



CAPÍTULO

OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO E MULTIRRESTRICÇÃO DA COBERTURA DE REDES DE FREQUÊNCIA ÚNICA

Adson Silva Rocha

Instituto Federal Goiano –
IFGOIANO.
adson.rocha@ifgoiano.edu.br

Ciro José Almeida Macedo

Instituto Federal de Goiás,
Câmpus Cidade de Goiás.
ciro.macedo@ifg.edu.br

Leonardo da Cunha Brito

Universidade Federal de Goiás,
Escola de Engenharia
Elétrica, Mecânica e de Computação.
brito @emc.ufg.br

Pedro Henrique da Silva Palhares

Universidade Federal de Goiás,
Escola de Engenharia Elétrica,
Mecânica e de Computação.
phpalhares@gmail.com

RESUMO

Este artigo apresenta uma abordagem multiobjetivo e multirrestricção para a otimização de sistemas de transmissão de vídeo digital, baseados em Redes de Frequência Única. O método proposto é capaz de prover curvas de compromisso para a cobertura, custos e interferências, entre outros, como nível de exposição à radiação. O método de otimização de cobertura geral proposto pode ser estendido a outras redes sem fio, como sistemas de celular.

Palavras-chaves: *orthogonal frequency-division multiplexing*, Redes de Frequência Única, otimização multiobjetivo e multirrestrrição.

1 INTRODUÇÃO

A otimização de Redes de Frequência Única (RFU) (REBHAN; ZANDER, 1993), (KUCHEN; BECKER; WIESBECK, 1996), (LIGETI, 1999), (LIGETI; ZANDER, 1999), (VELEZ et al., 2000), (SANTELLA; MARTINO; RICCHIUTI, 2004), (RICNY, 2007); (PLETS et al., 2010), (KOUTITAS, 2010), (LANZA et al., 2011) para os propósitos de transmissão de sinais de televisão digital geralmente emprega um modelo de otimização com um conjunto de variáveis de decisão, bem como um conjunto de métricas de performance, representados por funções-objetivo. Na literatura, diversos métodos de otimização de RFU têm sido reportados (KOUTITAS, 2010), (LANZA et al., 2012), (LANZA et al., 2011), (LIGETI; ZANDER, 1999), (LIGETI, 1999), (KUCHEN; BECKER; WIESBECK, 1996), (SANTELLA; MARTINO; RICCHIUTI, 2004). Estes, independentemente do número de metas, aplicam o chamado método de somas ponderadas (DEB, 2001), (MIETTINEN, 1998) para avaliar as soluções candidatas, nos quais a aptidão é dada pela soma ponderada das funções objetivo. Esse modelo apresenta desvantagens, como a incapacidade de gerar todas as relações de compromisso entre as soluções em problemas não convexos, a escolha dos pesos ser realizada levando-se em conta apenas os fatores de ponderação, desprezando a importância dos objetivos, e a consistência dimensional em sua determinação. Além disso, existem várias soluções para um conjunto específico de pesos, ou seja, os pesos são também parâmetros a serem otimizados, o que pode resultar em desperdício de esforço computacional e acréscimo de complexidade ao modelo.

O planejamento de cobertura de RFU é, naturalmente, um problema de otimização multiobjetivo, e por isso é conveniente fornecer ao projetista do sistema as curvas de compromisso para a cobertura da área de serviço, o custo de implementação de rede, interferência interna e externa, entre outros.

Neste trabalho, é proposta uma nova abordagem baseada na avaliação multiobjetivo das soluções candidatas. Algumas metas, por exemplo custo e cobertura, podem ser vistas como funções-objetivo e outras, como exposição e interferência, podem ser tratadas como funções de restrição apresentadas para minimizar suas respectivas violações. Tal abordagem é capaz de orientar adequadamente o processo de pesquisa ao longo das melhores curvas de compromisso entre restrições e objetivos, que geralmente são conflitantes e incomensuráveis. Rocha et al. (2012) apresentam um modelo de otimização multiobjetivo; contudo, contemplam apenas dois objetivos, cobertura e custo da infraestrutura, e não apresentam um modelo baseado nas estatísticas características dos sinais empregados, ao passo que o presente trabalho contempla.

Este artigo é organizado como segue: a Seção 2 apresenta o modelo de representação de uma RFU e métricas associadas; na Seção 2.3, a abordagem multiobjetivo e multirrestrição proposta e o algoritmo de otimização são apresentados; a Seção 3 explora o emprego da abordagem proposta e, finalmente, a Seção 4 sumariza as conclusões.

2 MODELO DE REDES DE FREQUÊNCIA ÚNICA

2.1 Representação RFU

O modelo de simulação de RFU empregado neste trabalho é composto por uma área de serviço, receptores (R), transmissores (T), transmissores interferentes externos (T^{ex}), e receptores externos interferidos (R^{ex}). Os receptores são tomados com distribuição uniforme ao longo da área de serviço, com um espaçamento mínimo de Δs . As antenas transmissoras são tri-setorizadas a fim de moldar adequadamente a área de cobertura e evitar interferências, tanto quanto possível.

Para representar um cenário específico, os seguintes parâmetros devem ser especificados: o mapa de altimetria do terreno, ganhos de antenas transmissoras e receptoras, atenuação de setores, potência de transmissão, azimutes das antenas, frequência central do canal de transmissão e tipo de área de serviço (urbana, suburbana ou aberta). Neste trabalho, o modelo Okumura-Hata (HATA, 1980) juntamente com o modelo de obstrução Deygout (DEYGOUT, 1966) foram adotados para estimar as perdas de propagação. Em Saliato et al. (2010), demonstrase que esses métodos de estimativa apresentam boa correspondência com medidas reais.

Para transmissor $T_i \in \{T_1, T_2, \dots, T_{N_t}\}$, os seguintes parâmetros são definidos:

- $s_i^a, s_i^b, s_i^c \in \{0, 1\}$: três parâmetros do tipo ativo/inativo, indicando se os setores a, b e c estão ativos;
- $a_i^a, a_i^b, a_i^c \in \{A\}$: atenuações aplicadas aos setores a, b e c , dado um conjunto de atenuações possíveis A ;
- $h_i \in H$: altura da antena, dado um conjunto de Alturas possíveis H ;
- $p_i \in P$: potência isotrópica efetivamente irradiada, dado um conjunto P de possíveis intensidades;
- (x_i, y_i) : localização do transmissor, dada por índices discretos sobre a representação matricial do terreno;
- $\theta \in [-90^\circ, 90^\circ]$: azimute do transmissor, em que, considerando $\theta = 0$, a abertura dos setores a, b e c são $(-30^\circ, 90^\circ]$, $(90^\circ, -150^\circ]$, e $(-150^\circ, -30^\circ]$, respectivamente.

