

# Um Algoritmo Heurístico para o Posicionamento de Transmissores em Redes de Frequência Única

Christian Rodrigues, Lisandro Lovisoló

**Resumo**—Numa rede de frequência única (SFN), diferentes transmissores operam conjuntamente na mesma banda para cobrir uma região geográfica. A localização das estações deve ser escolhida de forma a maximizar a cobertura, enquanto restrições de projeto são satisfeitas. Neste trabalho, conhecimento prévio relevante para o projeto de SFN é incorporado num método heurístico para projetar uma SFN para servir uma região de interesse ROI. O algoritmo iterativo proposto obtém a quantidade de estações e suas localizações, um arranjo de estações, que satisfazem o critério de cobertura desejado. A capacidade do algoritmo é exemplificada usando a região da cidade de Queimados, Rio de Janeiro, Brasil.

**Palavras-Chave**—Redes de frequência única, cobertura, TV digital, otimização.

**Abstract**—In a Single frequency networks (SFN), several transmitters operate together using the same frequency band for service coverage. The locations of the stations must be chosen to maximize coverage while satisfying some design restrictions. In this paper, relevant expertise on SFN design is incorporated in an heuristic method for designing an SFN to serve a particular region of interest (ROI). The proposed iterative algorithm obtains the quantity of stations that are necessary to achieve the desired coverage and their positions (their arrangement). To demonstrate the algorithm capabilities, a test case is made in the city of Queimados in Rio de Janeiro, Brazil.

**Keywords**—SFN, optimization, DTV coverage.

## I. INTRODUÇÃO

Usualmente, o objetivo de projeto de uma SFN (*single frequency network*) de TV Digital é garantir a cobertura numa região, isto é, que a intensidade do campo elétrico recebido seja maior que um limiar [1], garantindo assim a recepção adequada. Em geral, há uma região de interesse (ROI) na qual o serviço deverá ser preferencialmente provido. As estações transmissoras devem ser dispostas de forma a prover uma cobertura combinada que satisfaz os requisitos de projeto.

A obtenção da disposição dos transmissores pode considerar i) um conjunto de posições fixas para as estações e um algoritmo para otimizar suas alturas, padrões de irradiação, e potências de transmissão; ou ii) transmissores iguais e um algoritmo que otimize sua disposição; ou iii) uma combinação dessas estratégias. Por exemplo, [2] empregou a primeira abordagem, enquanto [3] e [4] empregaram algoritmos genéticos na segunda abordagem. Alguns trabalhos consideram ainda que o atraso relativo entre os sinais provenientes de diferentes estações deve estar dentro do intervalo de guarda da SFN [5]. A segunda abordagem é o que se chama de problemas de *Location Allocation* [6] ou *Facility Location* [7].

Christian Rodrigues, TV Globo e PEL–UERJ, christianfragoas@gmail.com; Lisandro Lovisoló, PEL–UERJ, lisandro@uerj.br.

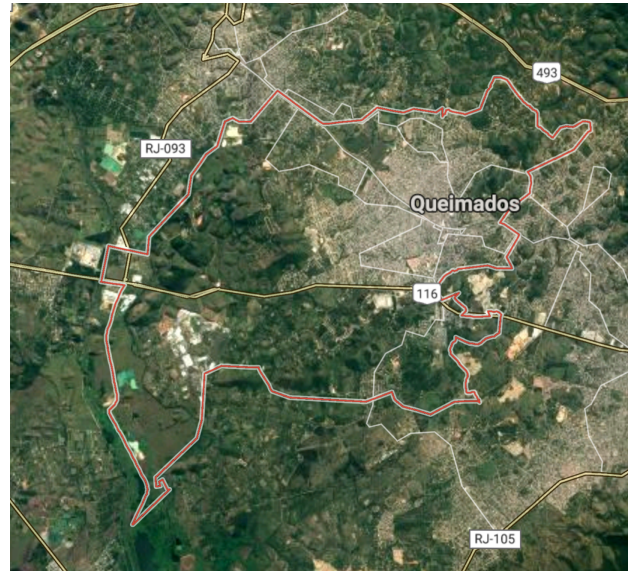


Fig. 1. Imagem satelital do município de Queimados, a ROI está contornada em vermelho. Neste trabalho, consideraremos essa região em nossas simulações.

