

Minimização da Poluição do Piloto em sistemas CDMA aplicando Algoritmo Genético

Sebastián Espinosa Rueda e Paulo Roberto Rosa Lopes Nunes

Resumo— Nos sistemas CDMA, a existência de um grande número de sinais de pilotos com a mesma intensidade dentro de uma área geográfica (Poluição do Piloto) não é desejável porque degrada o desempenho do sistema. O objetivo deste trabalho é solucionar este problema minimizando a Poluição do Piloto dentro de uma região determinada, procurando, ao mesmo tempo, minimizar o número de usuários sem cobertura. O problema resultante é multi-objetivo, sugerindo a utilização de um Algoritmo Genético (AG). O AG utiliza as alturas das antenas das estações-base na representação do cromossoma. O resultado consegue eliminar a maior parte da poluição, recomendando modificações no sistema para produzir resultados mais próximos ao ótimo.

Palavras-Chave— Algoritmos Genéticos, CDMA, Otimização, Problema Multi-Objetivo, Poluição do Piloto.

Abstract— In CDMA cellular systems the existence of a quite big number of pilot signals with the same signal strength inside a geographical area (Pilot Pollution) is not a desirable issue, because it causes degradation of system performance. The main objective of this article is to find a solution to this problem minimizing Pilot Pollution inside a delimited area, looking for the minimization of the number of users without any coverage, at the same time. The problem is multi-objective and suggests use of a Genetic Algorithm (GA) approach. The GA uses the height of antennas of the different base-stations in the chromosome representation. The results can eliminate most of the Pilot Pollution, suggesting some system modifications to reach the optimum.

Keywords— Genetic Algorithms, CDMA, Optimization, Multi-Objective Problem, Pilot Pollution.

I. INTRODUÇÃO

O planejamento e otimização dos sistemas celulares baseados em tecnologia CDMA estão sustentados em simulações, dados estatísticos da rede e dados coletados em campo. A otimização do sistema é uma tarefa complexa e custosa, em função do tempo requerido, se for feita de maneira manual. Um dos maiores desafios é a minimização do fenômeno chamado Poluição do Piloto (*Pilot Pollution*) que é causador da degradação dos indicadores chave de desempenho do sistema tais como bloqueio e queda das ligações. Diferentemente das tecnologias D-AMPS e GSM, cuja otimização é baseada apenas em função da cobertura, em CDMA deve necessariamente ser considerado o tráfego

gerado pelos usuários do sistema. Isto torna a otimização um processo Multi-Objetivo. Os Algoritmos Genéticos (AG) têm sido utilizados com bastante sucesso no tratamento da otimização multi-objetivo, fornecendo soluções automáticas, rápidas e eficientes. Os trabalhos disponíveis na literatura [1], [2], empregam os AGs principalmente no posicionamento das estações rádio-base (ERBs) para maximizar a cobertura dentro de um área específica. Nos últimos anos as empresas operadoras do serviço de telefonia celular têm instalado novas redes empregando as facilidades já existentes (*co-siting*). A abordagem feita neste trabalho está baseada em um *co-siting*, onde as coordenadas das ERBs são fixas, tendo como objetivo a minimização da Poluição do Piloto, maximizando a cobertura reversa (*uplink*) dos usuários dentro uma área geográfica com diferentes densidades de tráfego.

A. Organização do Artigo

O restante deste trabalho é organizado como apresentado a seguir. A descrição do problema, parâmetros do sistema e condições de teste são apresentados na Seção II. Na Seção III é apresentada a aplicação do algoritmo genético, representação do cromossoma e a descrição da avaliação e aptidão dos indivíduos. Na Seção IV estão os testes e resultados obtidos na resolução do problema. Finalmente, na Seção V, são apresentadas algumas conclusões e propostas de tarefas futuras.

II. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

A. Poluição do Piloto em sistemas CDMA

Dentro do processo de inicialização do terminal CDMA, uma estação móvel (EM) adquire o canal piloto geralmente da ERB mais próxima, i.e. aquela que tem melhor relação E_c/I_o (Energia de Chip / Interferência) frente às outras ERBs, e que supera um determinado limiar. Os receptores Rake da EM permitem o processamento do sinal por até 3 pilotos, que pertencem à chamada lista de pilotos ativos [3]. Devido à convivência em *co-siting*, as ERBs podem originar a presença de um número não desejado de pilotos numa área específica, degradando a qualidade da comunicação.