Para cada transmissor externo, $T_i^{\text{ex}} \in \{T_1^{\text{ex}}, T_2^{\text{ex}}, \dots, T_{N_{\text{te}}}^{\text{ex}}\}$, os seguintes parâmetros são requeridos:

- p_i^{ex} : potência isotrópica efetivamente irradiada;
- h_i^{ex} : altura da antena;
- (x_i, y_i) : localização do transmissor externo;

Para cada receptor, $R_i \in \{R_1, R_2, \dots, R_{N_r}\}$, ou receptor externo interferido, $R_i^{\text{ex}} \in \{R_1^{\text{ex}}, R_2^{\text{ex}}, \dots, R_{N_{\text{re}}}^{\text{ex}}\}$, os seguintes parâmetros devem ser especificados:

- (x_i, y_i) : localização do receptor;
- $h_R = h_{R^{\text{ex}}}$: altura do receptor;
- Ganho de antena, que é definido como 10dBi nesse trabalho.

2.2 Cenário de avaliação do modelo RFU

Tomando os parâmetros de transmissores e receptores, além das informações do terreno, a relação sinal-interferência (Γ), a probabilidade de cobertura (P_c), os níveis de potência interferente (P_{int}), e a exposição à emissão (P_{exp}), podem ser calculadas como segue.

A Equação (1) fornece a relação sinal-interferência normalmente utilizada em modelos RFU (REBHAN; ZANDER, 1993), (KOUTITAS, 2010), (LIGETI; ZANDER, 1999), (LIGETI, 1999).

$$\Gamma = \frac{U}{I + N_0} = \frac{\sum_{i=1}^{N_t} U_i}{\sum_{i=1}^{N_t} I_i + \sum_{i=1}^{N_{\text{te}}} P_i^{\text{ex}} + N_0} \quad (1)$$

em que N_0 é a intensidade de ruído de fundo. U_i e I_i são, respectivamente, os componentes construtivos e destrutivos da RFU a ser avaliada, os quais podem ser calculados utilizando o modelo dado pelas Equações (2) e (3), admitindo que o receptor seja sincronizado com o primeiro sinal recebido no momento t_0 . P_i^{ex} é a contribuição do i -ésimo transmissor interferente externo operando na mesma frequência.

$$U_i = \omega(t_i - t_0) \cdot P_i \quad (2)$$

$$I_i = [1 - \omega(t_i - t_0)] \cdot P_i \quad (3)$$

em que P_i é a potência recebida do i -ésimo transmissor da RFU e

$$\omega(\Delta_t) = \begin{cases} 1, 0 \leq \Delta_t < T_g \\ \frac{T_u - \Delta_t + T_g}{T_u}, T_g \leq \Delta_t < T_f \\ 0, \Delta_t \geq T_f \end{cases} \quad (4)$$

dado que o período de símbolo $T_f = T_g + T_u$ é a soma do intervalo de guarda, T_g , e a parte útil, T_u , do símbolo OFDM (Multiplexação por Divisão de Frequências Ortogonal, do inglês *Orthogonal frequency-division multiplexing*) (REBHAN; ZANDER, 1993).

Seguindo o modelo k-LNM, como em Lanza et al. (2012) e Santella; Martino; Ricchiuti (2004), a probabilidade de cobertura é calculada assumindo que as variações de potências incidentes recebidas têm distribuição log-normal, com valores médios representados pelos níveis de energia dados na Equação (1) e em desvios-padrão pré-definidos, neste trabalho assumidos como 5.5 dB para todos os níveis de potência recebidos. Assim, a probabilidade de cobertura numa dada posição é calculada de acordo com

$$p_c = P_r(\Gamma > \Psi_0) \quad (5)$$

ou

$$p_c = P_r\left(\frac{U}{I} > \Psi_0\right) \cdot P_r\left(\frac{U}{N_0} > \Psi_0\right) \quad (6)$$

adotando o ruído e a

$$P_{int} = \sum_{i=1}^{N_t} P_i \quad (7)$$

e não deve exceder o limiar Ω_0 .

No Brasil, o nível de densidade de potência de referência para a exposição pública geral, tratando-se de campos eletromagnéticos variantes no tempo, é de $f / 200 \text{ W.m}^2$, em que f é dada em MHz (ANATEL, 2002). Assim, a potência total medida nos receptores R tomando todos os transmissores T é dada por:

$$P_{exp} = \sum_{i=1}^{N_t} P_i \quad (8)$$

que não deve exceder o limiar de $\frac{f}{200}$.

2.3 Otimização multiobjetivo e multirrestrrição

2.3.1 Representação

Tipicamente, problemas de otimização do mundo real podem ser representados por um conjunto de equações com variadas restrições e objetivos (RICNY, 2007), (KUMAR; DAS; SHARMA, 2008), (MICHALEWICZ; FOGEL, 2004), (BROWNLEE, 2012), (MARTINS; LOURENÇO; HORTA, 2012), como em

$$\text{minimizar } \mathbf{y} = [y_1(x), y_2(x), \dots, y_m(x)] \in Y$$

$$\text{sujeito a } \mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n] \in X \quad (9)$$

$$\mathbf{g} = [g_1(x, y), g_2(x, y), \dots, g_p(x, y)] \leq 0$$

em que $Y \in \mathfrak{R}^m$ é o espaço de funções-objetivo e $X \in \mathfrak{R}^m$ é o espaço de variáveis de decisão. A notação $g \leq 0$ é utilizada para fins de simplicidade, mas é fácil estendê-la a outras desigualdades e igualdades.

A fim de se avaliar numericamente a quantidade de restrições violadas, é proposta a seguinte representação alternativa de (KUCHEN; BECKER; WIESBECK, 1996):

$$\text{minimizar } \mathbf{y} = [y_1(x), y_2(x), \dots, y_m(x)] \in Y$$

$$\text{sujeito a } \mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n] \in X \text{ e} \quad (10)$$

$$\text{aplicado a } \mathbf{h} = [h_1(g_1), h_2(g_2), \dots, h_p(g_p)]$$

em que

$$h_i(g_i) = \begin{cases} -\varepsilon, & g_i \leq 0; \\ g_i, & g_i > 0 \end{cases}, i = 1, 2, \dots, p \quad (11)$$

Para a i -ésima violação de restrição, g_i é a medida quantitativa da violação. Não havendo violação, a função de restrição é definida com um valor negativo infinitesimal $-\varepsilon$. O fato de ε ser negativo representa a não violação de qualquer restrição. A dimensão infinitesimal consta apenas como formalidade de representação, uma vez que qualquer valor negativo poderia ser empregado.

