000	11,4
111,2	200	4000	55,68%	85,45%	4000	27
56	200	4000	37,80%	86,18%	2000	25
28,2	200	4000	7,82%	87,08%	1000	24,2
116,2	200	2000	53,68%	84,03%	4000	26,6
56	200	2000	45,63%	86,69%	2000	25
28	200	2000	7,74%	85,43%	1000	24,2

Tabela 2: Resultados

Em uma primeira análise, podemos verificar que a economia se manteve, aproximadamente, na faixa dos 25% a 30%. Para ser mais preciso, levando-se em conta todas as configurações analisadas neste problema a média da economia conquistada é de 32, 68%. Podemos dizer que, na média, a economia com a implementação desse algoritmo simples de PRV foi muito alta.

De posse das informações contidas na tabela anterior, podemos começar a analisar aspectos específicos desses resultados.

Começamos a análise da economia obtida, em relação à capacidade do veículo. O Gráfico 1, mostra essa relação. Com o auxilio da Linha de Tendência (linha pontilhada), podemos verificar facilmente que a economia se manteve entre os 30% e 35%.

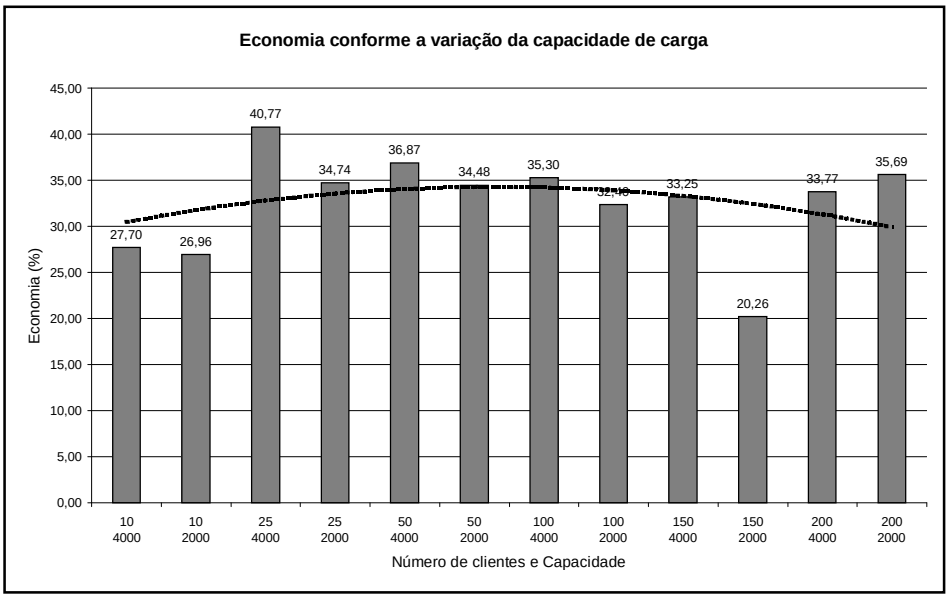

Gráfico 1: Economia conforme a variação da Capacidade

O Gráfico 2 analisa a taxa de ocupação do veículo. Para todos os dados a taxa se manteve na faixa dos 80%. Um veículo com uma taxa de ocupação de 80% significa que sua capacidade esta 80% ocupada.

Por exemplo, se o veículo possui uma capacidade de 4000 kg e sua taxa de ocupação é de 80%, neste caso ele estaria com uma carga de 3200 kg.

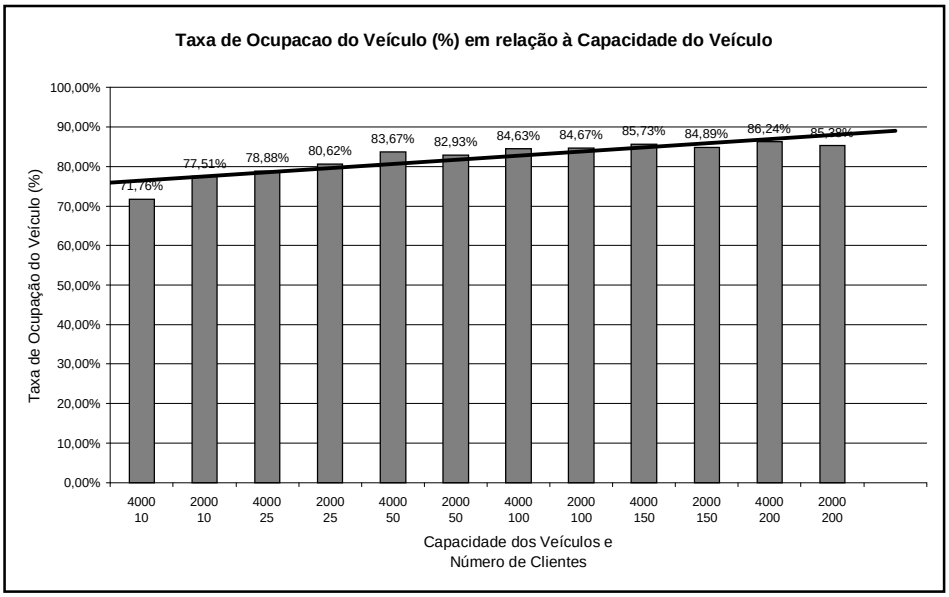

Gráfico 2: Taxa de Ocupação em Relação a capacidade e ao número de clientes

A variação do número de rotas em relação a capacidade do veículo é muito pequena (Gráfico 3), cerca de 1 rota de diferença, ou seja, quando a capacidade está fixada em 2000 kg temos um número *x* de rotas, mas quando a capacidade está fixada em 4000 kg o número de rotas passa a ser *x*+1.