A proposta apresentada neste trabalho é a otimização do sistema estabelecendo como objetivo maximizar a área de cobertura das ERBs minimizando as áreas onde existe poluição de piloto. Na literatura [4], [5], existem trabalhos onde diferentes variáveis são consideradas dentro da otimização, tais como tipo, azimuth e inclinação (*tilt*) das antenas; coordenadas das ERBs; potência do sinal piloto e até modificação dos parâmetros internos do padrão (lista de vizinhanças e parâmetros de *soft-handoff*, entre outros). Para

simplificar a abordagem descrita neste artigo, as alturas das antenas de cada uma das ERBs foram considerados parâmetros variáveis, deixando os demais parâmetros do padrão constantes. Assim, o raio de cobertura das ERBs pode ser regulado com a altura da antena de cada ERB. Ao maximizar a área de cobertura, é preciso considerar a quantidade de usuários que podem estabelecer uma ligação com a estação rádio-base. O conceito de *soft-capacity* é introduzido para determinar a quantidade de tráfego em Erlangs que a ERB pode suportar sem bloquear o acesso aos usuários. Finalmente, define-se um mapa de tráfego, que corresponderá ao comportamento dos usuários dentro de unidades de área pré-definidas chamadas *bins*. Assim, o mapa poderá descrever as regiões onde existem mais usuários e, portanto onde existe maior demanda de tráfego.

B. Raio de cobertura no Enlace Reverso (Uplink)

Para determinar o raio de cobertura das estações rádio-base devem ser considerados vários parâmetros próprios de um sistema CDMA IS-95 que opera em uma área urbana garantindo cobertura em exteriores (*outdoor*). A perda de propagação foi caracterizada pelo modelo de Okumura-Hata com variação log-normal [6], [7]. Os parâmetros de funcionamento do sistema estão descritos nas Tabelas I e II

TABELA I

REQUISITOS DO SISTEMA

Frequência de Operação [Mhz] - f_c	800
Largura de Banda [Hz] - W	1228800
Taxa de Voz [Kbps] - R	14,400
Ganho de Processamento - $G_{14,4}$	85,333
E_b/I_o [dB]	6
Fator de Atividade da Voz - α	0,400
Ganho de Handoff [dB] - G_{HO}	4
Fator de Interferência Externa (Omni-Direcional) β	0,600
Porcentagem Cobertura Outdoor	0,900
Fator de Carga ERB - μ	0,600
Altura ERB [m] - H_{ERB} (variável)	30
Altura EM [m] - H_{EM}	1,500
Desvio padrão outdoor (margem cobertura) [dB]	10
Constante De Propagação - γ	3,522

O sistema oferece o serviço de voz com uma taxa de 14,4 Kbps na saída do vocoder (*Rate Set 2*). O Ganho de Processamento ($G_{14,4}$) é a razão entre a Largura de Banda (W) e a Taxa de Voz (R). O Fator de Atividade da Voz (α) representa a porcentagem de tempo que um usuário normalmente fala numa ligação telefônica, entre 40 e 50%. A razão entre a Energia de Bit e a Densidade da Potência do Ruído (E_b/I_o) é considerada por [3] como requisito de qualidade do enlace para atingir uma taxa de erro de quadro de 1%. O Fator de Interferência Externa (β) numa célula qualquer é a razão entre a interferência originada nas outras células do sistema e a interferência originada na mesma célula [7]. Para células omni o valor é de 0,6.

Assim, o número máximo de usuários M_{MAX} por setor, é dado por:

$$M_{MAX} = \left[\frac{G_{14,4}}{\alpha(E_b/I_o)} \frac{1}{(1+\beta)} \right] + 1. \quad (1)$$

TABELA II

PARÂMETROS DA ERB E EM

	ERB	EM
Potência máxima transmissor [dBm] - $P_{TX\ ERB}$ (na ERB), $EIRP$ (na EM)	36	28
Perda cabos [dB] - L_{ERB}	2	0
Ganho antena [dB] - G_{ANT}	10	0
Ganho diversidade [dB] - G_{DIV}	3	0
Figura de ruído [dB] - F_N	6	6
Porcentagem do piloto	20%	Não se aplica
Margem desvanecimento - M_F	7,700	Não se aplica

O limiar da potência na recepção é dado por:

$$P_{RX\ LIMIAR} = -174 + 10 \log(W) + F_N - 10 \log[\alpha(1+\beta)(1-\mu)M_{MAX}]. \quad (2)$$

O nível mínimo de sinal necessário para a operação da EM, RSL_{MIN} é dado por:

$$RSL_{MIN} = P_{RX\ LIMIAR} - G_{ANT} + L_{ERB}. \quad (3)$$

A perda por propagação (L_O), segundo o modelo de Okumura-Hata é:

$$L_O = b + c \log(f_c) - 13,83 \log(H_{ERB}) - 3,2 (\log 11,75 H_{EM})^2 + 4,97, \quad (4)$$

onde $b = 69,55$ e $c = 26,16$ para $f_c = 800$ MHz.