Em Santella; Martino; Ricchiuti (2004), a minimização de h é preferida quando comparada à minimização de y , ou seja, a não violação das restrições precede a otimização das funções-objetivo. Assim, ela pode ser vista como uma representação de *restrições severas*. Por outro lado, em uma representação de *restrições brandas*, não há prioridade entre a otimização de objetivos e funções de restrição.

2.3.2 Avaliação com restrições brandas

No caso da representação com *restrições brandas* (SANTELLA; MARTINO; RICCHIUTI, 2004), x_a domina x_b se

$$\forall_i \in \{1, 2, \dots, m + p\} : f_i^a \leq f_i^b \quad (12)$$

e

$$\exists_j \in \{1, 2, \dots, m + p\} : f_j^a < f_j^b$$

Os métodos de classificação de soluções anteriormente indicados consideram um problema de minimização, mas eles podem ser facilmente convertidos para

um problema de maximização, uma vez que a minimização de φ_x é equivalente à maximização de $-\varphi_x$ e vice-versa.

2.3.3 Avaliação com restrições severas

Neste trabalho, usa-se da representação com *restrições severas* (SANTELLA; MARTINO; RICCHIUTI, 2004). Para tanto, consideremos duas soluções candidatas x^a e x^b que tenham sido previamente avaliadas pela função objetivo e de restrição, dando (y^a, b^a) e (y^b, b^b) , respectivamente. Em um processo de otimização, a fim de classificar soluções candidatas atuais, é adequado compará-las aos pares, aplicando o conceito de dominância de Pareto (RICNY, 2007), (BROWNLEE, 2012), (MICHALEWICZ; FOGEL, 2004), dado que o problema conta com mais de um critério de avaliação. A solução x^a é melhor, ou *domina*, x^b se: (i) x^a não viola qualquer restrição e x^b viola; ou (ii) as duas candidatas não violam qualquer restrição e

$$\forall_i \in \{1, 2, \dots, m\} : y_i^a \leq y_i^b \tag{13}$$

e

$$\exists_j \in \{1, 2, \dots, m\} : y_j^a < y_j^b$$

ou (iii) ambas as candidatas violam uma ou mais restrições e

$$\forall_i \in \{1, 2, \dots, p\} : b_i^a \leq b_i^b \tag{14}$$

e

$$\exists_j \in \{1, 2, \dots, p\} : b_j^a < b_j^b$$

A Figura 1 ilustra a avaliação com *restrições severas*, sendo que, neste caso, as restrições são expressas como uma região factível dentro do espaço de objetivos.

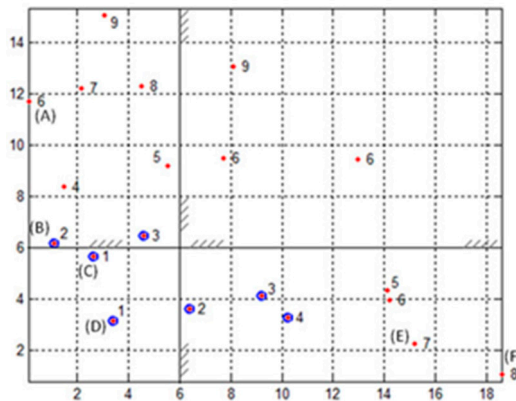


Figura 1 Classificação com restrições severas. As linhas grifadas demarcam a região factível. Os números indicam a que frente pertencem os pontos.

Essa representação acelera o processo de busca dentro do espaço de soluções factíveis, já que avalia melhor pontos que não violam restrições e pontos mais próximos da região factível.

O método de classificação de soluções acima indicado considera um problema de minimização, mas ele pode ser facilmente convertido para um problema de maximização, uma vez que a minimização de φ_x é equivalente à maximização de $-\varphi_x$ e vice-versa.

2.3.4 Algoritmo de otimização

Um algoritmo de otimização simples (busca direta) é utilizado em conjunto com o método de avaliação descrito na Seção 2.3.3. A simplicidade no algoritmo foi adotada intencionalmente para mostrar a capacidade inerente de classificação de dominância multicritérios para fornecer naturalmente diversificação entre as soluções ao longo do processo de busca, evitando a estagnação em ótimos locais (BROWNEE, 2012), MICHALEWICZ; FOGEL, 2004).

Algoritmo Otimize

Entrada: número de iterações (N_{it}),
vizinhos (N_n), e soluções candidatas (N_c)
Saída: melhores candidatas (S)
S = Inicialize(N_c);
Avalie(S);
Para $i = 0$ **até** N_{it}
 $\tilde{S} =$ Varie(S, N_n);
 Avalie(\tilde{S});
 S = Selecione-Melhores(S, \tilde{S} , N_c);
fim
retorne S;

2.3.4.1 Inicialização

Como primeiro passo da otimização, na função Inicialize, o primeiro conjunto de soluções candidatas S é inicializado aleatoriamente. Cada solução candidata é composta por N_t subconjuntos contendo os parâmetros de cada transmissor $T_i \in \{T_1, T_2, \dots, T_{nt}\}$, ou seja, os subconjuntos fornecem os valores de (s_i^a, s_i^b, s_i^c) , (a_i^a, a_i^b, a_i^c) , h_i, p_i , e θ para cada T_i .

2.3.4.2 Avaliação

A avaliação multicritério de uma solução candidata, dada pela função Avalie, é realizada primeiramente com o cálculo da probabilidade de cobertura usando a Equação (6), a potência interferente usando a Equação (7), e a relativa exposição à radiação eletromagnética usando a Equação (8). Posteriormente, as quatro funções de avaliação são calculadas como se segue:

- *Cobertura*: a cobertura, $C_{\%}$, é a proporção de pontos receptores R que tem uma probabilidade de cobertura maior que um limiar ($p_c > \Psi_0$, com $\max C_{\%} = 1$).
- *Proteção*: a aqui chamada *proteção*, $I_{\%}$, é a proporção de pontos receptores externos R^{ex} que não tem o limiar Ω_0 de máxima interferência excedido ($P_{int} < \Omega_0$, com $\max I_{\%} = 1$).
- *Exposição*: a exposição, $E_{\%}$, é a proporção de pontos de recepção R que não tem o limiar de máxima exposição à radiação excedido ($P_{exp} < \frac{f}{200}$, com $\max E_{\%} = 1$).
- *Custo*: finalmente, a quarta função de avaliação, C_o , é o custo estimado de infraestrutura para a RFU proposta.

Portanto, o conjunto de critérios disponíveis utilizado no modelo de otimização proposto é definido como $(C_{\%}, I_{\%}, E_{\%}, C_o)$.

