

PS-924

## METAHEURISTICS FOR NURSING TECHNICIANS MANAGEMENT

Arthur Tórgo Gómez (Universidade do Vale do Rio dos Sinos - RS – Brasil)  
Maira Regina Poltosi (Universidade do Vale do Rio dos Sinos - RS – Brasil) -  
[mpoltosi@etandart.com.br](mailto:mpoltosi@etandart.com.br)

Problems of personnel productivity affect all areas of business, including the health care providers. In the majority of hospitals, the generation of the rosters is a hand-made and time-consuming task and does not always comply with the legislation and the internal rules. In this context, a software for nurse rostering becomes important. This research presents an approach for the rosters generation for the nursing technicians, according to legal and internal restrictions and in a satisfactory computational time. It also aims at giving the employees a higher level of satisfaction concerning their day off preferences and fair distribution of unpopular shifts. The proposal is to apply a Tabu Search metaheuristic combined with Genetic Algorithm. Experiments were carried out with artificial test cases based on real data, since appropriate test cases have not been found in literature. The results are satisfactory showing the solution feasibility.

Keywords: Rostering; Nursening; Tabu Search; Genetic Algorithm; Metaheuristics.

## METAHEURÍSTICAS PARA A GESTÃO DE TÉCNICOS DE ENFERMAGEM

Problemas de produtividade de pessoal afetam todas as áreas de negócio, inclusive a da saúde. Na maioria dos hospitais, as escalas de trabalho são elaboradas manualmente, consumindo muito tempo e nem sempre atendendo a legislação e normas internas. Neste contexto, uma ferramenta computacional para a elaboração das escalas de trabalho do pessoal da saúde torna-se importante. Este trabalho apresenta uma abordagem para a geração de escalas de trabalho para técnicos de enfermagem, de acordo com restrições legais, em um tempo computacional satisfatório. Visando obter maior satisfação dos funcionários, a ferramenta busca atender preferências de folgas e uma justa distribuição dos plantões impopulares. A proposta é aplicar a metaheurística Busca Tabu combinada com Algoritmo Genético. Foram realizados experimentos com casos de teste baseados em dados reais, visto que não foram encontrados casos de teste adequados. Os resultados obtidos são satisfatórios mostrando a viabilidade da solução.

Palavras-chave: Escalas de trabalho; Enfermagem; Busca Tabu; Algoritmo Genético; Metaheurísticas.

## 1. Introdução

Problemas de produtividade e rotatividade de pessoal afetam os custos das empresas. Os provedores de cuidados de saúde também sofrem com estes problemas, sendo que nesta área, o controle de custos não pode comprometer a qualidade do atendimento. Em consequência disso, os hospitais e a classe médica buscam intensivamente medidas efetivas de aumento da produtividade de pessoal. A falta de ferramentas computacionais que gerem resultados condizentes com a realidade, em um tempo computacional aceitável, para a elaboração das escalas de trabalho de pessoal de enfermagem faz com que a maioria dos hospitais e clínicas realizem esta tarefa manualmente. É uma tarefa demorada, visto que as escalas devem atender a legislação, as normas internas das organizações e procurar atender às preferências dos funcionários, requisitos geralmente conflitantes.

Este trabalho propõe um modelo para a geração de escalas de trabalho mensais para os técnicos de enfermagem de um hospital em Porto Alegre. Foram levantadas as regras operacionais do hospital e as restrições da legislação que devem ser atendidas. De modo obter um maior nível de satisfação dos funcionários busca-se atender as preferências de dias de folga e distribuição equitativa dos plantões impopulares.

A literatura sobre o problema de elaboração de escala de trabalho é vasta, como se pode ver em Burke et al (2004b) e Ernst et al (2004a, 2004b). As variações das pesquisas são observadas tanto nas áreas de aplicação e definição do problema como nos métodos de solução empregados: Jaumard et al (1998), Chun et al (2000), Barboza et al (2003), Meisels e Schaerf (2003) e em Özcan (2005).

Devido ao grande número de variáveis e restrições envolvidas, classifica-se como um problema NP-Difícil (Burke et al, 2003). Casos reais do problema têm sido tratados com metaheurísticas: *Simulated Annealing* como em Dowling et al (1997), Busca Tabu em Dowsland (1998) e Burke et al (1998) e Algoritmos Genéticos em Burke et al (2001) e Özcan (2005).

### 1.1. Descrição do problema

A gestão de pessoal abrange o dimensionamento da força de trabalho, a alocação e a designação de tarefas a esta força de trabalho, de acordo com os requisitos internos e externos de uma organização. A elaboração das escalas de trabalho corresponde à etapa de alocação de pessoal a períodos de tempo e, opcionalmente, a locais.

Para prestar atendimento de 24 horas, nos sete dias da semana, a área da saúde adota escala por turnos. Uma escala mensal de enfermagem apresenta a distribuição da equipe de uma enfermagem, considerando todos os dias do mês e os turnos de trabalho: geralmente, manhã, tarde e noite. Na escala, também são registradas as ausências: folgas, férias e licenças.

Por ser um fator que influencia fortemente o nível de satisfação com o trabalho, afetando a retenção e a produtividade dos profissionais, a escala deve atender, da melhor forma possível, as necessidades pessoais de cada funcionário. Para isto deve haver um mecanismo para os funcionários registrarem suas requisições de folga e assim participarem do processo de elaboração da escala.

A escala mensal tem a estrutura de uma matriz bidimensional onde cada linha corresponde à escala de um técnico, também chamada de escala individual, e as colunas representam os

dias do período que está sendo considerado. A Figura 1, a seguir, apresenta um modelo de escala mensal.