A cobertura de uma estação pode variar em função de sua localização, dependendo do terreno, o enlace resultante e a respectiva perda de percurso; assim, propomos uma abordagem que obtém a localização de estações de redes SFN que garantem a cobertura de uma ROI incluindo o relevo. O algoritmo proposto emprega heurísticas (conhecimento prévio ou experiência) de forma a obter as localizações das estações. Assim, a abordagem proposta é mais rápida que um método força bruta (teste de todas as possibilidades). O algoritmo apresentado retorna a quantidade de estações que devem compor a SFN e suas localizações que garantem a cobertura da ROI.

Além desta introdução, este artigo contém mais 4 seções. Na Seção II, formula-se o problema. A III traz a abordagem proposta, enquanto a Seção IV traz alguns resultados de simulação. Nossas conclusões são apresentadas na Seção V.

## II. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Seja  $R$  uma região geográfica (fragmento de uma superfície de relevo) composta de  $\#R = I \times J$  elementos (ou pixels) de elevação  $h(i, j)$ . A fração de  $R$  na qual a cobertura da SFN é almejada é a ROI. A Figura 1 exemplifica isso no município de Queimados, Rio de Janeiro, Brasil.

Para medir a capacidade de cobertura da SFN, definiremos a fração de células nas quais o campo elétrico recebido da

SFN está acima do limiar desejado. Seja  $n = 1, 2, \dots, N$ , o índice do transmissor, se  $E_{Rx}(n, i, j)$  é a intensidade do campo elétrico recebido na célula  $(i, j)$  do transmissor  $n$ , então, se

$$\max_{n \in \{1, \dots, N\}} E_{Rx}(n, i, j) \geq E_{\min}, \quad (1)$$

a condição de recepção é satisfeita<sup>1</sup>. Em nossas simulações, para prever a intensidade do campo elétrico usamos o modelo de propagação ITU-R P.1546-1 [8] e  $E_{\min} = 58 \text{ dB}\mu\text{V}$  [1].

Podemos definir a matriz de cobertura de cada estação via

$$\text{Cobertura}(n, i, j) = \begin{cases} 1, & \text{se } E_{Rx}(n, i, j) \geq E_{\min} \\ 0, & \text{no resto.} \end{cases} \quad (2)$$

Consequentemente, se  $\#\text{ROI}$  é a quantidade de células da ROI, a fração da ROI, coberta pela  $n$ -ésima estação transmissora, é

$$\text{FC}(n) = \frac{\sum_{i \in \text{ROI}} \sum_{j \in \text{ROI}} \text{Cobertura}(n, i, j)}{\#\text{ROI}}. \quad (3)$$

E, a superposição entre as coberturas das estações  $i$  e  $j$  é

$$\text{Comb}_{\text{cob}}^N(i, j) = \sum_{n=1}^N \text{Cobertura}(n, i, j). \quad (4)$$

Assim, a fração da ROI a qual o campo elétrico recebido da SFN está acima do limiar desejado é

$$\text{FC}_N = \frac{\sum_{i \in \text{ROI}} \sum_{j \in \text{ROI}} \mathbb{Q}(\text{Comb}_{\text{cover}}^N(i, j) \geq 1)}{\#\text{ROI}}, \quad (5)$$

na qual  $\mathbb{Q}(x) = 1$  se  $x \geq 1$ , ou 0, caso contrário. A solução para o problema de localização das estações corresponde à menor quantidade de estações ( $N$ ) e suas localizações que tornam  $\text{FC}_N$  maior que um critério de projeto desejado (a fração da ROI que deve ser coberta). Isto é,

$$\{(i_n^*, j_n^*)\}_{n=1 \dots N} = \arg \max_{(i, j) \in R^N} \text{FC}_N. \quad (6)$$

Idealmente, quanto menor o valor de  $N$ , melhor. As restrições do problema não estão explicitamente apresentadas em (6), estas são: o relevo, a ROI, e as características dos transmissores.

A equação (6) não é diferenciável e pode não apresentar máximos discerníveis. Como testar todas as possíveis combinações de posições para obter uma solução não é adequado, propomos um algoritmo heurístico para obter  $N$  e  $\{(i_n^*, j_n^*)\}_{n=1 \dots N}$  que incorpora aspectos relevantes para a alocação das localizações das estações da SFN usando superfícies em  $R$ .

