

UMA EXTENSÃO DO CONCEITO DE “DISPONIBILIDADE DE UMA ESTAÇÃO” PARA A RESOLUÇÃO DO PROBLEMA DINÂMICO DE ATRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIAS

Andréa Carneiro Linhares
Universidade Federal do Ceará
andrea.linhares@ufc.br

Philippe Michelon
Université d'Avignon
philippe.michelon@univ-avignon.br

Resumo

O Problema Dinâmico de Atribuição de Frequências foi estudado no âmbito de exercícios militares, onde uma rede sem fio é expandida progressivamente a fim de assegurar a comunicação entre tropas militares. Novas antenas e conexões entre antenas existentes são estabelecidas dinamicamente. Toda nova ligação entre duas estações (posição física das antenas) requer a atribuição de um par de frequências aos dois sentidos da comunicação, de modo que interferências sejam evitadas.

Uma estratégia gulosa online é proposta, a qual integra uma ponderação sobre as frequências disponíveis na vizinhança de uma estação, associada ao conceito de disponibilidade. A disponibilidade pode ser compreendida com uma medida do potencial que uma estação tem para acolher conexões suplementares sem ocasionar interferências nas comunicações (ruído).

Várias medidas estendendo o conceito de disponibilidade de uma estação foram avaliadas e comparadas. Os experimentos foram realizados a partir de cenários realistas fornecidos pelo CELAR (*Centre d'Électronique de l'Armement*).

Palavras-chave: Otimização Combinatória, Problema Dinâmico de Atribuição de Frequências., Disponibilidade Ponderada.

Abstract

The Dynamic Frequency Assignment Problem (D-FAP) was studied in the context of military exercises, where a wireless network is progressively extended to ensure communication between troops. New antennas and new connections between antennas are thus dynamically established. Every new connection between two sites (physical locations of antennas) requires assigning permanently a pair of frequency to both directions of communication, as to avoid interferences.

An on-line greedy strategy is proposed, which weightily combines frequencies available nearby a station based on the so-called site availability measure. Availability is a metric that measures a station's capability to hold several supplementary connections without causing communication interference (noise).

Several measures with extending the site availability concept are evaluated and compared. Numerical experiments are conducted on realistic scenarios provided by the CELAR (Centre d'Électronique de l'Armement).

Keywords: Combinatorial Optimization, Dynamic Frequency Assignment Problem, Weightily availability.

PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

1. Introdução

O problema de atribuição de frequências em redes de comunicação rádio-base é típico de aplicações militares [Linhares (2007), Dupont(2005), Artigues et al.(2004)]. Ele consiste na atribuição de frequências às comunicações Hertzianas durante uma operação tática. A originalidade principal do problema provém da sua dimensão dinâmica. Novas comunicações devem ser estabelecidas ao curso do exercício militar, necessitando, assim, de novas alocações. A rede de comunicação evolui da seguinte maneira:

- Uma rede inicial (núcleo) é primeiramente instalada. As antenas são posicionadas dentro da área destinada ao exercício tático e conexões são estabelecidas entre certos pares de antenas para permitir a comunicação entre as mesmas. Em seguida, novas comunicações são estabelecidas, entre as antenas existentes ou através de novas antenas.