O nível de sinal RSL_{MIN} também está em função do raio máximo de cobertura r_{MAX} da célula, assim

$$RSL_{MIN} = EIRP - L_O - 10\gamma \log r_{MAX} - M_F + G_{HO} + G_{DIV}, \quad (5)$$

de onde temos:

$$r_{MAX} = 10^{\left[\frac{EIRP - RSL_{MIN} - L_O - M_F + G_{HO} + G_{DIV}}{10\gamma} \right]}. \quad (6)$$

C. Capacidade da estação rádio-base (Soft Capacity)

A carga oferecida pela estação base em Erlangs no enlace reverso [ρ], deve considerar a probabilidade de bloqueio - $P_{bloqueio}$ (2%) e pode ser determinada pelas seguintes equações [3]

$$\rho = \frac{(W/R)(0,9)}{(E_b/I_o)\alpha(1+\mu)} f(B, \delta), \quad (7)$$

onde

$$f(B, \delta) = \frac{1}{\delta} \left[1 + \frac{\delta^3 B}{2} \left(1 - \sqrt{1 + \frac{4}{\delta^3 B}} \right) \right], \quad (8)$$

sendo que

$$B = \frac{(E_b / I_o) [Q^{-1}(P_{\text{bloqueio}})]^2}{(W / R)(0,9)}, \quad (9)$$

$$\delta = \exp(B^2 \sigma^2 / 2), \quad (10)$$

onde σ é o desvio padrão da potência no enlace reverso, igual a 2,5 dB.

Assim, a *soft-capacity* da ERB ficou determinada em 21,32 Erlangs. Este valor é comparado com a quantidade de Erlangs gerada pelos usuários (L_T) que têm cobertura da ERB. Se L_T for maior que ρ a ERB é penalizada por capacidade (ver Seção II-G).

D. Determinação do Mapa de Tráfego

O mapa de tráfego especifica o tráfego médio gerado pelos usuários em cada *bin*, e é determinado inicialmente empregando simulação Monte Carlo. A probabilidade de ter n_i usuários no *bin* i , $P(n_i)$, é dada pela distribuição de Poisson

$$P(n_i) = \frac{a_i^{n_i}}{n_i!} e^{-a_i}, \quad (11)$$

onde a_i é o tráfego médio oferecido em cada *bin*. Conforme a distribuição de usuários experimental [usuários/bin] determinada no mapa de tráfego empregado, o tráfego gerado por usuário foi de 3 mE.

E. Condições de teste

Um sistema IS-95 foi simulado conforme as equações (1) a (11) para uma área de 50 km² que representa parte de uma região urbana com aproximadamente 30 mil usuários divididos em 2500 *bins* com diferentes quantidades de usuários por *bin*, representando áreas com maior e menor demanda de tráfego. Foram consideradas 25 ERBs com alturas das antenas iniciais de 30 e 35 metros. Foi calculado o raio de cobertura de cada uma e a quantidade de usuários com cobertura de uma ou mais ERBs em cada *bin*. Os usuários cujos *bins* estão cobertos por mais de três ERBs têm poluição do piloto.

F. Funções Custo

As funções custo representam como os objetivos de otimização são avaliados e cumpridos. No presente trabalho foram definidas duas funções custo C_1 e C_2 .

A função custo C_1 representa a porcentagem do tráfego total de todas as ERBs T_{TOT} , gerado por mais de 3 pilotos nos *bins*.

$$C_1 = \frac{\sum_{i=4}^{10} iT_i}{T_{TOT}}, \quad (12)$$

onde T_i é o tráfego total gerado no *bin* j , servido por i pilotos.

A função custo C_2 representa a porcentagem de T_{TOT} dos *bins* que não possuem cobertura

$$C_2 = \left(1 - \frac{T_{TOT} - T_O}{T_{TOT}} \right), \quad (13)$$

onde T_O é o tráfego total dos usuários que não têm cobertura definido por

$$T_O = \sum_{i=1}^n Ti\beta_i, \quad (14)$$

onde β_i é o número de usuários no *bin* i .