### III. ALGORITMO PROPOSTO

O algoritmo proposto busca iterativamente a solução a partir de critérios que avaliam o potencial de sítios para estações. Os critérios dependem do relevo, da cobertura alcançada, das posições relativas entre as estações transmissoras e também das regiões de superposição de cobertura. Na iteração  $t$ , avalia-se a cobertura do arranjo de transmissores com posições

$$(i_n(t), j_n(t))_{n=1 \dots N} = \arg \max_{i, j \in R} \text{Cand}(n, t, i, j). \quad (7)$$

<sup>1</sup>Esta formulação ignora os atrasos relativos entre os sinais de diferentes transmissores. Ela é razoável se os transmissores distam menos que  $cT_g$ , onde  $c$  é a velocidade da luz e  $T_g$  o intervalo de guarda de uma SFN.

Ou seja, utiliza-se  $N$  superfícies  $\text{Cand}(n, t, i, j)$  (uma para cada estação) para obter as posições candidatas  $\{(i_n(t), j_n(t))\}_{n=1, \dots, N}$  dos  $N$  transmissores na iteração  $t$ . A superfície  $\text{Cand}(n, t, i, j)$  é composta heurísticamente [9] e avalia a adequação de cada  $(i, j) \in R$  como sítio para a estação  $n$ .

A "função heurística" (de domínio  $R$ ) proposta é

$$\text{Cand}(n, t, i, j) = \text{FRC}(n, t, i, j) \times \text{RB}(n, t, i, j) \quad (8)$$

$$\times [\kappa \text{AN}(i, j) + \alpha \text{SFR}(i, j) + \gamma \text{NC}(n, t, i, j)] + A(n, t, i, j),$$

que agrega diferentes conhecimentos, isto é, inclui aspectos relevantes para o projeto de SFNs, conforme discutido a seguir.

#### A. Conhecimentos Considerados

A equação (8) emprega 5 superfícies para avaliar a adequação de uma posição para o transmissor  $n$  na iteração  $t$ . Algumas incorporam informações relevantes do relevo para o projeto de SFNs, outras servem para aprender (armazenar resultados) de iterações prévias.

1) *Altura Normalizada*: Quanto mais alta estiver a antena, a princípio, maior a área coberta por ela – isso é rapidamente constatado nas curvas de perda de percurso do modelo de propagação da ITU-R P. 1546 [8]. Assim, devemos atribuir maior potencial a uma posição  $(i, j)$  para ser sítio de uma estação quanto maior for  $h(i, j)$ ; para isso, definimos

$$\text{AN}(i, j) = \left( \frac{\log_{10} h(i, j)}{\max_{i, j} \log_{10} h(i, j)} \right), \quad (9)$$

mapeando o relevo da região no intervalo  $[0, 1]$ .

2) *Regiões Não-Cobertas*: Se uma zona da ROI for pouco coberta pelo arranjo de estações, a princípio, para melhorar a cobertura nessa região, deveríamos aproximar estações da mesma. Para isso, primeiramente, os máximos locais [10] do relevo são identificados e a ROI é dividida em células de Voronoi cujos centroides são esses máximos (isto só é realizado uma vez quando o algoritmo inicia). Na iteração, testa-se se a célula (seu centroide) é ou não coberta pela SFN, com a equação (4) definindo uma superfície de cobertura. Se coberta, os elementos da célula de Voronoi são zerados; caso contrário, um valor não-nulo é atribuído ao centroide e cada elemento da célula recebe um valor que decresce com a distância ao centroide.

Seja  $(i_c, j_c)$  o máximo local do relevo (centroide) que produz a  $c$ -ésima célula de Voronoi, usam-se  $C = \rho_{LM} IJ$  máximos locais para isso ( $0 < \rho_{LM} < 1$ , i.e.,  $\rho_{LM}$  é a fração dos máximos locais considerada). Assim, obtêm-se os  $C$  máximos locais de  $h(i, j)$  dentro da ROI

$$\{(i_c, j_c)\}_{c=1 \dots C} = \text{máximos locais}(h, \text{ROI}, \rho_{LM}). \quad (10)$$