Tal evolução dessa rede de comunicação origina três tipos de problemas de atribuição de frequências distintos. O primeiro corresponde à atribuição de frequências às comunicações que constituem o núcleo inicial. Trata-se de um problema clássico de alocação de frequências [Murphey et. al.(2003), Aardal et al.(2003), Smith et al.(1997)]. O segundo é associado ao aspecto dinâmico da evolução da rede, onde a atribuição é realizada à medida em que as conexões são estabelecidas. Mesmo que a reatribuição das frequências designadas às comunicações existentes seja tecnicamente possível, tais mudanças são bastante dispendiosas em tempo e recursos humanos. A estratégia adotada é evitar, tanto que possível, qualquer alteração nas atribuições já realizadas. Deste modo, o segundo problema consiste em atribuir frequências às novas comunicações de forma "gulosa" e *on line*. É importante, neste momento, ressaltar que no contexto do problema de atribuição de frequências, o essencial dos trabalhos consagrados aos algoritmos online refere-se às redes móveis celulares [Brunato(1999), Rajasekaran et al.(1997)]. Um terceiro problema aparece, quando nenhuma frequência pode ser atribuída sem ocasionar ruídos (interferência) na comunicação. É necessário, então, alterar certas frequências atribuídas de maneira a tornar a rede consistente. Vários objetivos podem ser considerados como, limitar o número de frequências realocadas, minimizar o número de antenas afetadas, etc. (Allen et al. ,2001). Apesar de considerarmos a problemática na sua íntegra, este trabalho trata do segundo problema: atribuir frequências dinamicamente à medida em que a demanda por conexões se apresenta. Além disso, todas as conexões chegam de modo *on line*, uma após a outra, sem a configuração de um núcleo inicial. Uma abordagem integrada dos três problemas é discutida em Artigues et al.(2004) e Dupont et al.(2009).

Considerações sobre as características geográficas da rede mostram-se particularmente úteis na obtenção de soluções com um menor número de insucessos na determinação de frequências que não ocasionem interferência, pois permitem construir soluções antecipando a expansão da rede de comunicação. Desse modo, a estratégia que será apresentada baseia-se em métricas obtidas a partir do estudo da vizinhança de uma estação e seu potencial para receber novas conexões.

Este artigo apresenta uma extensão do conceito de disponibilidade (Linhares,2007), obtida a partir da atribuição de pesos à medida da disponibilidade associada às frequências baseada em informações sobre a vizinhança de uma estação. A seção 2 detalha as características do problema estudado. A estratégia baseada na disponibilidade de uma estação e suas variantes são rapidamente definidas na seção 3. Ainda nesta seção os algoritmos gulosos usados na atribuição *on line* de frequências. A associação de pesos diferenciados à disponibilidade de certas frequências com relação a outras é introduzida na seção 4, com toda sua fundamentação matemática. A seção 5 realiza uma comparação da "disponibilidade ponderada" com as estratégias existentes baseadas no conceito original da "disponibilidade de uma estação". Diferentes métodos são avaliados em instâncias obtidas a partir de cenários realistas. A seção 6 conclui o trabalho e apresenta algumas perspectivas de continuidade ao mesmo.

PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

2. Contexto do Estudo

A evolução da rede de comunicação considerada é inteiramente dinâmica. Gradativamente, novas estações são instaladas e novas conexões entre estações (não necessariamente novas) são estabelecidas. Cada conexão entre duas estações é dividida em dois trajetos, em sentidos contrários de comunicação. Para estabelecer uma conexão, é necessário a atribuição de uma frequência a cada um dos seus trajetos. Estas frequências devem ser escolhidas a partir de um domínio frequencial, observando-se as restrições associadas aos riscos de interferências. A alocação de frequências à uma conexão é efetuada de forma imediata, isto é, antes da chegada de uma nova conexão, e de modo irreversível. É importante ressaltar que duas estações jamais possuirão mais de uma conexão ligando-as.

2.1 Características

Os valores disponíveis para a atribuição de uma frequência a um trajeto constituem um conjunto chamado "domínio do trajeto". Neste trabalho, todos os domínios são idênticos e denotados por D . Os valores disponíveis são repartidos em seis grupos, os quatro primeiros de tamanho 140 e os dois últimos de tamanho 210:

- [40000, 40140], [41000, 41140], [42000, 42140], [43000, 43140],
- [44000, 44210], [45000, 45210].

Além disso, os intervalos são divididos em passos elementares de 70 (canal de 7MHz), totalizando 20 valores de frequências possíveis em D .