G. Penalização

A função penalização é logarítmica e é calculada para a ERB j , $1 \leq j \leq 25$.

a) Penalização por Capacidade

$$P_1 = K_1 \log \left(1 + \frac{\Delta T}{K_2} \right), \quad (15)$$

onde $\Delta T = |L_{Tj} - \rho|$.

Os valores de $K_1=150$ e $K_2=0,001$ foram obtidos experimentalmente. A carga de tráfego L_{Tj} é a quantidade total de Erlangs gerada pelos usuários com cobertura da ERBj

III. OTIMIZAÇÃO POR ALGORITMO GENÉTICO

Os algoritmos genéticos (AG) são uma técnica de busca e otimização inspirada no princípio Darwiniano de seleção natural e reprodução genética. São utilizados para encontrar soluções ótimas para funções de difícil modelagem matemática e problemas mal estruturados [8], [10]. A maioria dos AGs têm um ciclo na forma indicada na Figura 1.

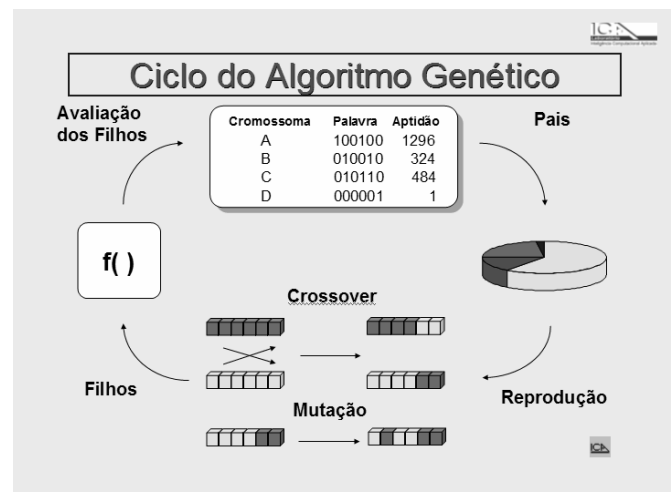


Fig.1. Ciclo do Algoritmo Genético

Cada indivíduo representa uma potencial solução ao problema. O AG aplica nos indivíduos operações de cruzamento e mutação, avaliando os novos indivíduos e selecionando de forma probabilística aqueles com maior avaliação para o seguinte ciclo (geração). O processo continua até satisfazer alguma condição de parada.

A. Representação

Neste trabalho o cromossoma representa as alturas das antenas das ERBs (H_{ERB}) tendo, por tanto, 25 genes que contêm um número real cada um, entre [10,30] ou [25,45]

metros, dependendo da localização da ERB. Considerando duas casas decimais, o número de bits necessários para representar um gene é de nove em cada caso. No total o cromossoma terá um comprimento de 225 bits, tornando o espaço de busca em 2^{225} possíveis soluções.

B. Método utilizado / Operadores

A ferramenta utilizada foi o software Evolver (www.palisade.com), já empregado na literatura [9]. O método usado foi o *Recipe* ou “Receita”. Neste caso as alturas das antenas das ERBs poderão ter valores diferentes dentro dos intervalos especificados [10,30] e [25,45] metros.

Foram usados os operadores Cruzamento – *Crossover* e Mutação próprios do Evolver, variando os porcentagens de sorteio dos operadores.

C. Avaliação

A avaliação da aptidão do cromossoma é feita nas seguintes etapas:

- 1) Baseado nas considerações, valores dos parâmetros CDMA e equações (1) a (11) é calculado o raio $r_{ERB j}$ de cada ERB, para $1 \leq j \leq 15$.
- 2) As distâncias d_{ij} entre os *bins* e cada ERB são calculadas.

Se $d_{ij} \leq r_{ERB j}$
 O *bin i* tem cobertura da ERB j , $1 \leq i \leq 2500$,
 caso contrário (c.c)

O *bin i* não tem cobertura da ERB j .

- 3) Conta-se o número total de *bins* com cobertura de 1, 2 e 3 ERBs; *bins* com cobertura de mais de 3 ERBs e *bins* sem cobertura.

- 4) Para cada ERB é determinada a carga de tráfego L_T e Capacidade Reversa (*Soft Capacity*) ρ .

Se $L_T > \rho_j$,
 Calcule $\Delta T_j = |L_{Tj} - \rho_j|$,
 c.c.

$\Delta T_j = 0$.

- 5) O número de ERBs que oferecem cobertura para cada *bin* é determinada. O tráfego total coberto por todas as ERBs (T_{TOT}) é calculado.