A fim de selecionar as melhores candidatas em cada iteração do algoritmo de otimização com abordagem de restrições severas, na Equação (10) pode ser usada, definindo:

$$y = [(1 - C_{\%}), C_o] \text{ e } g = [(1 - I_{\%}), (1 - E_{\%})] \quad (15)$$

que representa uma otimização multiobjetivo y e multirrestrrição g . Por conseguinte, nesse caso, é desejável minimizar o custo e maximizar a área de cobertura, além da maximização da proteção contra interferências e a minimização da exposição à radiação.

Na otimização com restrições brandas, vista na Equação (13), pode-se definir:

$$f = [(1 - C_{\%}), (1 - I_{\%}), (1 - E_{\%}), C_o] \quad (16)$$

que tipifica um problema de otimização multiobjetivo puro.

2.3.4.3 Variação

Cada solução candidata é variada ao selecionar e alterar um de seus parâmetros, atribuindo aleatoriamente um dos possíveis valores de seu respectivo

conjunto, com exceção do valor de azimute, para o qual o novo valor é fornecido de acordo com a Equação (17):

$$\tilde{\Theta} = \Theta + \sigma \cdot N(0,1) \quad (17)$$

em que Θ é o azimute corrente, e o $\tilde{\Theta}$ é o novo valor, σ é o desvio, e $N(0,1)$ representa uma distribuição de probabilidade Gaussiana com média zero e desvio unitário. Empiricamente, o valor mais adequado encontrado para σ foi 5° .

A cada iteração do otimizador N_n , vizinhos de cada N_c solução candidata corrente são gerados, o que provê $(1 + N_n) \cdot N_c$ candidatas para serem avaliadas e comparadas.

2.3.4.4 Seleção

Ao longo da otimização, uma vez que o número corrente de soluções candidatas é limitado por N_c , é necessário truncar o conjunto de candidatas avaliadas $(1 + N_n) \cdot N_c$ a cada iteração. A seleção das melhores candidatas é realizada seguindo os passos:

Iterativamente classifica-se o conjunto $(1 + N_n) \cdot N_c$ candidatas usando o conceito de dominância de Pareto. Na primeira iteração ($i = 1$), as soluções candidatas não dominadas são rotuladas como pertencentes à primeira frente de Pareto (melhores soluções). Então, de forma incremental, na i -ésima iteração, ignorando as soluções já rotuladas, as candidatas não dominadas são então rotuladas como pertencentes ao i -ésima frente. Esse processo é repetido até que o número de candidatas rotuladas seja maior ou igual a N_c . Todas as soluções não rotuladas são então eliminadas do conjunto inicial.

Na sequência, as candidatas remanescentes com avaliações inferiores, rotuladas em frentes de maior ordem, são tomadas para nova poda. Iterativamente, uma candidata que tem a mínima distância média para seus k -vizinhos mais próximos é eliminada a cada passo (método *k-nearest-neighbors*). Esse passo é repetido enquanto o tamanho do conjunto é maior que N_c .

O método *k-nearest-neighbors* (SILVERMAN, 1986) é usado neste trabalho, devido à sua simplicidade e aos bons resultados apresentados para a estimativa da densidade de soluções dentro do espaço de busca. O valor k é determinado pelo número inteiro mais próximo da raiz quadrada do número de candidatas a serem comparadas em cada etapa. Além disso, antes da aplicação desse método, cada função de avaliação (função de restrição ou objetivo) é normalizada, dimensionando-a entre 0 e 1.

O método proposto de poda é capaz de preservar as candidatas com os valores de função de avaliação extremas e sustenta uma distribuição aproximadamente uniforme ao longo da melhor frente (primeira), tal como ilustrado na Figura 2.

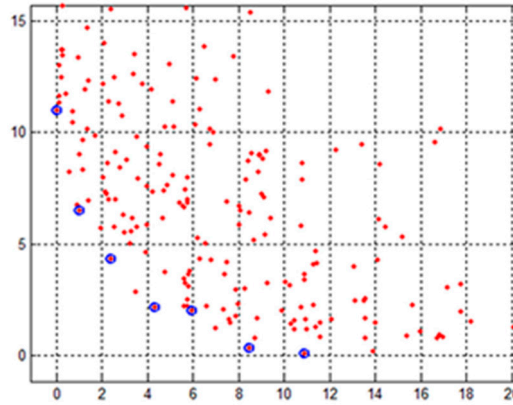


Figura 2 Ilustração do método de poda. Os círculos indicam as sete melhores soluções, considerando duas funções objetivo arbitrárias.

2.3.5 Método mono-objetivo de avaliação

Com o propósito de validar a eficiência da representação multiobjetivo e multirrestrrição, o método de avaliação mono-objetivo proposto por Ligeti; Zander (1999) foi implementado para comparação. Para tal aplicação, foi tomado o algoritmo *Otimize*, descrito na Seção 2.3.4, modificando-se somente a forma de seleção dos melhores pontos ao longo das iterações. Em Ligeti; Zander (1999), a avaliação de um candidato é dada por:

$$f = \frac{C_o}{C_{O_{max}}} + \alpha \cdot (1 - C_{\%}) + \beta \cdot (1 - I_{\%}) + \gamma \cdot (1 - E_{\%}) + \delta \quad (18)$$

na qual $C_{O_{max}}$ é um fator de normalização dado pelo maior custo possível (considerando todos os setores com máxima potência e maior altura de antena), α, β, γ ponderam as avaliações e δ é um fator adicional. Cabe ressaltar que o peso γ e seu respectivo critério $(1 - E_{\%})$ foram inseridos na expressão original de forma a considerar também a minimização da exposição aos campos eletromagnéticos. Os valores sugeridos em Ligeti; Zander (1999) são $\alpha = 10$, $\beta = 10$ e $\delta = 1$. Ao fator γ foi atribuído o valor 10 para a aplicação desse método de avaliação.

Nota-se que, como se trata de uma avaliação mono-objetivo, a inclusão ou exclusão de novos critérios na Equação (18) demanda um novo estudo sobre os valores adequados dos fatores que os ponderam, o que corresponde a um processo adicional e manual de otimização dos parâmetros livres do método de busca.

Ademais, é importante notar que, diferentemente da inicialização do primeiro conjunto de soluções candidatas proposta em Ligeti; Zander (1999), a qual

é completamente aleatória no espaço de busca, neste trabalho adotou-se, como descrito na Seção 2.3.4, uma inicialização também aleatória, exceto para os parâmetros referentes às atividades dos setores, os quais são todos considerados ativos na primeira iteração do algoritmo. A partir de observações empíricas, verificou-se que o fato de se privilegiar a cobertura nos estágios iniciais da busca permite a obtenção de melhores soluções ao final do processo de otimização.