**Escala de Trabalho**

Período: abr/maio 2005      Unidade: CTI      Turno: Tarde      Função: Técnicos de enfermagem

Nome	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
Téc 1					F			F								F						F				F					
Téc 2						F									F			F								F	F				F
Téc 3		F		F									F				F	Fe													
Nro.Func.	3	2	3	2	2	2	3	2	3	3	3	3	2	3	2	2	2	1	2	2	2	1	2	2	1	1	2	2	2	1	

Legenda: Ad - Advertência      AT - Acidente de Trabalho      F - Folga  
 AM - Atestado Médico      C - Curso      Fe - Férias  
 AP - Atestado prova      Co - Compensação      L - Licença

**Figura 1** - Modelo de escala mensal.

Na geração da escala mensal, de modo a obter resultados de boa qualidade, devem ser consideradas a legislação trabalhista, normas da instituição, as regras e a dinâmica da enfermagem, características da clientela e da equipe de enfermagem e a humanização da escala. Estes aspectos determinam as restrições que a escala deve atender.

### 1.1.1. Restrições Obrigatórias

As restrições obrigatórias são aquelas que devem ser atendidas para que uma escala seja considerada viável. Neste trabalho foram consideradas como obrigatórias as seguintes restrições:

- Cobertura mínima: As folgas devem ser planejadas de forma garantir o número mínimo necessário de profissionais em assistência, de acordo com a demanda de cada enfermagem/turno/dia;
- Folgas: Deve ser concedido no mínimo o número de folgas obrigatórias por lei para cada técnico. O total de folgas concedidas não pode ultrapassar o número de folgas obrigatórias mais o número de folgas adicionais a que o técnico possa ter direito;
- Disponibilidade: Se em determinado dia o técnico está em licença ou férias, ele não pode ser escalado para o trabalho.

### 1.1.2. Restrições Desejáveis

As restrições desejáveis representam um conjunto de fatores que contribuem para a qualidade da escala resultante. Neste aspecto, são passíveis de relaxação. É praticamente impossível encontrar uma escala que atenda a todos os requisitos desejáveis (BURKE et al, 2004a) e que são frequentemente conflitantes (GASCON et al, 2000). As restrições desejáveis são:

- Solicitações: Representam as datas solicitadas para as folgas;
- Distribuição dos plantões: Distribuir os plantões em dias impopulares (sábados, domingos e feriados) de forma equitativa entre os funcionários.

- Fim-de-semana: Cada funcionário deve receber uma folga em um sábado e em um domingo ou em um sábado e um feriado.
- Folgas adicionais: Horas trabalhadas além da carga horária regulamentar e feriados trabalhados são convertidos em folgas adicionais. Conceder o máximo possível de folgas adicionais que um técnico possa ter direito.
- Intervalo: Respeitar ao máximo o intervalo entre as folgas determinado por lei. Na prática é possível flexibilizar este prazo.
- Cobertura ideal: A preferência é trabalhar com o máximo possível de pessoal alocado. Mas há um número mínimo ideal de pessoal a ser alocado a cada enfermaria/turno/dia.

## 2. Metodologia

Esta pesquisa envolveu a definição de um modelo matemático, o desenvolvimento de uma ferramenta computacional e testes de validação. A seguir são apresentados o modelo matemático, a arquitetura do programa desenvolvido e como as metaheurísticas Busca Tabu e Algoritmo Genético foram aplicadas.

### 2.1 Definição do Modelo Matemático

Os problemas de escalonamento de pessoal são considerados problemas de otimização combinatória(POC). Por otimização entenda-se buscar o maior, ou o menor, resultado de uma função objetivo (FO) cujas variáveis atendem a um conjunto de restrições. Neste modelo a função objetivo (FO) avalia a qualidade da solução indicando o quanto às restrições desejáveis estão sendo satisfeitas. Cada variável de decisão (VD) representa uma penalidade por restrição desejável não atendida, o objetivo é obter a menor soma destas penalidades. A cada uma das VD é atribuído um peso, que influenciará na importância desta variável na FO. Para entendimento da formulação matemática do modelo proposto, segue a lista de símbolos na Tabela 1.

**Tabela 1** – Lista de símbolos da formulação matemática do modelo proposto.

$X$	Representa a solução como o conjunto de todas as variáveis de decisão $x_{ijk}$ .
$F_s(X)$	VD Solicitações – representa a penalidade por folgas solicitadas e não atendidas.
$F_p(X)$	VD Distribuição dos plantões – é o desvio padrão da distribuição dos plantões, aos sábados, domingos e feriados.
$F_f(X)$	VD Fim-de-semana –penaliza a cada técnico que não teve esta requisição atendida.
$F_a(X)$	VD Folgas adicionais – penalidade a cada folgas adicionais de cada técnico não concedidas na escala.
$F_i(X)$	VD Intervalo – penalidade dos intervalos entre folgas que excederam o limite legal, mas ainda dentro da relaxação permitida.

$F_{i+}(X)$	VD Intervalo+ - penalidade dos intervalos entre folgas que excederam o limite legal além da relaxação permitida.
$F_c(X)$	VD Cobertura – representa a penalidade para as ocorrências de cobertura abaixo do mínimo ideal.
$P_s(X)$	Peso da VD Solicitações.
$P_p(X)$	Peso da VD Distribuição dos plantões.
$P_f(X)$	Peso da VD Fim-de-semana.
$P_a(X)$	Peso da VD Folgas adicionais.
$P_i(X)$	Peso da VD Intervalo.
$P_{i+}(X)$	Peso da VD Intervalo+.
$P_c(X)$	Peso da VD Cobertura.
$j$	Indica um tipo de turno de trabalho.
$i$	Representa um técnico.
$k$	É um dia do período da escala.
$x_{ijk}$	É a variável binária cujo valor 1 indica se o técnico $i$ está alocado ao turno $j$ no dia $k$ , 0 caso contrário.
$t$	Indica o número de tipos de turno.
$n$	Representa o número de técnicos.
$p$	É o número de dias do período da escala.
$Rn_{jk}$	É a matriz que contém a necessidade mínima de técnicos para o turno do tipo $j$ no dia $k$ .
$D_{ijk}$	É a matriz binária com a disponibilidade do técnico $i$ no turno $j$ no dia $k$ . Vale 1 se há disponibilidade, 0 se não há.
$O_i$	Vetor que contém o número de folgas obrigatórias para o técnico $i$ .
$A_i$	Vetor que contém o número de folgas adicionais para o técnico $i$ .