Para a  $c$ -ésima célula (isto é,  $(i, j) \in V_c$ ) define-se a superfície

$$D_c(i, j) = \begin{cases} g(d_c), & (i, j) \text{ não é coberto} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (11)$$

$$\text{com } g(d_c) = \frac{d_M - d_c}{d_M}, \quad d_M = \max_{(i, j) \in V_c} d_c \quad (12)$$

$$\text{e } d_c = \sqrt{(i - i_c)^2 + (j - j_c)^2} \quad (13)$$

O máximo de  $D_c$  é o que ocorre em  $(i_c, j_c)$  e decresce em função da distância  $d_c$  entre  $(i, j)$  e  $(i_c, j_c)$ . Identificadas as células de Voronoi mais próximas da estação  $n$ , define-se o conjunto de células  $C_n$  (contendo  $\#C_n$  elementos). Com isso, define-se a superfície “Não Coberta” associada ao  $n$ -ésimo transmissor

$$NC(n, i, j) = \log_{10} \left( \frac{\sum_{c \in C_n} D_c(i, j)}{\#C_n} \right). \quad (14)$$

Tal superfície deve ser atualizada a cada iteração, apesar de não explicitado acima por simplicidade. As superfícies NC de cada estação são empregadas na equação (8) visando atraí-las para as regiões não cobertas da ROI. Como  $NC(n, i, j) \cup NC(m, i, j) = \emptyset$  se  $n \neq m$ , espera-se que o uso dessas superfícies espalhe as estações pela região.

3) *Sítios Fora da ROI*: Em alguns casos, pode ser melhor posicionar transmissores da SFN fora da ROI em vez de dentro dela. Assim, SFR é obtida a partir do relevo de forma a avaliar o potencial de sítios fora da ROI para posicionar estações transmissoras, isto é, visa atrair estações para regiões externas à ROI. Para obter SFR, encontram-se a fração de  $0 < \rho_{ROI} < 1$  máximos locais externos à ROI

$$\{(i_o, j_o)\}_{o=1 \dots \#C_{ROI}} = \text{local máxima}(h, \overline{ROI}, \rho_{ROI}). \quad (15)$$

A partir deles, tem-se o conjunto  $C_{ROI}$  com  $\#C_{ROI}$  células de Voronoi e constrói-se, similarmente a NC,

$$SFR(i, j) = \log_{10} \left( \frac{\sum_{c \in C_{ROI}} D_o(i, j)}{\#C_{ROI}} \right) + g(d_{\text{centro ROI}}), \quad (16)$$

na qual  $d_{\text{centro ROI}}$  é o centroide da ROI,  $g(d_{\text{centro ROI}})$  é definida como na equação (12)) e tem a função de não permitir que a estação se afaste demais da ROI. Assim, essa expressão atribui maior potencial a sítios altos mais próximos à ROI (em concordância com o senso comum). Espera-se que a combinação de AN, NC e SFR contrabalanceie diferentes aspectos relevantes para a alocação dos sítios de estações transmissoras em SFNs.

4) *Fração Coberta da ROI*: O objetivo final do projeto de SFNs é maximizar a cobertura da ROI, como definido na equação (5). Arranjos de estações e suas permutações que já mostraram prover cobertura ruim não devem ser novamente testados. Definimos uma superfície que visa aprender isso, ela interfere no espaço de soluções reduzindo a complexidade computacional [9]. Evita-se o teste desnecessário de pontos que já se mostraram individualmente ruins – aqueles que proveram coberturas inferiores que as obtidas em outras iterações. Consequentemente, aumenta-se a probabilidade de sítios apropriados serem empregados em outros arranjos.

FC armazena uma avaliação da cobertura individual da ROI obtida por uma estação num sítio específico. Todas as localizações candidatas recebem inicialmente o valor 1, o máximo. A cada iteração, primeiramente avalia-se a cobertura a partir da posição candidata

$$F_{\text{cobertura}}(i_n, j_n) = \frac{\sum_i \sum_j \text{Cobertura}(n, i, j)}{\#ROI}, \quad (17)$$

na qual  $(i_n, j_n)$  é a posição testada para o  $n$ -ésimo transmissor. A partir disso, atualiza-se

$$FRC(i_n, j_n) = \begin{cases} \epsilon, & F_{\text{cobertura}}(i_n, j_n) \leq \epsilon \\ \frac{F_{\text{cobertura}}(i_n, j_n)}{\max_{i,j} F_{\text{cobertura}}(i, j)}, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (18)$$

$FRC(i_n, j_n)$  é incrementada a cada iteração com o teste de novas posições candidatas para estações transmissoras, i.e.,  $(i_n, j_n)$  muda ao longo das iterações  $t$ , por isso, na equação (8) emprega-se  $FRC(t, i, j)$ . Em nossos experimentos,  $\epsilon = 0,01$ , atribuindo a sítios que proveram coberturas pequenas (ou nenhuma) da ROI um valor não-nulo, assim não eliminando-os totalmente, evitando que descontinuidades na superfície de decisão eliminem as chances de sítios vizinhos terem o seu potencial prejudicado.