3 ESTUDO DE CASO

O estudo de caso usa os parâmetros de inicialização definidos na Tabela 1 e os parâmetros de otimização mostrados na Tabela 2

Tabela 1 Parâmetros de inicialização

Símbolo	Parâmetro	valor
f	Frequência do canal	472 MHz
Ψ_0	Mínima relação sinal-interferência	17 dB
Ω_0	Limiar de proteção	-65 dBW
T_g	Tempo de guarda do símbolo OFDM	224 s
T_u	Tempo útil do símbolo OFDM	896 s
N_0	Potência do ruído de fundo	-60 dBW
$h_R, h_{R^{ex}}$	Altura da antena receptora	5 m
G_{Rx}	Ganho da antena receptora	10 dBi
G_{Tx}	Ganho da antena de transmissão	20 dBi

Tabela 2 Parâmetros de otimização

Símbolo	Parâmetro	Valores Possíveis	Custo normalizado
A	Atenuação por setor de antena	{0;3;6}dB	desprezível
H	Altura de antenna	{20;30;40;60}m	{160;180;150;350}
P	Potência efetivamente irradiada	{20;30;40}dBW	{50;100;150}

Todas as otimizações realizadas utilizaram número de iterações $N_{it} = 1000$, número de soluções vizinhas geradas $N_c = 30$, e $N_n = 1$ como total de soluções

em cada iteração. Esses valores foram definidos após um estudo sobre a convergência do método quanto à obtenção de soluções satisfatórias, considerando um percentual mínimo de cobertura de 85% e, simultaneamente, a proteção dos pontos externos da ordem de 90%. Para tanto, realizou-se a rotina:

- o algoritmo *Otimize*, descrito na Seção 2.3.4, foi aplicado à otimização multiobjetivo e multirrestrrição referente à Equação (6), na qual o custo e a cobertura são objetivos e a proteção e a exposição são tomadas como restrições;
- foram realizadas 10 (dez) otimizações independentes.

A Figura 3 apresenta os resultados obtidos. Nota-se aqui que as otimizações independentes produziram soluções satisfatórias com até 1000 iterações, o que confirma a escolha adequada dos valores indicados para os parâmetros N_{it} , N_n e N_c .

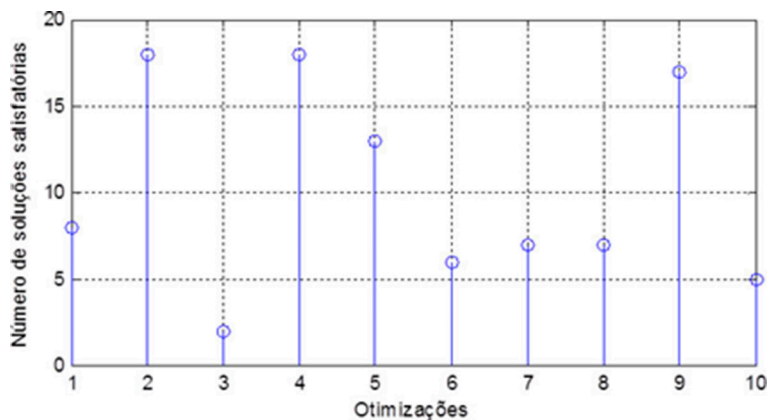


Figura 3 Estudo de convergência.

A Figura 4 mostra o mapa de altimetria usada para o estudo de caso.

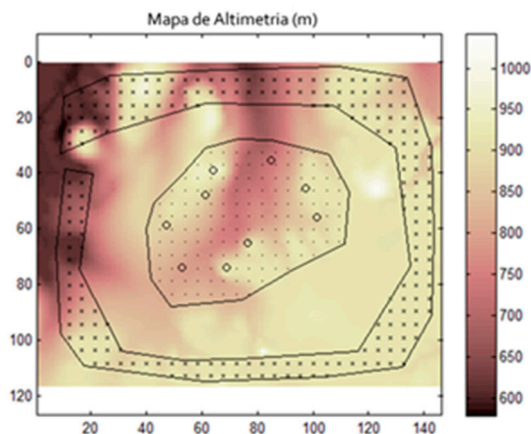


Figura 4 Mapa de altimetria. Os círculos confinados na parte central são as possíveis localizações das antenas de transmissão.

O contorno da área de serviço (polígono interno) delimita as possíveis localizações dos transmissores. O contorno externo contém os receptores externos. A graduação da barra de cores dá a altitude em metros. Esse cenário ilustra um planejamento de RFU não interferente de um modo extremo, completamente circundado, uma vez que se faz necessário que o sinal fique confinado dentro da área de serviço.

3.1 Otimização de custos e cobertura como objetivos, proteção e exposição como restrições

A cobertura e os custos são tratados como objetivos e a proteção e a exposição são tomadas como restrições do problema de otimização. A Figura 5 mostra as soluções obtidas. Cabe ressaltar que todas as soluções alcançadas, além de respeitarem o limiar de interferência na Figura 7, não violam as restrições referentes aos limiares de proteção e exposição eletromagnética, o que evidencia a eficácia da abordagem. As Figuras 6 a 8 mostram os resultados correspondentes a uma das melhores soluções, a qual apresenta um percentual de cobertura maior que 85% a um custo normalizado de 1410 unidades.

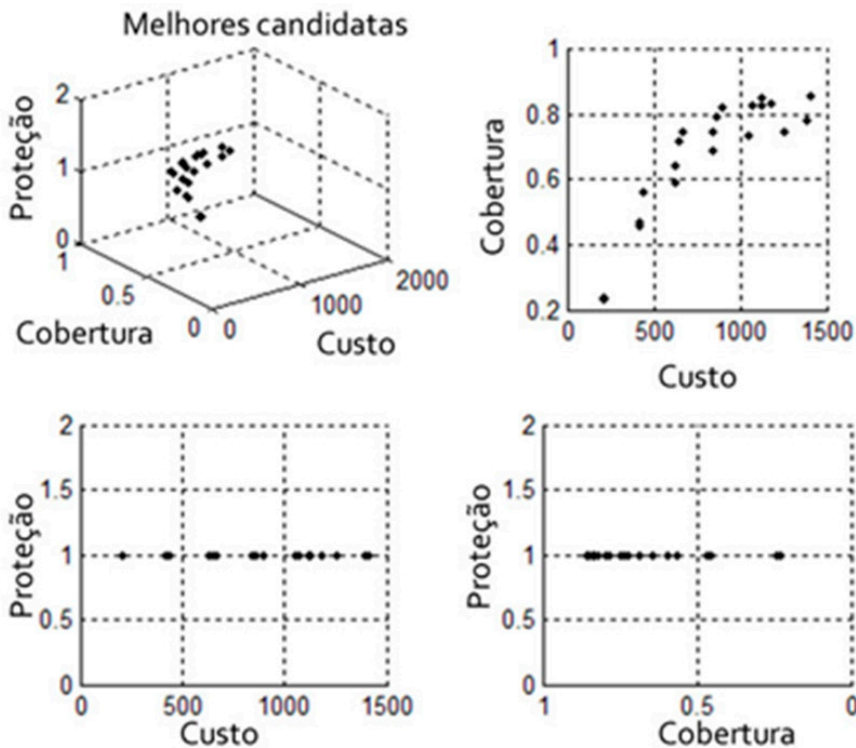


Figura 5 Melhores soluções candidatas encontradas dentro do espaço de busca.