Cada trajeto é definido por uma estação emissora e uma estação receptora, e sua situação em relação aos outros trajetos induz diversas restrições no intuito de evitar ruídos na comunicação. Um trajeto é dito em emissão com relação à estação que o emite, e similarmente, em recepção com relação à estação que o recebe. A interferência de antenas receptoras e emissoras localizadas na mesma estação impõem as chamadas restrições co-estação. As restrições em campos distantes resultam da intercalação de sinais enviados por uma estação com uma frequência em recepção fora de sua vizinhança - região de proximidade, Murphey et al. (1993). Os tipos de restrições consideradas neste trabalho são:

- Restrições duplex: a diferença entre as frequências atribuídas a dois trajetos procedentes de uma mesma conexão deve ser superior ou igual a 600. Essas restrições são assim denominadas pois impõem uma diferença entre dois trajetos de uma mesma conexão, conexão esta bidirecional. Desse modo, dois trajetos de uma mesma conexão jamais poderão ser alocados a uma mesma frequência;
- Restrições co-estação emissora-receptora: a diferença entre as frequências atribuídas a um trajeto em emissão e um trajeto em recepção numa mesma estação deve ser superior ou igual a 220;
- Restrições co-estação emissora-emissora: a diferença entre as frequências atribuídas a dois trajetos em emissão numa mesma estação deve ser superior ou igual a 100;
- Restrições em campos distantes: um emissor associado a um primeiro trajeto perturba o receptor de um outro trajeto não co-localizado; o valor da diferença é calculado para cada ocorrência da restrição e depende, entre outros fatores, das características dos materiais utilizados e sua situação geográfica. Este valor raramente excede 50;
- Restrições receptora-receptora: trata-se de um caso específico das restrições em campos distantes, quando o receptor do trajeto perturbador é co-localizado com o receptor perturbado; o valor é ligeiramente mais importante devido à maior proximidade das estações, mas excede raramente 80.

A **figura 1** ilustra a noção de estação, antenas, trajetos, bem como os diferentes tipos de restrições. Devido às especificidades dos materiais, o número máximo de conexões numa estação é 8. Tal estação, denominada **Cart8**, engloba 16 trajetos e várias restrições difíceis (duplex e co-estação). Existem apenas algumas poucas possibilidades de evitar interferências. A atribuição de frequências é assim, uma tarefa complicada, especialmente num contexto *on line*, quando não é conhecido com antecedência se uma estação será ou não um **Cart8**.