5) *RB*: Em cada iteração, restringimos o movimento dos sítios candidatos em uma vizinhança do sítio testado na última iteração, conforme a Figura 2.a). O raio da vizinhança para o  $n$ -ésimo transmissor da iteração  $t-1$  para a iteração  $t$  é  $r(n, t)$ . Na iteração  $t$ , ele é comprimido (expandido) de um fator  $\tau$  se da iteração  $t-2$  para a  $t-1$  sua FRC aumentou (diminuiu). Assim, se a cobertura diminuiu, a área de busca aumenta, se a cobertura aumentou, a área de busca diminui. Usamos  $\tau = 2$  e impomos como mínimo para  $r(n, t)$  o comprimento dos elementos dos dado de relevo e como máximo a metade do (menor) lado da região  $R$ .

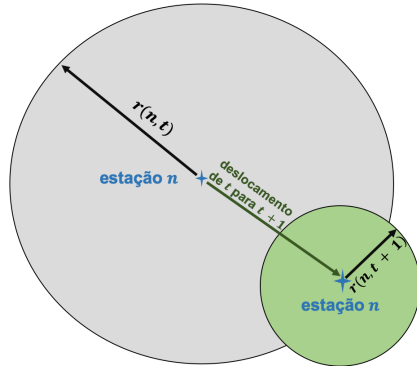
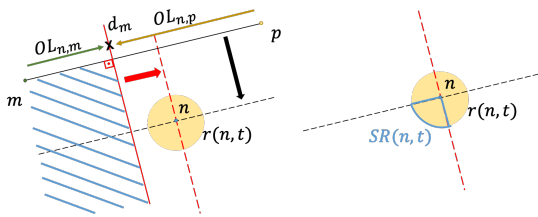
Restringimos a área na qual uma estação pode ser mover considerando também a interação entre os transmissores. Para isso, avalia-se a superposição das coberturas individuais e a região de busca (RB) é restrita a um quadrante, conforme a Figura 2.b). Para isso, avalia-se as superposições de cobertura do transmissor  $n$  com as duas estações mais próximas,  $m$  e  $p$ . O segmento de reta que une  $m$  e  $p$  define um dos eixos do quadrante de RB para o transmissor  $n$ . O outro eixo é perpendicular a ele no ponto que dista de  $m$  de

$$d_m = \frac{OL_{m,n}}{OL_{m,n} + OL_{p,n}} d(m, p). \quad (19)$$

Acima,  $d(m, p)$  é o comprimento do segmento entre  $m$  e  $p$ , e  $OL_{m,n}$  é a sobreposição das coberturas dos transmissores  $m$  e  $n$ , i.e., a quantidade de elementos da ROI cobertos pelas duas estações. Nota-se que a região de busca (quadrante) do  $n$ -ésimo transmissor (na iteração  $t$ ) depende do arranjo entre três transmissores  $n$ ,  $m$  e  $p$  e das sobreposições entre a cobertura do primeiro e as dos outros dois, sendo direcionada para aquele com o qual se sobrepõe.

## B. Combinação das Superfícies

Nota-se que enquanto FRC, RB e NC (e  $A$ ) dependem da iteração, AN e SFR são calculadas somente uma vez em função da ROI e de  $R$ . O uso dessas superfícies, além de permitir representar aspectos relevantes para o projeto de SFNs, permite aplicar o conceito de *tabu search*, i.e., “uma meta-heurística que guia busca usando uma heurística local para explorar o espaço de solução além da otimalidade local” em tradução livre de [11]; o que é conseguido, no algoritmo proposto, movendo as estações em função da composição de


 a) Alteração do raio de busca  $r(n,t)$  entre iterações.


b) Construção do quadrante (esq) e aplicação do raio (dir).

Fig. 2. Construção da região de busca.

superfícies na região, avaliando como o ambiente influencia as posições candidatas para as estações; além disso, o histórico de posições de estações testadas e suas permutações – a memória do algoritmo – restringe o conjunto de combinações de posições candidatas e evita revisitá-las. Cabe salientar que, apesar de a Busca Tabu evitar o reteste de ótimos locais, o algoritmo proposto utiliza a superfície aleatória  $A(n,t,i,j)$  em pequena escala de forma que localidades candidatas já testadas componham novas combinações possam vir a ser testadas em outras iterações.