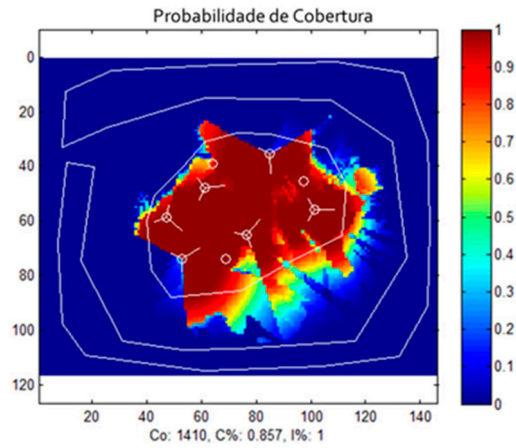


Figura 6 Probabilidade de cobertura dentro da área de serviço.

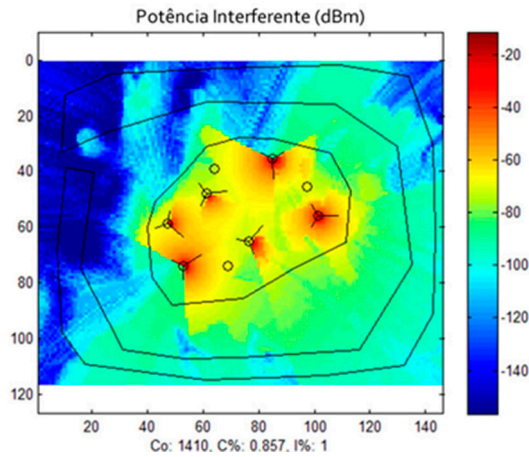


Figura 7 Intensidade de potência interferente.

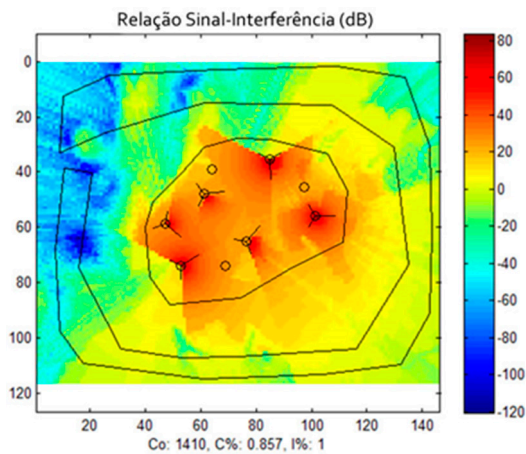


Figura 8 Relação sinal-interferência para otimização de custos e cobertura como objetivos e proteção e exposição como restrição.

Os transmissores cujas implantações são propostas pela solução são aqueles com pelo menos um setor ativo, os quais são indicados em destaque na Tabela 3.

Tabela 3 Parâmetros da solução

i_p	i_H	s^a	a^a	s^b	a^b	s^c	a^c	θ
1	1	1	2	0	3	0	3	6,39
3	1	0	2	0	2	0	2	-62,79
3	1	0	2	0	3	0	3	58,61
1	1	1	1	1	1	1	2	-0,05
1	3	1	2	0	3	0	1	48,72
1	4	0	2	0	1	0	2	-90
1	2	1	2	0	2	1	1	32,12
1	2	0	2	0	1	1	3	-41,03
1	2	1	1	0	2	1	1	-87,11

Percebe-se que, visando a minimizar o custo total e maximizar a cobertura, atendendo também às restrições, o algoritmo de otimização encontrou uma solução de compromisso, na qual são tomadas 6 (seis) torres com a menor altura possível (prevalência dos índices 1 e 2 de H) e que emitem a mais baixa potência disponível (índice 1 do conjunto P).

3.2 Comparações entre as abordagens

Com o propósito de avaliar o desempenho da abordagem proposta, o algoritmo *Otimize*, descrito na Seção 2.3.4, foi aplicado tomando-se as formas de avaliação multiobjetivo e multirrestrrição na Equação (15), multiobjetivo puro na Equação (16), e mono-objetivo na Equação (18). Os métodos foram aplicados duas vezes, considerando-se dois conjuntos de critérios: (i) custo, percentual de cobertura e percentual de proteção; e (ii) custo, percentual de cobertura, percentual de proteção e percentual de exposição. Os resultados são apresentados a seguir.

3.2.1 Otimização de custo, cobertura e proteção

Para a abordagem puramente multiobjetivo, tomou-se o vetor de critérios de avaliação $[(1 - C_{\%}), (1 - I_{\%}), C_o]$. No caso da abordagem multiobjetivo e multirrestrrição, $[(1 - C_{\%}), C_o]$ foi tomado como vetor de objetivos e $[(1 - I_{\%})] \leq 0$ como única restrição. A avaliação mono-objetivo foi feita aplicando-se

$C_o / C_{O_{max}} + \alpha \cdot (1 - C_{\%}) + \beta \cdot (1 - I_{\%}) + \delta$, tomando-se os valores explicitados na Seção 2.3.5 para os fatores α, β e δ .

Foram feitas 30 otimizações independentes com cada configuração, aplicando-se os parâmetros das Tabelas 1 e 2 no cenário mostrado na Figura 4.

Os resultados explicitados na Tabela 4 foram então obtidos. Nela, X (Y) representa o percentual de soluções dominadas (inferiores) X , e o percentual de soluções não dominadas (não inferiores) Y , da respectiva abordagem, quando comparada à outra. Dos dados comparativos, referentes às soluções obtidas após 30 aplicações de cada abordagem, foram removidas as soluções de baixa qualidade, quais sejam: aquelas com percentual de cobertura menor que 85% e com percentual de proteção inferior a 90%.

Tabela 4 Comparação entre as abordagens.