- 6) Determina-se o valor das funções custo C_1 e C_2 , e a função penalização caso L_T seja maior que ρ .

- 7) Agregação de Objetivos

Considerando as funções custo C_1 e C_2 , os objetivos são minimizar as porcentagens do tráfego com poluição do piloto e de usuários sem cobertura. Assim, considerando uma soma ponderada deles temos que

$$\min F = \min \left\{ \left(\sum_{i=1}^2 w_i C_i \right) + P_1 \right\}, \quad (16)$$

onde w_i representa o peso dado para cada objetivo e

$$P_1 = \sum_{i=1}^{15} P_{1i}$$

é a penalização total por capacidade. O menor

valor de F gerado pelo cromossoma indicará uma melhor aptidão do indivíduo.

IV. RESULTADOS

Foi desenvolvida uma simulação do mapa da poluição do piloto representando os *bins* servidos por um ou mais pilotos e aqueles sem cobertura, baseado nos requisitos do sistema. As Figuras 2 e 3 apresentam os mapas de poluição do piloto antes e depois da otimização.

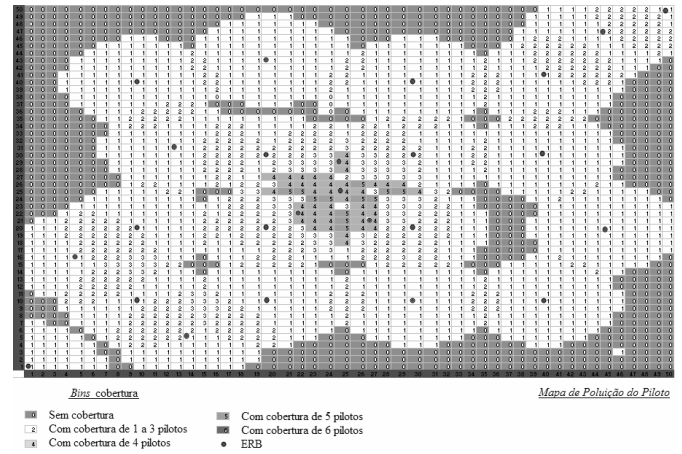


Fig. 2. Mapa de Poluição do Piloto antes da otimização.

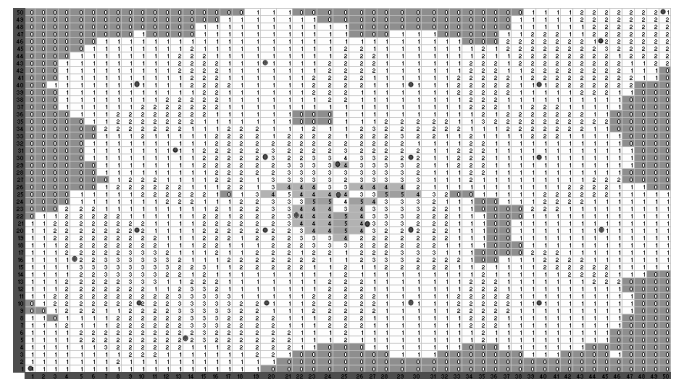


Fig. 3. Mapa de Poluição do Piloto depois da otimização.

A diminuição da poluição do piloto é evidente na região central da área geográfica. As áreas sem cobertura não aumentaram. O AG variou as H_{ERB} das ERBs tratando de evitar a penalização. As variáveis de desempenho avaliadas na otimização são apresentadas na Tabela III.

TABELA III

DESEMPENHO DO AG

	Início Otimização	Final Otimização
Custo 1 – C_1	0,218120	0,155682
Custo 2 – C_2	0,481017	0,133632
Custo Total – Penalty [$C_T - P$]	5,028293	1,492006
F.Penalty por Capacidade (P_1)	0,000000	0,000000
Usuários sem cobertura (USC)	2022	1079
Custo Total + Penalty [$C_T + P$]	5,028293	1,492006

Foram consideradas 2000 iterações e os valores de pesos $w_1 = 1$ e $w_2 = 10$. O valor da probabilidade de Crossover (P_C) foi 0,60 e da Mutação (P_M) foi de 0,10 e a População

Inicial foi 150. Os resultados obtidos indicam que o AG cumpre o objetivo proposto embora achando que o *co-siting* não é suficiente para diminuir a quantidade de usuários sem cobertura. Será necessário um investimento adicional na rede para instalar novas ERBs nas áreas sem cobertura. Vários experimentos foram executados para observar o efeito da variação dos valores dos pesos w , população inicial e operadores genéticos. Os resultados são apresentados na Tabela IV e indicam que:

O peso w_2 deve ser maior que w_1 para poder minimizar o número de usuários sem cobertura.