A seguinte formulação matemática descreve o modelo proposto:

$$\text{Minimizar } F(X) = P_s \cdot f_s(X) + P_p \cdot f_p(X) + P_f \cdot f_f(X) + P_a \cdot f_a(X) + P_i \cdot f_i(X) + P_{i+} \cdot f_{i+}(X) + P_c \cdot f_c(X) \quad (1)$$

Sujeito a

$$Rn_{jk} \leq \sum_{i=1}^n x_{ijk}, \quad (j=1, \dots, t; k=1, \dots, p); \quad (2)$$

$$x_{ijk} \leq D_{ijk} \quad (i=1, \dots, n; j=1, \dots, t; k=1, \dots, p); \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^t \sum_{k=1}^p (1 - x_{ijk}) \geq O_i, \quad (i=1, \dots, n); \quad (4)$$

$$\left( \sum_{j=1}^t \sum_{k=1}^p (1 - x_{ijk}) \right) - O_i \leq A_i, \quad (i=1, \dots, n); \quad (5)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \quad (i=1, \dots, n; j=1, \dots, t; k=1, \dots, p); \quad (6)$$

As restrições obrigatórias são garantidas pelas formulações de (2) a (6). A restrição (2) garante os requisitos de cobertura mínima. A disponibilidade do técnico é determinada pela restrição (3). A restrição (4) garante que uma pessoa seja alocada a no máximo um turno por dia. O atendimento do número de folgas obrigatórias é verificado pela restrição (4). A equação (5) garante que a concessão das folgas não ultrapasse o número de folgas obrigatórias mais o número de folgas adicionais. Por último, a restrição (6) define a variável binária  $x_{ijk}$  cujo valor 1 indica se o enfermeiro  $i$  está alocado ao turno  $j$  no dia  $k$ , 0 em caso de folga.

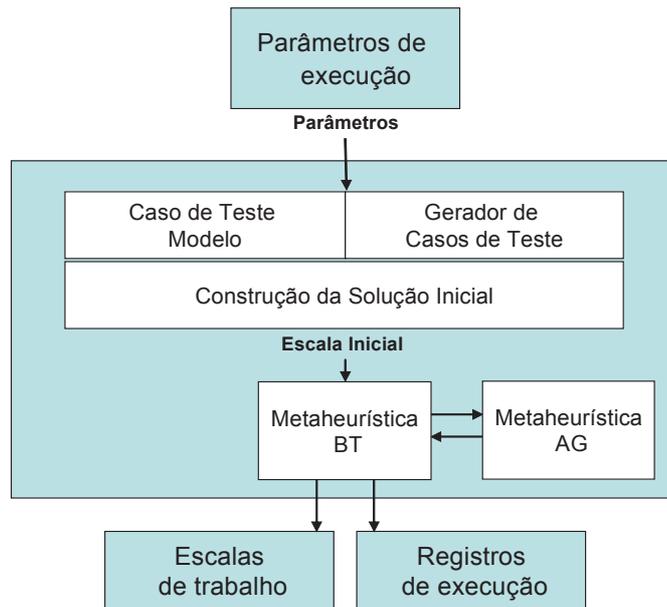
A função objetivo (1) é composta por sete variáveis de decisão, representadas por funções, multiplicadas pelos respectivos pesos. As funções Solicitações, Fim-de-semana, Folgas adicionais, Intervalo e Intervalo+ são calculadas para cada técnico, representados nas linhas da escala. A função Cobertura examina os dias do período da escala, que estão dispostos nas colunas da escala. Por sua vez, a função Distribuição dos plantões avalia a escala de cada técnico em relação aos demais, considerando todos os dias do período, obtendo uma visão completa da escala.

Para separar o problema em subproblemas, reduzindo o espaço de busca (BURKE et al, 2004a) e obter ganhos computacionais e na qualidade da solução final, como sugerido por Blöchliger (2004), as escalas são elaboradas separadamente por enfermaria/turno visto que as equipes são específicas de cada enfermaria e para cada turno.

## 2.2. Arquitetura

O processo de elaboração de uma escala começa com a geração de uma escala inicial, a partir de parâmetros informados: período (mês/ano) para o qual elaborar a escala, número de técnicos, cobertura ideal requerida, relaxação permitida na cobertura, intervalos máximo e mínimo desejado entre as folgas, a relaxação permitida no intervalo máximo e pesos das variáveis da FO. O objetivo é obter uma escala viável, onde apenas os requisitos obrigatórios são atendidos sem preocupação com a qualidade da escala construída. A cobertura diária poderá ser atendida com ou sem relaxamento e apenas as folgas obrigatórias serão concedidas.

Esta escala gerada será a solução inicial para a Busca Tabu (BT). A escala resultante no final da BT é submetida ao Algoritmo Genético (AG), como uma estratégia de diversificação. A escala diversificada realimentará uma nova Busca Tabu para refinamento da solução. Este ciclo termina quando um número de diversificações informado previamente for atingido ou quando o AG não alterar a escala. A Figura 2, a seguir, esquematiza esta arquitetura.



**Figura 2 - Arquitetura do Modelo.**

As informações específicas de cada técnico, como dias de preferência de folgas, última folga do período anterior, número de folgas adicionais e indisponibilidade, são fornecidas pelo caso de teste modelo ou pelo gerador de casos de teste, que simulam dados que na prática seriam obtidos em uma base de dados.

No final do processo, o sistema apresenta a melhor escala obtida, onde está indicado, a cada dia, se os técnicos estarão em assistência ou em folga. Também são expostos o percentual de melhora obtida na função objetivo em relação à escala inicial, o valor de cada parcela que compõem a função objetivo e a melhor iteração da última execução da BT. Durante o processo de busca são gravadas informações que auxiliam no acompanhamento e entendimento do processo.