Abordagens	Mono-objetivo	Multiobjetivo	Multiobjetivo e Multirrestrrição
Mono-objetivo	-	0% (100%)	5,88% (94,12%)
Multiobjetivo	100% (0%)	-	100% (0%)
Multiobjetivo e Multirrestrrição	0% (100%)	0% (100%)	-

Na Tabela 4, nota-se que a abordagem multiobjetivo e multirrestrrição apresentou o desempenho sensivelmente melhor que a abordagem mono-objetivo, visto que nenhuma de suas soluções é dominada por soluções dos demais métodos. Além disso, 5,88% das soluções obtidas por meio da abordagem mono-objetivo são inferiores a soluções obtidas pela abordagem multiobjetivo e multirrestrrição. O método multiobjetivo puro, correspondente ao tratamento brando da restrição referente à proteção, foi inferior aos demais métodos de avaliação. Esse resultado pode ser explicado qualitativamente observando-se que:

- a abordagem mono-objetivo tende a privilegiar uma direção de busca no espaço de decisão, o que imprime uma rápida convergência para um valor mínimo, mesmo que para um mínimo local;
- a abordagem puramente multiobjetivo correspondente ao tratamento brando de restrições, não privilegia nenhuma das métricas de avaliação, o que fomenta uma procura de caráter mais global dentro do espaço de busca e distribui o esforço de busca em várias direções, necessitando, assim, de mais iterações para alcançar o melhor balanço entre os critérios;
- a abordagem multiobjetivo e multirrestrrição correspondente ao tratamento rigoroso de restrições, privilegia a busca da região restrita (onde não

há violação de restrições). Uma vez que esteja dentro da região restrita, essa abordagem procura distribuir os pontos em frentes que contemplam o compromisso entre os critérios tratados como objetivos. Assim, em um primeiro momento, a convergência se dá na direção do espaço restrito para que, em seguida, haja uma convergência na direção da frente ótima de Pareto. Portanto, a exploração do espaço de busca é otimizada.

3.2.2 Otimização de custo, cobertura, proteção e exposição

Neste caso, para a abordagem multiobjetivo e multirrestrição, $[(1 - C_o), C_o]$ foi tomado como vetor de objetivos e $[(1 - I_o), (1 - E_o)] \leq 0$ como vetor de restrições. A avaliação mono-objetivo foi feita aplicando $C_o / C_{O_{max}} + \alpha \cdot (1 - C_o) + \beta \cdot (1 - I_o) + \gamma \cdot (1 - E_o) + \delta$, tomando-se os valores explicitados na Seção 3 para os fatores α, β, γ e δ .

Tabela 5 Comparação entre as abordagens

Abordagens	Mono-objetivo	Multiobjetivo e Multirrestrição
Mono-objetivo	-	0% (100%)
Multiobjetivo e Multirrestrição	0% (100%)	-

Na Tabela 5, a expressão “X% (Y%)” representa o percentual de soluções dominadas (inferiores) X, e o percentual de soluções não dominadas (não inferiores) Y, da respectiva abordagem, quando comparada à outra. Na tabela, vê-se que as abordagens apresentaram desempenho equivalente, quando são analisadas apenas soluções de qualidade. Considera-se aqui que uma solução de qualidade é aquela com percentual de cobertura não inferior a 85%, com percentual de proteção não inferior a 90% e com percentual de exposição igual a 0%.

Esse resultado mostra que os pesos atribuídos aos critérios $\alpha = 10$, $\beta = 10$, $\gamma = 10$ e $\delta = 1$ da abordagem mono-objetivo são adequados para o cenário proposto. Não obstante, os valores dos fatores α , β e δ foram obtidos em Ligeti; Zander (1999) após um estudo dos seus impactos no processo de otimização. O valor apropriado para o parâmetro adicional γ , referente ao novo critério $(1 - E_o)$, foi obtido previamente por meio de estudo prévio de valores. Com o valor $\gamma = 10$, observaram-se os melhores resultados. Aqui, verifica-se que, ao se adicionar novos critérios, os fatores de ponderação devem também ser alvos do mesmo tipo de estudo, visto que valores ruins podem prejudicar o processo de otimização, cujo objetivo é encontrar soluções que simultaneamente minimizem, de modo balanceado, todos os critérios.

Caso se considere uma solução de qualidade como aquela com percentual de cobertura não inferior a 85%, com percentual de proteção contra interferências não inferior a 100% e com percentual de exposição excedida igual a 0%, a abordagem multiobjetivo e multirrestrrição se mostra superior, visto que nenhuma das soluções obtidas por meio da abordagem mono-objetivo satisfaz tais critérios. Ou seja, como as restrições são explicitamente tratadas na abordagem multiobjetivo e multirrestrrição, estas são priorizadas ao longo do processo de otimização, o que permite, para este cenário, a obtenção de soluções que não violem as restrições de proteção e de exposição; o que seria exigido num planejamento real pelos órgãos reguladores. Para que a abordagem mono-objetivo privilegie o atendimento das restrições, um novo conjunto de valores dos pesos (α, β, γ e δ) deve ser estipulado mediante novo estudo sobre seus impactos no processo de busca, o que pode tornar o processo de planejamento consideravelmente mais demorado e custoso.

As Tabelas 6 e 7 mostram um comparativo entre o uso da abordagem mono-objetivo com o ajuste dos pesos e o com o uso arbitrário de valores unitários, respectivamente. Nota-se que, com o uso de pesos ajustados ($\alpha = 10$, $\beta = 10$, $\gamma = 1$ e $\delta = 10$), o algoritmo consegue balancear melhor os critérios, chegando a percentuais de cobertura e proteção superiores a 90%, embora eleve os custos. Sem o devido tratamento dos pesos ($\alpha = 1$, $\beta = 1$, $\gamma = 1$ e $\delta = 0$), como apresentado na Tabela 5, a abordagem mono-objetivo privilegia a minimização dos custos e limita seu potencial de melhoria dos demais critérios. Esse comportamento reforça a ideia de que, para a abordagem mono-objetivo, o tratamento dos pesos é uma etapa a mais de otimização, visto que impacta diretamente o desempenho final das soluções. O método multiobjetivo e multirrestrrição proposto neste trabalho supera também essa limitação e não necessita de tratamento prévio de pesos para a otimização, tornando-o mais simples e robusto.