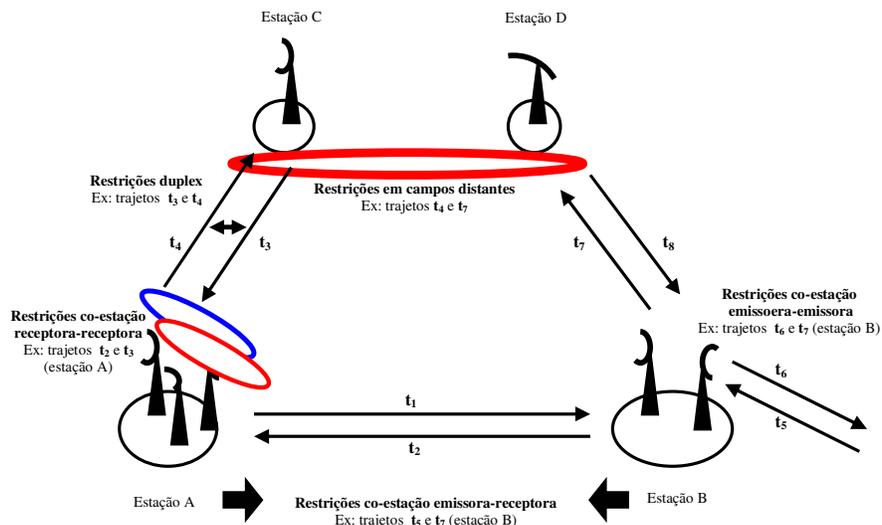


Figura 1: Exemplo de uma expansão de uma rede de comunicação

2.2 Objetivo

Na concepção estática do problema de atribuição de frequências, a única consideração a ser feita ao designar frequências aos trajetos é a satisfação integral do conjunto de restrições. Fundamentalmente, trata-se mais de um problema de satisfação de restrições (CSP – *Constraint Satisfaction Problem*) do que um problema de otimização clássico. Ao integrar-se o aspecto dinâmico, o objetivo do problema muda profundamente. De fato, mesmo que o problema a ser resolvido na chegada de uma nova conexão seja sempre um CSP (Kolen et. al., 1994), pois consiste em atribuir frequências a cada um dos trajetos, a escolha das frequências terá um impacto sobre as possibilidades de atribuições às conexões futuras. A alocação deve ser guiada pelo objetivo de maximizar a capacidade de resolução do problema completo, ou seja, atribuir frequências viáveis a toda nova conexão. No entanto, sendo o problema completo desconhecido durante a expansão da rede de comunicação, faz-se uso de medidas alternativas para quantificar esse objetivo. A medida proposta neste trabalho consiste em desconsiderar as conexões para as quais um fracasso se produz, onde entende-se que um fracasso (ou bloqueio) ocorre quando ao menos um dos trajetos da nova conexão não possui valor viável disponível no domínio de frequências da estação (receptora ou emissora).

3. Disponibilidade de uma estação

Diante do aspecto *on line* do problema em questão, a metodologia que servirá de base para a proposição de algoritmos será o conceito de "disponibilidade de estações" (Linhares, 2007), que utiliza métricas baseadas na quantidade de frequências disponíveis de uma dada estação. Assim, esta estratégia evidencia a combinação de frequências a nível das estações. Ela fundamenta-se na constatação de que, com exceção das restrições em campos distantes (pouco influentes globalmente visto que o intervalo imposto raramente ultrapassa o valor de 50), todas as demais se referem aos pares de trajetos incidentes numa mesma estação: restrições co-estação emissor-emissora, emissor-receptora, receptora-receptora. Desse modo, a possibilidade de atribuir uma frequência à uma conexão interligando duas estações s_1 e s_2 dependerá essencialmente das frequências atribuídas às outras conexões incidentes à s_1 ou s_2 .

A ideia de uma medida de disponibilidade é avaliar o potencial de "acolhida" de uma estação na sua configuração atual. O par de frequências permitindo conservar um máximo de

PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

disponibilidade nas duas estações implicadas na nova conexão será preferido aos demais. As definições a seguir fornecerão elementos fundamentais aos cálculos das disponibilidades.

Definição 1: A disponibilidade de emissão de uma estação $s \in S$ associada a uma frequência f , representada por $dispE(s, f) \in \{0,1\}$, indica a possibilidade de designar ou não a frequência f a um novo trajeto em emissão acolhido por s .

Definição 2: A disponibilidade de recepção de uma estação $s \in S$ à uma frequência f , representada por $dispR(s, f) \in \{0,1\}$, indica a possibilidade de atribuir ou não a frequência f a um novo trajeto em recepção acolhido s .

Uma particularidade do contexto deste trabalho é a chegada em pares dos trajetos, ou seja, os dois trajetos de uma mesma conexão chegam simultaneamente. Eles são denotados por t_{2i} e t_{2i+1} , e as frequências a serem determinadas são representadas por f_{2i} e f_{2i+1} .

A primeira etapa de um cálculo de disponibilidade será identificar as frequências disponíveis em recepção e emissão para as estações s_1 e s_2 . A avaliação do conjunto de frequências disponíveis em s_1 e s_2 no âmbito de uma conexão l_i irá configurar a medida de disponibilidade. Dentre as diversas maneiras de determiná-la, foram consideradas uma definição heurística e uma outra exata. Ambas consideram o conjunto de frequências alocadas às conexões $l_0 \dots l_{i-1}$, e f_{2i} e f_{2i+1} representando as frequências atribuídas, respectivamente, aos trajetos t_{2i} e t_{2i+1} .

3.1 Disponibilidade heurística

A disponibilidade heurística $disp(l_i, f_{2i}, f_{2i+1})$ é determinada por meio da adição do número de frequências disponíveis em emissão e em recepção para cada uma das estações s_1 e s_2 associadas à conexão l_i . A formalização desse cálculo requer definições suplementares.