Na equação (8), a soma ponderada de  $AN(i,j)$ ,  $SFR(i,j)$  e  $NC(n,t,i,j)$  é multiplicada por  $FRC(t,i,j)$  e  $RB(n,t,i,j)$ . Os termos combinados visam guiar estações para sítios que formem arranjos com potencial para fornecer boa cobertura combinada. Temos, os três fatores somados incorporam experiência sobre o projeto de cobertura de RF. A soma é multiplicada por fatores ( $FRC(t,i,j)$  e  $RB(n,t,i,j)$ ) que limitam o movimento das estações em função do que já foi testado em iterações anteriores. Combina-se o conhecimento de pequena escala (da soma que visa guiar estações para pontos altos próximos a regiões não cobertas da ROI) com o de larga escala (coberturas da SFN na região previamente avaliadas com um modelo de propagação adequado). Os resultados apresentados, são obtidos com pesos  $\kappa = 2$ ,  $\alpha = 2$  se  $FC(n) = 0$  ou 8 em caso contrário e  $\gamma = 5$ , na equação (8); esses valores foram obtidos a partir de testes não exaustivos mas com bons resultados considerando uma ROI quadrada e um  $R$  padrão.

### C. Algoritmo Iterativo

Em cada iteração, o modelo de propagação ITU-R P.1546 [8] é empregado para avaliar a intensidade do campo elétrico na ROI e obter as coberturas de cada uma das  $N$  estações. O pseudo-código do processo é apresentado

#### Algorithm 1 Posicionamento das $N$ estações da SFN

```

1: inputs:  $h(i,j)$ , ROI,  $SFR(i,j)$ ,  $AN(i,j)$ ,  $E_{\min}$ ,  $N$ 
2:  $t \leftarrow 0$ ,
3: for  $n = 1$  to  $N$  do
4:   compute  $E_{Rx}(n,t,i,j)$  usando ITU-R P.1546
5:   compute  $FC(n,t)$ 
6: compute  $FC_N(t)$ 
7:  $t \leftarrow 1$ 
8: repeat
9:   for  $n = 1$  to  $N$  do
10:    compute  $FRC(n,t,i,j)$ 
11:    compute  $RB(n,t,i,j)$ 
12:    compute  $NC(n,t,i,j)$ 
13:    generate  $A(n,t,i,j)$ 
14:    compute  $Cand(n,t,i,j)$ 
15:     $(i_n(t), j_n(t)) \leftarrow \arg \max_{i,j} Cand(n,t,i,j)$ 
16:   if  $Perm\{(i_n(t), j_n(t))\}_{n=1\dots N} \notin H_{cand}$  then
17:     for  $n = 1$  to  $N$  do
18:       compute  $E_{Rx}(n,t,i,j)$  usando ITU-R P.1546
19:       compute  $FC(n,t)$ 
20:     compute  $FC_N(t)$ 
21:      $H_{cand}(t) \leftarrow \{(i_n(t), j_n(t))\}_{n=1\dots N}$ 
22:      $t \leftarrow t + 1$ 
23:   else
24:     update  $r(n,t)$  (ver III.A.5)
25:   until  $t > t_{\max}$  or  $FC_N(t) \geq Cobertura_{\min}$ 
26: output:  $\max_t FC_N(t)$  and  $\{(i_n(t^*), j_n(t^*))\}_{n=1\dots N}$ ,
    $t^* = \arg \max_t FC_N(t)$ 

```

no Algoritmo 1. Para melhorar a eficiência, o arranjo (e suas permutações) testados na iteração são armazenados, e se ele se repetir numa iteração subsequente então os raios  $r(n,t)$  aumentam e a superfície  $A(n,t,i,j)$  é novamente sorteada dentro do raio de busca.

As entradas do algoritmo são a superfície de elevação  $h(i,j)$  de  $R$ , o contorno da ROI (dados dependentes da região) e outros independentes do arranjo de estações como FR e AN, obtidos a partir de  $h(i,j)$ . Outro parâmetro relevante é a quantidade inicial de estações transmissoras. Como arranjo inicial, emprega-se os vértices de  $R$  e quando necessário ( $N > 4$ ) os pontos médios das retas que unem dois vértices adjacentes. Além disso, o algoritmo recebe parâmetros sistêmicos como  $E_{\min}$  e o modelo das antenas (igual para todas) <sup>2</sup>.