Tabela 6 Mono-objetivo com pesos ajustados

Custo	Cobertura	Proteção	
		Interferência	Exposição
980	0.93	0.90	1.0
980	0.93	0.91	1.0
1330	0.93	0.91	1.0
1330	0.94	0.90	1.0
1330	0.93	0.92	1.0
1330	0.93	0.91	1.0
1540	0.94	0.91	1.0
1330	0.92	0.92	1.0
1540	0.93	0.92	1.0
1540	0.93	0.92	1.0

Tabela 7 Mono-objetivo sem pesos (unitários)

Custo	Cobertura	Proteção	
		Interferência	Exposição
900	0.86	0.92	1.0
900	0.84	0.94	1.0
900	0.83	0.94	1.0
900	0.85	0.93	1.0
900	0.82	0.95	1.0
900	0.84	0.93	1.0
900	0.83	0.95	1.0
900	0.86	0.91	1.0
900	0.84	0.94	1.0
900	0.84	0.94	1.0

4 CONCLUSÃO

O sistema de radiodifusão digital está em crescente adoção e tomará, em um curto período, o posto de principal modelo de transmissão. Essa transição é ainda reforçada pela necessidade iminente de se aproveitar melhor o espectro de frequências, hoje em claro estado de saturação. Essa demanda fez surgir uma série de pesquisas e aplicações de engenharia para a implantação e melhoria dos sistemas de transmissão e recepção. Tais esforços, notadamente, são críticos nos estágios de planejamento das redes de transmissão, exigindo análise de diversos aspectos tanto no que se refere a equipamentos e regulamentação, quanto ao meio em que serão aplicados.

Uma vez que existem diversas variáveis de decisão e funções de avaliação lineares e não lineares envolvidas no planejamento de RFU, se fez necessário um modelo de simulação combinatorial para avaliar cenários de otimização. Embora o referido problema seja tipicamente representado na literatura usando uma única função de avaliação (mono-objetivo), a característica inerente a tal classe de problemas de otimização, seu caráter multiobjetivo e multirrestrição, motivou o uso de uma abordagem com múltiplos critérios para representar e avaliar melhor soluções candidatas. A fim de contribuir nesse campo, o presente trabalho propôs um método de otimização que oferece soluções otimizadas para o problema de cobertura de RFU. Aqui, o modelo com quatro funções de avaliação foi tratado com a representação multicritério, podendo ser estendido para abranger outros aspectos, tais como a maximização do consumo de energia e minimização das emissões de carbono (HATA, 1980) além de poder ser aplicado a problemas de

cobertura no âmbito de outros sistemas, tais como *Wi-Fi*, *WiMAX*, redes celulares, e outros. A inovação do modelo baseia-se na melhoria na forma de se avaliar a qualidade das soluções considerando também a distribuição dentro do espaço de busca. Trata-se de um método apropriado de avaliação multiobjetivo aplicado a um modelo de avaliação mais adequado que aquele apresentado em Rocha et al. (2012) e de melhor desempenho quando comparado com o modelo mono-objetivo apresentado em Ligeti; Zander (1999).

REFERÊNCIAS

- ANATEL. Resolução n. 303. Brasília, Anatel: 2002.
- BROWNLEE, J. Nature-inspired programming Recipes. *Clever Algorithms* [S.l., s.n.], p. 50-129, 2012.
- DEB, K. *Evolutionary algorithms: multi-objective optimization using evolutionary algorithms*. [S.l.: s.n.], 2001. p. 81-140.
- DEYGOUT, J. Multiple knife-edge diffraction of microwaves. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, v. 14, n. 4, p. 480-489, 1966.
- HATA, M. Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 29, n. 3, p. 317-325, 1980.
- KOUTITAS, G. Green network planning of single frequency networks. *IEEE Transactions on Broadcasting*, v. 56, n. 4, p. 541-550, 2010.
- KUCHEN, F.; BECKER, T. C.; WIESBECK, W. *Optimizing the coverage area of single frequency networks*. [S.l.: s.n.], 1996. p. 236-241.
- KUMAR, Y.; DAS, B.; SHARMA, J. Multiobjective, multiconstraint service restoration of electric power distribution system with priority customers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 23, n. 1, p. 261-270, 2008.
- LANZA, M. et al. Coverage optimization in single frequency networks using simulated annealing. *Antennas and Propagation (APSURSI). IEEE International Symposium on*, p. 2789-2792, 2011.
- LANZA, M. et al. Coverage optimization and power reduction in SFN using a hybrid PSO algorithm. *2012 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, Praga, p. 2043-2047, 2012.
- LIGETI, A. *Single Frequency Network planning*. Tese (Doutorado) Royal Inst. of Tech, Radio Comm. Sys. Lab., Ph.D. thesis, Estocolmo, 1999.
- LIGETI, A.; ZANDER, J. Minimal cost coverage planning for single frequency networks. *IEEE Transactions on Broadcasting*, v. 45, n. 1, p. 78-87, 1999.
- MARTINS, R.; LOURENÇO, N.; HORTA, N. Multi-objective multi-constraint routing of analog ICS using a modified NSGA-II approach. *Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD), 2012 International Conference on*, p. 65-68, 2012.

- MICHALEWICZ, Z.; FOGEL, D. B. Designing Evolutionary Algorithms. In: ZBIGNIEW, M. **How to Solve It: Modern Heuristics**. Springer: New York, 2004. p. 161-184.
- MIETTINEN, K. A Priori Methods. **Nonlinear Multiobjective** [S.l.: s.n.], p. 115-129, 1998.
- PLETS, D. et al. On the methodology for calculating SFN gain in digital broadcast systems. **IEEE Transactions on Broadcasting**, v. 56, n. 3, p. 331-339, 2010.
- REBHAN, R.; ZANDER, J. On the outage probability in single frequency networks for digital broadcasting. **IEEE Transactions on Broadcasting**, v. 39, n. 4, p. 395-401, 1993.
- RICNY, V. Single frequency networks (SFN) in digital television broadcasting. **Dept. of Radio Electronics, Brno University of Technology**, Praga, v. 16, n. 4, p. 2-6, 2007.
- ROCHA, A. S. *et al.* An improved multiobjective search method applied to single frequency networks planning. **IEEE Latin America Transactions**, v. 10, n. 1, p. 1143-1148, 2012.
- SALIETO, A. et al. Propagation model calibration for DVB-SH in terrestrial single frequency networks. In: **Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation**. [S.l.: s.n.], p. 1-5, 2010.
- SANTELLA, G.; MARTINO, R. D.; RICCHIUTI, M. Single frequency network (SFN) planning for digital terrestrial television and radio broadcast services: the italian frequency plan for T-DAB. In: **Vehicular Technology Conference, 2004. VTC 2004-Spring. 2004 IEEE 59th**. [S.l.: s.n.], v. 4, p. 2307-2311, 2004.
- SILVERMAN, B. W. **The kernel method for multivariate data: density estimation for statistics and data analysis**. [S.l.: s.n.], 1986. p. 75-93.
- VELEZ, M. M. et al. **Measurement based software design for DVB-T an TDAB Single Frequency Network planning and coverage prediction**. [S.l.: s.n.], 2000. p. 607-610