Definição 3: A disponibilidade heurística de emissão de uma estação $s \in S$ é definida por $dispE(s) = \sum_{f \in D} dispE(s, f)$.

Definição 4: A disponibilidade heurística de recepção de uma estação $s \in S$ é definida por $dispR(s) = \sum_{f \in D} dispR(s, f)$.

Definição 5: A disponibilidade heurística de uma estação $s \in S$, $disp(s)$, é definida por $disp(s) = dispE(s) + dispR(s)$.

Finalmente, $disp(l_i, f_{2i}, f_{2i+1}) = disp(s_1) + disp(s_2)$.

3.2 Disponibilidade exata

A medida heurística descrita na seção 3.1 fornece uma primeira noção sobre a disponibilidade de uma estação. Contudo, essa estimativa não representa uma medida efetiva do número de conexões suplementares que uma estação é capaz de receber. Na verdade, à proporção em que alocamos frequências a uma nova conexão, novas restrições do tipo co-estação são impostas, reduzindo o número de frequências efetivamente disponíveis para conexões subsequentes na estação. Assim, a disponibilidade exata é determinada pelo número máximo efetivo de trajetos em emissão adicionado ao número máximo efetivo de trajetos em recepção que podem ser interligados a uma estação. Como as disponibilidades em emissão e recepção são analisadas de forma dissociada, ou seja, calculadas separadamente, chamamos essa medida de disponibilidade exata assíncrona.

PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

Definição 6: A disponibilidade exata assíncrona de emissão de uma estação $s \in S$, denotada por $dispE^*(s)$, consiste no número máximo efetivo de trajetos em emissão que é possível de interligar a s .

Definição 7: A disponibilidade exata assíncrona de recepção de uma estação $s \in S$, denotada por $dispR^*(s)$, consiste no número máximo efetivo de trajetos em recepção que é possível de interligar a s .

Definição 8: A disponibilidade exata assíncrona de uma estação $s \in S$, $disp^*(s)$, é definida por $disp^*(s) = dispE^*(s) + dispR^*(s)$.

Desse modo, a disponibilidade exata assíncrona para uma conexão l_i é dada por $disp^*(l_i, f_{2i}, f_{2i+1}) = disp^*(s_1) + disp^*(s_2)$.

Mas, o que fazer se quisermos determinar a disponibilidade exata de uma estação, considerando, ao mesmo tempo, os trajetos em emissão e em recepção que podem ser interligados a esta estação? Primeiramente, relembramos que todo trajeto em recepção numa estação está associado a um trajeto em emissão na mesma estação (e vice-versa), pela própria definição de uma conexão. Assim, incorporando essa consideração no cálculo, definimos a disponibilidade exata síncrona, denotada por $dispC^*$.

Determina-se a disponibilidade exata síncrona por meio da soma do número máximo efetivo de pares de trajetos (em emissão, em recepção) podendo ser interligados a uma estação s . Segue a definição suplementar:

Definição 9: A disponibilidade exata síncrona de uma estação $s \in S$, denotada por $dispC^*(s)$, consiste no número máximo efetivo de pares de trajetos (em emissão, em recepção) que é possível acoplar à s .

Assim, para uma conexão l_i , estabelecida entre as estações s_1 e s_2 , a disponibilidade exata síncrona é dada por $dispC^*(l_i, f_{2i}, f_{2i+1}) = dispC^*(s_1) + dispC^*(s_2)$.

3.3. Atribuição de frequências *on line*

Numa situação *on line*, a ordem em que as decisões são tratadas também é imposta. É necessário atribuir frequências aos dois trajetos constituintes da nova conexão. Então, a única estratégia é definir a heurística usada para a escolha destas frequências. O algoritmo guloso trata iterativamente as novas requisições de estabelecimento de conexões, atribuindo duas frequências a cada nova conexão ou configurando uma situação de fracasso (conexão não estabelecida), quando não é possível selecionar duas frequências sem violar alguma restrição. A atribuição de frequências aos dois trajetos oriundos de uma mesma conexão é feita simultaneamente, utilizando-se um algoritmo guloso (**algoritmo 1**).