Outros parâmetros inerentes ao algoritmo são a quantidade máxima de iterações  $t_{\max}$  e a fração mínima de cobertura desejada  $Cobertura_{\min}$ . O algoritmo retorna os sítios que fornecem um arranjo que maximiza a cobertura da SFN, i.e.,  $\{(i_n(t^*), j_n(t^*))\}_{n=1\dots N}$  com  $t^* = \arg \max_t FC_N(t)$ . No Algoritmo 1, a iteração  $t$  está explícita nas variáveis. Na linha 16, do Algoritmo 1,  $Perm\{(i_n(t), j_n(t))\}_{n=1\dots N}$  denota as possíveis permutações das estações nas  $N$  posições.  $H_{cand}$  na linha 21 armazena os arranjos já testados.

<sup>2</sup>Assumimos que todas as antenas terão a mesma altura acima do relevo e que elas são isotrópicas e transmitem com a mesma potência; além disso, como já mencionado, assume-se que todos os transmissores operam respeitando o intervalo de guarda da SFN na ROI.

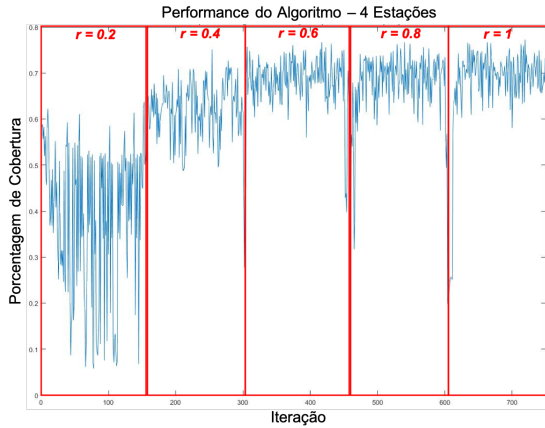


Fig. 3. Evolução da fração da ROI coberta quando 4 estações são consideradas e  $\rho_{LM}$  varia de 20% dos máximos locais até 100% deles.

Quando  $t_{\max}$  é alcançado, o Algoritmo 1 pode ser reiterado aumentando  $\rho_{LM}$  e/ou  $\rho_{ROI}$ . A quantidade de estações  $N$  também pode ser aumentada de forma a aumentar a cobertura da SFN, como ilustrado pelo Algoritmo 2. Nos resultados apresentados  $\rho_{LM}$  é incrementado de 0.2 até 1 com passo 0.2 e  $N_{\max} = 9$ . Ao passar de  $N$  a  $N + 1$  estações, as posições iniciais das estações são definidas usando o racional apresentado no início da Subseção III-B.

**Algorithm 2** Algoritmo com aumentos na quantidade de estações da SFN e na quantidade de máximos locais considerados.

```

for  $N = 1$  to  $N_{\max}$  do
  atribua  $\{(i_n(1), j_n(1))\}_{n=1 \dots N}$ 
   $\rho_{LM} \leftarrow \rho_0$ 
  while  $\rho_{LM} \leq \rho_{\max}$  do
    execute Algoritmo 1
     $\rho_{LM} \leftarrow \rho_{LM} + \rho_0$ 

```

#### IV. RESULTADOS

O algoritmo foi implementado em MatLab e executado em ambiente Windows Server 2008. A região de teste contém  $550 \times 650$  pixels em  $270 \text{ km}^2$ , com uma ROI de 85247 pixels em  $77 \text{ km}^2$  (Queimados, Rio de Janeiro), a Figura 1 a ilustra. O método proposto procura por combinações de sítios que maximizem a cobertura da SFN. A Figura 3 mostra como a cobertura evolui quando se consideram quatro estações com EIRP de 10 W,  $\rho_{LM}$  varia entre 0,2 e 1, com passo 0,2 e  $\rho_{ROI}$  de 0,3. Se deseja-se cobrir mais de 80% da área da ROI, neste caso, a princípio, é necessário aumentar  $N$ .