Os valores padrão dos operadores genéticos atingem os melhores valores das funções C_1 e C_2 , e $(C_T - P)$.

A capacidade máxima da ERB não é atingida, por tanto nenhum experimento tem penalização.

Aumentar a população não diminui o número de usuários sem cobertura nem consegue o menor $(C_T + P)$.

Alterar os valores das probabilidades do *crossover* e *mutação*, também não influí na minimização dos usuários sem cobertura.

TABELA IV

EXPERIMENTOS

Valores finais	$w_1=10$ $w_2=1$	Pop_size= 75	Pop_size= 300	$P_C=0,80$ $P_M=0,05$	$P_C=0,30$ $P_M=0,30$
C_1	0,000000	0,156162	0,191434	0,189373	0,191923
C_2	0,244435	0,134800	0,131693	0,130331	0,135471
$C_T - P$	0,244435	1,504166	1,508362	1,492679	1,546636
P_I	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
USC	1304	1076	1076	1079	1112
$C_T + P$	0,244435	1,504166	1,508362	1,492679	1,546635

V. CONCLUSÕES

O Algoritmo Genético da ferramenta Evolver, configurado para enfrentar o problema descrito neste trabalho, conseguiu os objetivos projetados: minimizar o número de pilotos servidores em cada *bin* e minimizar o número de *bins* –usuários– sem cobertura. Foram encontrados os valores mais adequados dos parâmetros do AG para desenvolver a solução do problema. Embora o mínimo ideal $F = 0$, não tenha sido atingido, a função penalização conseguiu manter os valores de capacidade dentro de intervalos válidos para as ERBs. O estudo pode-se estender para regiões maiores ou com mais densidade de usuários ou ERBs, modificando os parâmetros do AG como população inicial o valores dos pesos w_i para obter os resultados desejados. Como tarefa futura é sugerido considerar a implementação de um ambiente de simulação completo do sistema CDMA (IS-95, 1xRTT ou WCDMA) que considere, entre outros, controle de potência no enlace direto e reverso, ambientes de *soft* e *softer-handoff*, parâmetros de controle do CDMA, informação precisa do terreno, predições de cobertura e demais variáveis do sistema (antenas diretivas, setorização, lista de vizinhanças, azimuth e *tilt* das antenas), de modo que os resultados possam ser avaliados no sistema simulado retornando as avaliações ao AG (*feedback*) para continuar seu processo evolutivo.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] L. Raisanen e R. Whitaker, *Comparison and Evaluation of Multiple Objective Genetic Algorithms for the Antenna Placement Problem*. Mobile Networks and Applications 10, Springer Science, 2005.
- [2] G. Cabral, K. Lage, G. Mateus e R. Franqueira, *Planejamento de Redes Celulares de Terceira Geração considerando localização de Estações Radio Base, Controle de Potência e Múltiplos Serviços*. Departamento de Ciência da Computação, UFMG, 2004.
- [3] S. Yang, *CDMA RF System Engineering*. Artech House Publishers, c. 4, 7, 8 e 10, 1998.
- [4] R. Menolascino, M. Pizarroso, C. Lepschy e B. Salas, *Third Generation Mobile Systems Planning Issues*. VTC'98, IEEE, 1998.
- [5] S.B. Jamaa, Z. Altman, J. Picard, B. Fourestié e J. Mourlon, *Manual and Automatic Design for UMTS Networks*. Mobile Networks and Applications 9, Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [6] K. Kim, *Handbook of CDMA System Design Engineering and Optimization*. Prentice-Hall, c. 9 e 10, 2000.
- [7] L. Silva-Mello, *Planejamento de Sistemas Celulares e Radio Acesso – Apostilas e Notas de Aula*. CETUC, PUC-RIO, 2006.
- [8] M. Pacheco, “*Algoritmos Genéticos: Princípios e Aplicações*” e *Computação Evolucionária – Apostila e Notas de Aula*. ICA, PUC-RIO, 2006.
- [9] R. Bezerra, M. Pacheco, M. Velasco e M. Grivet, *Optimization of Frequency Assignment for a Cellular Mobile System by Genetic Algorithms*. Departamento de Engenharia Elétrica – ICA – CETUC, PUC-RIO, 2001
- [10] D. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley Publishing Company, 1989.