### 2.3. Busca Tabu

O método de Busca Tabu, sugerido por Glover (1989), é um procedimento iterativo para a solução de problemas de otimização combinatória. Começando com uma solução inicial viável  $s^0$ , a cada iteração é explorado um subconjunto  $V$  da vizinhança  $N(s)$  da solução corrente  $s$ . A solução  $s'$  de  $V$  com melhor valor, segundo a função de avaliação (função objetivo)  $f$ , torna-se a nova solução corrente, mesmo que  $s'$  seja pior que  $s$ . Este critério de escolha é utilizado para escapar de um ótimo local.

Para evitar que o algoritmo retorne a uma solução gerada anteriormente e fique preso em um ótimo local, existe um mecanismo de memória de curto prazo chamado de Lista Tabu. A Lista Tabu clássica mantém os movimentos reversos aos últimos  $|T|$  movimentos realizados e funciona como uma fila de tamanho fixo e disciplina FIFO (*first in - first out*). Portanto, o objetivo dessa lista é tentar evitar movimentos que levem a regiões já visitadas do espaço de soluções. Os últimos movimentos realizados são armazenados nesta lista e permanecem proibidos, com estado tabu, por um dado número de iterações, chamado *tabu tenure*. Assim, na exploração do subconjunto  $V$  da vizinhança  $N(s)$  da solução corrente  $s$ ,

ficam excluídos da busca os vizinhos  $s'$  que são obtidos de  $s$  por movimentos que constam na Lista Tabu.

A Lista Tabu pode proibir movimentos para boas soluções que ainda não foram visitadas. Assim existe um mecanismo que retira, sob certas circunstâncias, o estado tabu de um movimento chamado função de aspiração. O algoritmo Busca Tabu emprega dois critérios de parada do procedimento: a realização do número máximo de iterações sem melhora no valor da melhor solução ( $BT_{max}$ ) ou a aproximação da melhor solução a um limite conhecido.

No modelo proposto, a cada iteração da BT são examinadas duas vizinhanças. A primeira vizinhança atua como uma pequena diversificação da escala uma vez que seus movimentos alternam a escala de um técnico/dia, entre folga e trabalho. Como na construção da solução inicial são atendidas apenas as folgas obrigatórias do período, este movimento visa atender a restrição Folgas adicionais indicando quantas, para quem e quando, folgas adicionais conceder. A cada técnico com direito a receber mais folgas do que já está designado, é verificado para qual dia a concessão de uma folga resulta em uma menor FO. Também é verificado se o número de folgas concedidas para este técnico, é maior que o número de folgas obrigatórias. Em caso positivo, avalia-se o impacto na FO causado pela substituição de cada folga por trabalho. Entre estas duas possibilidades, conceder ou retirar folga, o movimento que resultar na menor FO é realizado na escala.

A segunda vizinhança é gerada por movimentos de troca (*swap*). São avaliadas todas as trocas entre as escalas diferentes (folga ou trabalho), de cada técnico/dia diferentes, de acordo com a disponibilidade dos técnicos e que resultem em escalas viáveis, ou seja, atendem os requisitos de cobertura e o número de folgas concedidas a cada técnico não é menor que o número de folgas obrigatórias nem maior que o número de folgas obrigatórias mais às folgas adicionais. A cada iteração, é realizado na escala o movimento que resultar na menor FO.

## 2.4. Algoritmo Genético

Esta metaheurística é inspirada na metáfora dos mecanismos evolucionários encontrados na natureza. Usualmente, uma população inicial é gerada aleatoriamente ou através de alguma heurística. Como no caso biológico, não há evolução sem diversidade. Desta forma é importante que a população inicial cubra a maior área possível do espaço de busca, com um maior número de soluções, sem importar se são viáveis ou não.

Os operadores genéticos são as regras que permitem a manipulação dos indivíduos da população (cromossomos). A operação de *crossover*, cruzamento ou recombinação, é um processo sexuado, ou seja, envolve mais de um indivíduo, que permite a obtenção de filhos a partir da troca de fragmentos de cromossomos dos pais. Existem várias modos de realizar este cruzamento. A operação de mutação cria um novo indivíduo por alteração nos cromossomos. Basicamente, é selecionada uma posição num cromossomo e o valor do gene é alterado. Como critério de parada, normalmente é utilizado o critério do número máximo de gerações.

Os algoritmos genéticos têm sido utilizados na solução de problemas de escalonamento de pessoal, subproblemas e variantes, especialmente escalas de trabalho de enfermeiros e tripulações de ônibus como consta em ERNST et al (2004a). Neste modelo o AG é aplicado como uma forma de diversificação mais agressiva que o movimento de diversificação realizado na BT. Enquanto o movimento da BT altera a escala de um

técnico/dia, o AG troca várias escalas técnico/dia buscando atingir regiões do espaço de soluções que os movimentos da Busca Tabu não alcançaram. Segundo Burke (2004a) “A eficiência da Busca Tabu pode ser aumentada aplicando diversificação”.

Neste modelo, o AG implementado seleciona a população inicial da escala resultante da BT, sendo a escala de cada técnico um candidato a indivíduo desta população. Cada escala individual é um cromossomo e cada dia é um gene. Serão selecionadas as escalas individuais com o valor da função Solicitações maior que um (mais de uma data de folga solicitada não atendidas) e/ou com o valor da pena Fim-de-semana igual ao um (técnico não tem folgas em um sábado e em um feriado ou em um sábado e em um domingo). O parâmetro Tamanho da População limita o número máximo de indivíduos que serão selecionados. O AG prossegue se no mínimo dois indivíduos forem selecionados.

A cada iteração, são selecionados dois indivíduos da população inicial, que ainda não cruzaram entre si. Chamaremos estes indivíduos de pai 1 e pai 2, a partir dos quais será criada uma população de filhos. Não é aplicada função de adaptabilidade específica para selecionar os pais, mas todos os indivíduos da população inicial foram selecionados previamente de acordo com as regras expostas acima.

A probabilidade de cruzamento é de 100% e a de mutação é de 0%. O parâmetro número de gerações indica quantos cruzamentos devem ser realizados. A cada cruzamento é gerado aleatoriamente um ou dois pontos de corte e os pais são combinados gerando filhos.