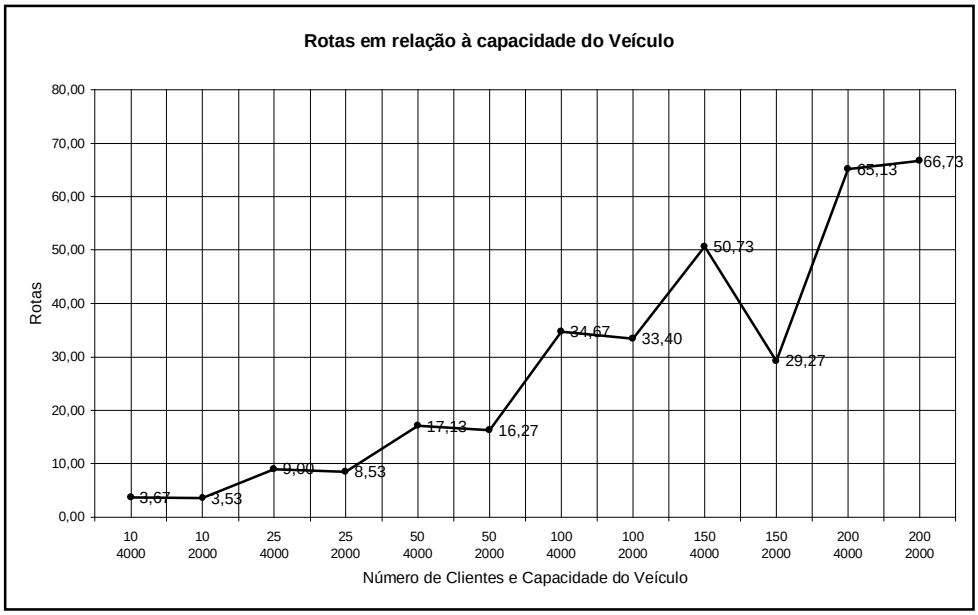

Gráfico 3: Rotas em relação a capacidade

7 CONCLUSÕES

No Brasil, ainda é pequeno o número de empresas que adotam sistemas de otimização. É comum que as empresas não tenham consciência de que certas tarefas podem ser otimizadas para tornarem-se mais eficientes e lucrativas.

Em empresas que tem suas atividades ligadas ao transporte, o seu sistema de roteamento de veículos é de fundamental importância para um bom desempenho. Portanto, esse trabalho busca analisar um método simples de otimização para auxiliar as empresas em suas atividades.

O método de otimização utilizado neste estudo possibilitou uma solução de boa qualidade, obtendo uma economia considerável, variando em torno dos 30%. No entanto, ao trabalharmos com algoritmos heurísticos não obtemos, ao final, uma solução definitiva. Assim, é importante salientar que alguns métodos de melhoramento são necessários.

Ao analisarmos a forma como as rotas são geradas, notamos a importância de se trabalhar com rotas não factíveis. No nosso algoritmo, se uma rota resultasse em uma rota não factível, essa troca não podia ser realizada.

Essa característica impede que sejam realizadas algumas trocas que poderiam provocar redução no seu custo. Algumas técnicas, como Busca Tabu, permitem que sejam geradas rotas infactíveis para permitir trocas mais lucrativas.

Outro aspecto importante nesse trabalho está relacionado à utilização de arquivos para os dados de entrada e saída, ocasionado certa dificuldade de utilização. Para tanto, faz-se necessário uma futura construção de uma interface amigável.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BITTENCOURT, G. **Inteligência Artificial – Ferramentas e Teorias**. Livro Texto - X Escola de Computação, Instituto de Computação, Campinas, 08-13 jul., 1996.

CHAN, Patrick. ***The Java Class Libraries - An Annotated Reference***. Addison Wesley. Massachusetts, 1996.

CORNELL, Gary. **Core Java - Guia Autorizado.** Makron Books.1998

GOLDBARG, Marco Cesar, et al.. **Otimização Combinatória e Programação Linear - Modelos e Algoritmos**. Editora Campus. Campus Rio de Janeiro, 2000.

MULLER, Felipe Martins. **Algoritmos heurísticos e exatos para resolução de problema de sequenciamento em processadores paralelos.** Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1993.

PASIN, Márcia, **Um estudo de problemas de roteamento de veículos.** Trabalho de Graduação, Curso de Bacharelado em Informática, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 1995.

TANEMBAUM, Aaron et at. **Estruturas de Dados usando C**. Editora Makron. São Paulo, 1995.

V ESCOLA REGIONAL DE INFORMÁTICA DA SBC REGIONAL SUL, 5., 1997, Florianópolis - SC, Maringá - PR, Santa Maria - RS. **Mini-curso: Heurísticas e Metaheurísticas.** Santa Maria, 1997. 209p .

VELOSO, Paulo et al. **Estruturas de Dados**. Editora Campus. Campus - Rio de Janeiro, 1996.