Na Figura 4, apresentamos os resultados obtidos com o aumento de  $N$ , para o caso extremos de estações com EIRP de apenas 1 W. Em linha tracejada vemos a fração coberta pelo arranjo testado na iteração  $t$  e, em traço contínuo, tem-se a cobertura máxima até a iteração. Esses resultados consideram o incremento de  $N$  a cada 200 iterações.

#### V. CONCLUSÕES

Considerando a adoção de redes de frequência única para diferentes serviços de telecomunicações, propõe-se um método

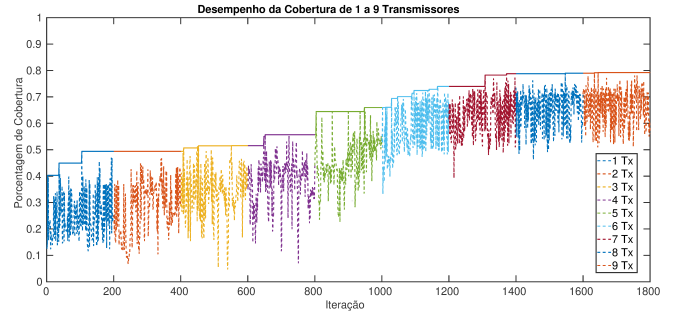


Fig. 4. Evolução da cobertura usando de 1 a 9 transmissores. Em linha tracejada tem-se a fração coberta pelo arranjo testado na iteração  $t$  e, em traço contínuo, tem-se a cobertura máxima até a iteração.

para obter conjuntos de sítios que satisfaçam o requisito de cobertura numa região de interesse. A abordagem heurística proposta incorpora aspectos relevantes ao projeto de SFNs de forma a obter a quantidade de estações necessárias e suas posições. O método proposto evolui para o aumento da cobertura na região de interesse. Como a função heurística proposta emprega uma combinação de superfícies que representam características relevantes ao projeto de SFNs, um conjunto de parâmetros de calibração é definido empiricamente para ponderá-las. Futuramente, outras características relevantes ao projeto de SFNs podem ser adicionadas para melhorar o desempenho do método ou especializá-lo para certas aplicações, como por exemplo, considerar custos de sítios diferentes, ou a densidade populacional na ROI. O método proposto foi testado usando o modelo de propagação ITU-R P.1546, mas é possível empregar outro modelo ou frequência, dependendo do serviço e da SFN.

#### REFERÊNCIAS

- [1] C. F. F. Rodrigues, L. Lovisololo, and F. d. A. Peres, "Receivers behavior in a isdb-t's single frequency network," *SET International Journal of Broadcast Engineering*, vol. 2, pp. 44–54, 2016.
- [2] F. Kuchen, T. Becker, and W. Wiesbeck, "Optimizing the coverage area of single frequency networks," in *International Broadcasting Convention (IBC)*, pp. 236–241, IET, 1996.
- [3] N. Tuban, M. Azman, K. Noordin, and M. Ismail, "Genetic algorithm approach for dynamic configuration of multicast broadcast single frequency network deployment in lte," in *Information Technology and Multimedia (ICIM), 2011 International Conference on*, pp. 1–5, IEEE, 2011.
- [4] L. T. Hoffman and A. T. Gómez, "Algoritmos para o problema de localização de torres de radiotransmissão," *III Workshop dos Cursos de Computação aplicada do INPE, Anais do III Workcpa*, pp. 1–7, 2001.
- [5] M. Lanza, A. Gutierrez, I. Barriuso, M. Domingo, J. Perez, L. Valle, and J. Basterrechea, "Optimization of single frequency networks for dvb-t services using sa and pso," in *Antennas and Propagation (EUCAP), Proceedings of the 5th European Conference on*, pp. 702–706, IEEE, 2011.
- [6] C. L., "Heuristic methods for location-allocation problems," *SIAM Review*, vol. 6, no. 1, pp. 37–53, 1964.
- [7] N. A. H. Fallah and A. M., *Facility Location: Concepts, Models, Algorithms and Case Studies, Contributions to Management Science*. Physica-Verlag Heidelberg, 2009.
- [8] ITU-R P.1546-1, "Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3000 MHz," *International Telecommunication Union, Geneva.*, 2003.
- [9] S. Russel and P. Norvig, *Inteligência Artificial*. Elsevier, 2013.
- [10] E. R. Dougherty, *Digital image processing methods*. Marcel Dekker, Inc., 1994.
- [11] F. Glover, "Tabu search," *Encyclopedia of Operations Research and Management Science*, pp. 37–53, 2003.