Após as gerações, é verificado se algum filho substitui o pai 1 com diminuição no valor da FO. Em caso positivo, o pai é substituído pelo filho que promover a maior redução no valor da FO e é eliminado da população inicial, caso contrário o pai permanece para futuros cruzamentos. Este mesmo processo de substituição é repetido para o pai 2. Todos os filhos gerados são descartados e o algoritmo retorna a selecionar dois pais da população inicial.

O processo de cruzamento termina quando não há mais um mínimo de dois indivíduos na população inicial que ainda não cruzaram entre si, ou ainda, quando os indivíduos restantes já cruzaram entre si, mas não obtiveram melhoria na FO.

### 3. Experimentos e resultados

Os experimentos foram realizados em um computador com processador Intel 1.66 GHz Duo Core e 1 Gb de RAM, com o sistema operacional Windows XP Professional Versão 2000 *Service Pack 2* em velocidade de processamento Normal. A aplicação foi desenvolvida em uma *thread*, utilizando apenas um processador.

A falta de casos de teste padronizados, devido às variações nos modelos propostos e de resultados reconhecidos, dificulta a comparação dos resultados deste trabalho. Como casos de testes têm sido utilizados geradores de casos de teste aleatórios como em Özcan (2005), casos artificiais baseadas em dados reais, em Dowsland (1998) ou dados de casos reais como em Burke et al (1998; 2001; 2003; 2004a). Neste trabalho foi utilizado um caso de teste artificial baseado em dados reais coletados em um grande hospital de Porto Alegre.

Para obter uma solução não-tendenciosa (SNT), em que cada VD contribui da mesma forma que as demais na FO, os pesos das parcelas da FO foram calibrados, normalizando os valores que cada parcela pode assumir. Para tanto, o aplicativo foi executado 50 vezes aplicando apenas a BT. Todas execuções usaram os mesmos parâmetros, exceto os pesos que receberam valores inteiros gerados aleatoriamente seguindo uma distribuição normal

de 0 a 100. O processo foi repetido para cada mês, com o mesmo caso de teste, parâmetros e pesos gerados.

Para cada mês foi calculada a proporção de cada variável em relação a variável Intervalo+ que apresentou, em todos os meses, o maior valor. A proporção foi calculada pela divisão da média amostral da variável Intervalo+ pela média amostral das demais variáveis. Finalmente foi calculada a média aritmética dos valores obtidos nos doze meses para compor um conjunto de pesos representativos para a SNT.

As seguintes condições foram aplicadas em todos os experimentos: 20 técnicos, sendo um técnico indisponível por todo o período devido à licença e três profissionais ausentes por quinze dias, em férias. Para todos os dias a cobertura mínima ideal é de 14 técnicos permitindo o relaxamento na cobertura de uma pessoa, As variáveis da FO com pesos para uma solução não tendenciosa, tamanho da lista tabu em 10 e o número máximo de iterações na BT sem melhoria igual a 50, intervalo entre folgas máximo de seis dias e mínimo de quatro dias. É especificado quando o teste executou a diversificação com o AG.

Informações específicas de cada técnico como datas de folgas solicitadas, data da última folga no período anterior e disponibilidade são fornecidas pelo caso de teste, simulando dados que, na prática, seriam obtidos de uma base de dados.

### 3.1. Privilegiando variáveis de decisão

Alterando os valores dos pesos é possível anular ou privilegiar a participação das variáveis de decisão na função objetivo. A fim de avaliar o comportamento das demais variáveis quando uma é privilegiada, o modelo foi executado seis vezes para cada variável, com o valor do peso SNT da variável privilegiada multiplicado por 1, 2, 5, 10, 50 e 100 a cada execução.

Os comportamentos mais significativos que observados foram:

- Ao privilegiar as variáveis Folgas adicionais e Solicitações de folgas prejudica-se a variável Cobertura ideal;
- O favorecimento da variável Distribuição dos plantões lesa a variável Fim-de-semana e Folgas adicionais. Neste caso, como a variável Cobertura ideal tem comportamento inversamente proporcional ao da variável Folgas adicionais, é favorecida junto a variável Distribuição dos plantões;
- A variável Intervalo privilegiada sobrecarrega a variável Intervalo+ e a recíproca também é verdadeira. Estas duas variáveis quando privilegiadas prejudicam as variáveis Fim-de-semana, Folgas adicionais e Distribuição dos plantões.

Analisando os resultados com os testes com variáveis privilegiadas, confirma-se a dificuldade em elaborar uma escala de trabalho: há muitos conflitos.

### 3.2. Influência da Variação dos Meses

Gerando escalas nas mesmas condições de teste para cada mês, foram verificadas diferenças significativas no número de iterações realizadas na BT, na FO resultante e no percentual de melhoria obtidos.

O problema abordado trata do escalonamento dos dias de folgas. O número de dias de folga é calculado com base no número de domingos e de feriados que acontecem em cada

mês, nota-se então, a influência do período de planejamento sobre a escala. Para comprovar este fato foi calculado um índice denominado de “grau de dificuldade”, que é proporção do número de dias de folgas pelo número de dias “não-folgas” do mês - número de dias do mês menos o número de folgas deste mês. A Tabela 2 apresenta, para cada mês, os resultados obtidos nas escalas e o grau de dificuldade calculado.

**Tabela 2** - Resultados obtidos mês a mês para o ano de 2007.

<b>Meses</b>	<b>Melhor Iteração</b>	<b>FO Obtida</b>	<b>% Melhoria</b>	<b>Grau de dificuldade</b>
<b>Janeiro</b>	58	269,8919	67,72	19,23%
<b>Fevereiro</b>	45	359,8236	48,84	27,27%
<b>Março</b>	38	231,8952	74,81	14,81%
<b>Abril</b>	41	504,8702	41,18	30,43%
<b>Mai</b>	56	261,209	68,42	19,23%
<b>Junho</b>	104	191,4687	75,01	20,00%
<b>Julho</b>	76	229,5414	74,35	19,23%
<b>Agosto</b>	41	325,5816	61,14	14,81%
<b>Setembro</b>	107	425,6445	43,9	30,43%
<b>Outubro</b>	98	298,7984	65,13	19,23%
<b>Novembro</b>	41	311,5793	57,85	25,00%
<b>Dezembro</b>	37	225,0171	54,15	24,00%

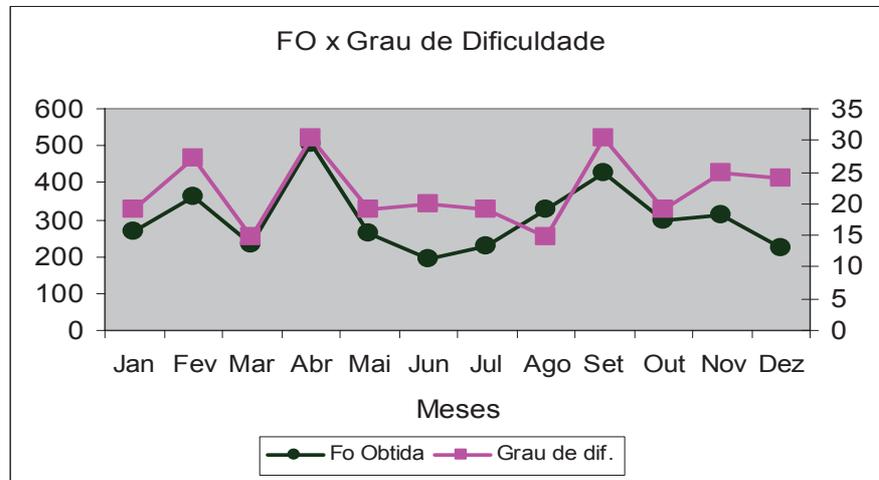
Quanto mais domingos e feriados ocorrem no período, mais folgas devem ser distribuídas e fica mais difícil conseguir atender as restrições de cobertura. Outro fator que atua em conjunto com o número de dias de folga é o número de dias do período, que pode ser de 28 a 31 dias. Quanto mais longo o período, mais fácil distribuir as folgas e maior o espaço de soluções.

A quantidade de sábados em um mês, além dos domingos e feriados no período, também exerce influência. Se por um lado um maior número de domingos e feriados dificulta a satisfação da restrição de cobertura, por outro, o maior número de sábados, domingos e feriados facilita o atendimento às restrições de Fim-de-semana e Distribuição dos plantões.

A correlação entre o grau de dificuldade e a variável Folgas adicionais é de 0,9354, entre o grau de dificuldade e a variável Cobertura, a correlação é de 0,9129. Por sua vez, as correlações entre as variáveis Solicitações e Distribuição dos plantões com o grau de dificuldade apresentam um comportamento inversamente proporcional, sendo de -0,7434 e -0,8286, respectivamente.

O comportamento da FO obtida em relação ao grau de dificuldade é apresentado no gráfico abaixo, Figura 3. A linha referente ao grau de dificuldade está associada à escala da direita. A correlação da FO com o grau de dificuldade é de 0,72. Mesmo que a correlação de algumas variáveis com o grau de dificuldade sejam inversas, a tendência é uma relação

diretamente proporcional. Para as demais variáveis, as correlações se situam no intervalo de -0,7 a 0,7, sendo consideradas menos significativas.



**Figura 3** - Comportamento da FO e Grau de dificuldade.

Cabe observar que o número de sábados, domingos e feriados móveis de cada mês são diferentes de um ano para outro, portanto os graus de dificuldade também se alteram a cada troca de ano.

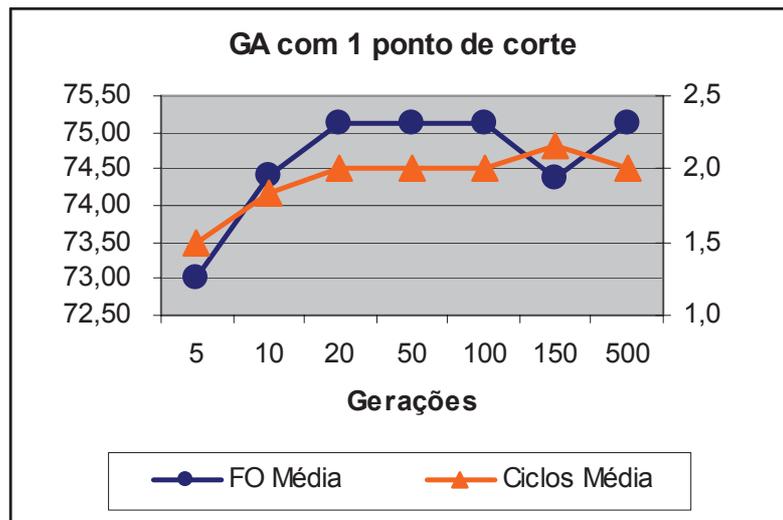
### 3.3. Experimentos com BT e AG

Nos experimentos para calibração dos parâmetros da BT, o melhor resultado foi obtido com  $BT_{max}$  igual a 50 e Lista Tabu comportando 30 movimentos. Neste caso, a melhoria foi de 70,8875%. A partir desta calibragem, foram realizados experimentos ativando a diversificação pelo AG, para avaliar o desempenho em termos de ganho na FO e impacto no tempo de processamento. Devido ao uso de pontos de corte gerados aleatoriamente, cada teste foi executado 10 vezes e considerada a média aritmética dos resultados obtidos.

#### 3.3.1. AG com 1 ponto de corte

O melhor resultado alcançado, melhoria de 75,1331%, um ganho de quase 4,25 pontos percentuais em relação ao melhor resultado obtido sem executar o AG.

Apesar que, com 1 ponto de corte, a cada geração são criados apenas 2 filhos, não é preciso um alto número de gerações para se obter os melhores resultados. O ponto de corte deve ser um número entre 1 até 30, dependendo do número de dias do período em planejamento, e se ambos pais estão disponíveis em todo o período. Com um alto número de gerações, o ponto de corte tende a se repetir, gerando filhos iguais a outros já existentes. Não promovendo maior diversidade, não promove ganhos. Portanto um número mais alto de gerações não garante melhor resultados. Este comportamento é visível na Figura 4, onde se verifica que o mesmo resultado é obtido com 20 e 500 gerações.



**Figura 4** - Resultados obtidos com AG de 1 ponto de corte.

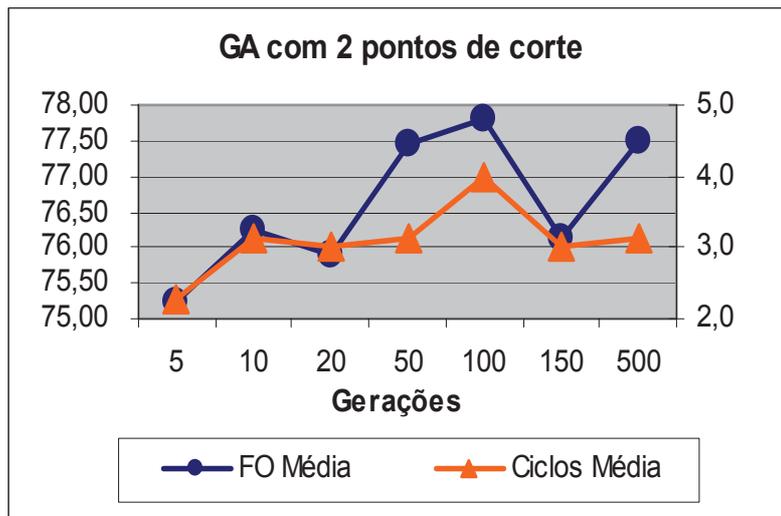
Em um dos experimentos com 150 gerações foi executado o maior número, 3, de ciclos BT-AG, mas a FO resultante não foi a melhor. Apesar disto a correlação entre o número de ciclos executados e a FO obtida é significativa: 0,79. No gráfico acima, a linha referente ao número médio de ciclos está associada a escala da direita.

### 3.3.2. AG com 2 pontos de corte

Aplicando 2 pontos de corte no AG, são criados 6 filhos a cada geração, aumentando a possibilidade de se obter melhores resultados. Como esperado, foram obtidas melhorias de até 80,55%, sendo 77,79% na média.

O número de ciclos BT-AG executados também aumentou. Em alguns experimentos foram realizados 6 ciclos. Nestes testes, a correlação entre a FO e o número de ciclos executados é de 0,81.

Com 1 ponto de corte o melhor resultado foi obtido com apenas 20 gerações, e neste caso, com 100 gerações. Porém, um maior número de gerações não garante melhores resultados, como podemos observar na Figura 5. A linha referente ao número médio de ciclos está associada a escala da direita.



**Figura 5** - Resultados obtidos com AG de 2 pontos de corte.

### 3.4. Validação do Modelo

O desempenho da arquitetura foi testado com o caso de teste com 20 técnicos para um mês completo, de 28 a 31 dias. Nos trabalhos de Özcan (2005) e Burke et al (1998, 2003) também são utilizados casos de testes com 20 enfermeiros, sendo no primeiro para 14 dias e nos demais para 4 semanas, 28 dias. O hospital pesquisado não possui atualmente equipes maiores que 30 pessoas para um turno de uma enfermaria.

O tempo médio de execução, sem a diversificação com o AG, é de 18 minutos, variando de 10 a 26 minutos, dependendo do grau de dificuldade do mês. Este resultado é compatível com os tempos encontrados, para o caso de 20 enfermeiros, testados em Burke et al (1998, 2003), considerando as diferenças entre os modelos e a capacidade de processamento.

Foi criado um caso de teste para representar a situação de uma escala real: 13 técnicos, 2 ausentes o período todo, período de 31 dias, 4 sábados, 4 domingos e um feriado. Informações como data da última folga e número de folgas adicionais foram obtidas da escala do período anterior. A FO calculada para a escala real é de 417,9768 e a execução deste caso de teste pelo modelo atingiu um resultado de 122,1758. O modelo conseguiu reduzir sensivelmente as penalidades, exceto as solicitações de folga, que é uma variável bastante privilegiada no processo manual de elaboração da escala. O tempo de execução foi de 7'45''. Os resultados obtidos estão resumidos na Tabela 3.

Nesta avaliação foram utilizados os pesos SNT. Lembramos que é possível aumentar o privilégio das variáveis de decisão alterando o respectivo peso.

O modelo foi executado ativando o AG com um ponto de corte, variando de 50 a 100 gerações e com o AG com dois pontos de corte, variando de 100 a 150 gerações, mas nenhuma das variações do AG obteve melhorias.

**Tabela 3 - Avaliação escala real.**

	<b>Escala Obtida</b>	<b>Escala Real</b>
<b>Solicitações</b>	27,63177	3,98449
<b>Distrib. dos Plantões</b>	0	32,76162
<b>Fim-de-semana</b>	0	57,8366
<b>Intervalo</b>	0	147,042
<b>Intervalo +</b>	5	28
<b>Folgas Adicionais</b>	55,666	89,0656
<b>Cobertura</b>	33,878	59,2865
<b>FO obtida</b>	122,1758	417,9768

#### 4. Conclusão

Foi proposto um modelo para a elaboração de escalas de trabalho mensais para os técnicos de enfermagem, de acordo com as regras operacionais do hospital e as restrições da legislação e promovendo maior satisfação dos funcionários com as suas escalas. É uma ferramenta importante para o gerenciamento da parcela mais significativa dos funcionários da área da saúde.

O modelo desenvolvido combina Busca Tabu com Algoritmo Genético explorando o refinamento realizado pela BT e a diversificação promovida pelo AG para obter os melhores resultados. Os testes realizados mostraram que o modelo é robusto, condizente com a realidade, produz escalas de qualidade muito superior às construídas manualmente e em um tempo computacional razoável.

Foi possível verificar os muitos conflitos existentes entre as variáveis da FO: ao privilegiar Folgas adicionais ou Solicitações prejudica-se a variável Cobertura ideal, ao equilibrar os plantões nos finais de semana se afeta as folgas de fim-de-semana e a variável Folgas adicionais. As variáveis Intervalo e Intervalo+ conflitam entre si e quando privilegiadas prejudicam as variáveis Fim-de-semana, Folgas adicionais e Distribuição dos plantões.

Um fator externo que exerce alta influência sobre as escalas de trabalho é o mês para a qual a escala está sendo elaborada devido ao número de dias de folga que é calculado com base no número de domingos e de feriados que acontecem em cada mês. Soma-se a isso a diferença do número de dias de cada mês. Em meses mais curtos e com mais domingos e/ou feriados, como exemplo fevereiro e abril, é mais difícil de distribuir as folgas mantendo a cobertura mínima.

O desempenho da BT se mostrou muito bom, visto que a cada exploração de vizinhança é realizado um alto número de movimentos, apesar de que poucos são viáveis. O AG, por sua vez, surpreendeu pela rapidez e pela melhoria obtida. Mesmo com apenas 1 ponto de corte a melhoria obtida é significativa. Com 2 pontos de corte os resultados são ainda melhores mas o tempo de processamento aumenta pois o número de execuções do ciclo BT-AG é maior.

A falta de casos de teste padronizados, devido às variações nos modelos propostos, e de resultados reconhecidos, dificulta a comparação dos resultados desta pesquisa com outras. Para os experimentos foram utilizados um caso de teste modelo baseado em dados reais. Com os pesos da solução não-tendenciosa foi possível obter ótimos resultados em relação às escalas reais, ainda mais considerando que na prática, poucas destas escalas chegam a ser viáveis. O modelo foi validado com uma escala real onde se mostrou muito superior.

É um problema combinatório realmente muito complexo, cabe aos administradores definirem quais variáveis privilegiar. O modelo oferece esta flexibilidade, tanto permitindo a alteração dos pesos como de parâmetros que configuram os limites de relaxamento aceitos.

### Referência Bibliográfica

- Barboza, A.O., Carnieri, C., Steiner, M.T.A e Siqueira, P.H.** (2003), Técnicas da Pesquisa Operacional no Problema de Horários de Atendentes em Centrais Telefônicas, *Gestão & Produção* v.10 n.1, 109-127.
- Blöchliger, I.** (2004), Modeling Staff Scheduling Problems. A Tutorial, *European Journal of Operational Research* v.158 p.533-542.
- Burke, E.K., Causmaecker, P.D. e Berghe, G.V.**, A Hybrid Tabu Search Algorithm for the Nurse Rostering Problem, em *Simulated Evolution and Learning*, B. McKay et al. (Eds.), *Lecture Notes in Artificial Intelligence* v.1585, Springer, 187–194, 1998.
- Burke, E.K., Causmaecker, P.D. e Berghe, G.V.** (2001), A Memetic Approach to the Nurse Rostering Problem, *Applied Intelligence* 15, 199–214, Kluwer Academic Publishers.
- Burke, E.K., Causmaecker, P.D., Petrovic, S. e Berghe, G.V.**, Variable Neighbourhood Search for Nurse Rostering Problems, em *Metaheuristics: Computer Decision-Making*, M .G.C. Resende e J. P. de Sousa (Eds.), Kluwer Academic Publishers, 153-172 , 2003.
- Burke, E.K., Causmaecker, P.D., Berghe, G.V. e Landeghem, H.V.**, Novel Metaheuristic Approaches to Nurse Rostering Problems in Belgian Hospitals. J. Leung (Ed.), *Handbook of Scheduling: Algorithms, Models and Performance Analysis*, CRC Press, 44.1–44.18, 2004a.
- Burke, E.K., Causmaecker, P.D., Berghe, G.V. e Landeghem, H.V.** ( 2004b), The State of the Art of Nurse Rostering, *Journal of Scheduling*, v.7 n.6, 441– 499.
- Chun, A.H.W., Chan, S.H.C., Lam, G.P.S., Tsang, F.M.F., Wong, J., e Yeung, D.W.M.** (2000), Nurse Rostering at the Hospital Authority of Hong Kong, *Atas do 17th National Conference on AAAI and 12th Conference on IAAI*, 951-956.
- Dowling, D., Krishnamoorthy, M., Mackenzie, H. e Sier, D.** (1997), Staff rostering at a large international airport, *Atas de Operations Research* v.72, 125–147.
- Dowland, K. A.** (1998), Nurse scheduling with tabu search and strategic oscillation, *European Journal of Operational Research* v.106 ,393-407.
- Ernst, A., H. Jiang, M. Krishnamoorthy e Sier, D.**(2004a), Staffing Scheduling and Rostering: A Review of Applications, Methods and Models, *European Journal of Operations Research* 153, 3–27.
- Ernst, A., H. Jiang, M. Krishnamoorthy, Owens, B. e Sier, D.** (2004b), An Annotated Bibliography of Personnel Scheduling and Rostering, *Atas de Operations Research* v.127.

**Gascon, V., Villeneuve, S., Michelon, P. Ferland, J.A.** (2000), Scheduling the Flying Squad Nurses of a Hospital Using a Multi-Objective Programming Model. *Anais do Operations Research* v.96, p.149–166.

**Glover, F.** (1989), Tabu Search – parte 1, *ORSA Journal on Computing* v.1 n.3.

**Jaumard, B., Semet, F., Vovor, T.** (1998), A generalized linear programming model for nurse scheduling, *European Journal of Operational Research* v. 107, 1-18.

**Meisels, A., Schaerf, A.** (2003), *Modelling and Solving Employee Timetabling Problems*, Atas de Mathematics and Artificial Intelligence, Kluwer Academic Publishers, 41–59.

**Özcan, E.** (2005), Memetic Algorithms for Nurse Rostering. Atas de 20th International Symposium on Computer and Information Sciences, Istambul.