O **algoritmo 1** testa a atribuição de todos os pares de frequências realizáveis aos dois trajetos e seleciona o melhor segundo um critério de disponibilidade, denotado *DISP*. Neste contexto, o melhor par de frequências será aquele que maximiza a disponibilidade do par de estações associadas à conexão l_i . Em caso de igualdade, os pares de frequências são desempatados utilizando-se o critério da menor frequência disponível. O objetivo deste critério é maximizar a disponibilidade de uma parte do intervalo (faixa de valores contínua) de frequências, o que contribuiria para a existência de frequências consistentes livres para uma conexão futura. Isto é implementado da seguinte maneira: no caso de empate no valor da disponibilidade, o algoritmo seleciona o par de frequências com o menor maior valor de frequência. No caso dos maiores valores serem iguais, o par com o menor valor é escolhido.

Algoritmo 1: Estratégia de atribuição de frequências a uma conexão

Início

```

 $(u^*, v^*) \leftarrow (+\infty, +\infty);$ 
Para cada  $(u, v) \in D \times D$  faça
    Se  $f_{2i} = u$  E  $f_{2i+1} = v$  satisfazem o conjunto de restrições então
        Se  $DISP(u, v) < DISP(u^*, v^*)$  então
             $(u^*, v^*) \leftarrow (u, v);$ 
        Se  $DISP(u, v) = DISP(u^*, v^*)$  então
             $MinFreq((u, v), (u^*, v^*));$ 
Se  $(u^*, v^*) \neq (+\infty, +\infty)$  então
     $(f_{2i}, f_{2i+1}) \leftarrow (u^*, v^*);$ 

```

Fim

O **algoritmo 2** ilustra a implementação desta heurística, onde as funções *Max* e *Min* retornam, respectivamente, o máximo e mínimo de dois valores de frequência passados como argumento.

Algoritmo 2: $MinFreq((u, v), (u^*, v^*))$

Início

```

Se  $Max(u, v) < Max(u^*, v^*)$  então
     $(u^*, v^*) \leftarrow (u, v)$ 
Se  $(Max(u, v) = Max(u^*, v^*)$  E  $Min(u, v) < Min(u^*, v^*)$  então
     $(u^*, v^*) \leftarrow (u, v)$ 

```

Fim

4. Extensão do conceito de disponibilidade: “disponibilidade ponderada”

As estratégias apresentadas na seção 3 buscam otimizar o número de frequências disponíveis passíveis de serem atribuídas a novos trajetos. Contudo, reservar uma frequência disponível numa estação s será mais ou menos interessante se esta frequência está igualmente disponível nas diferentes estações suscetíveis de estarem interligadas a s . Assim, surge a ideia de “ponderação da disponibilidade”.

Nesta seção, é apresentado um mecanismo para a ponderação das frequências do espectro associadas à uma estação s . Desta maneira são introduzidos os pesos $c_f^E(s)$ e $c_f^R(s)$, onde:

- $c_f^E(s)$: interesse de conservar uma frequência $f \in D$ para acolher um trajeto em emissão a partir da estação s ;
- $c_f^R(s)$: caracteriza o interesse de conservar uma frequência $f \in D$ para acolher um trajeto em recepção sobre a estação s .

Estes pesos dependem do conjunto de conexões já estabelecidas. Os métodos de cálculo da disponibilidade apresentados anteriormente se adaptam facilmente à integração de tais ponderações:

- Para a disponibilidade heurística, o objetivo torna-se maximizar a soma dos pesos das frequências disponíveis;
- Para a disponibilidade exata, a solução modelada como um problema de determinação de um estável máximo (Linhares, 2007) é transformada na determinação de um estável

PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

de peso máximo. O peso de um vértice é $c_f^E(s)$ ou $c_f^R(s)$ se ele pertence a V_E ou V_R , respectivamente.

É necessário definir, neste ponto, os parâmetros $\Gamma(s)$ e $N(s)$.

Definição 10: A vizinhança $\Gamma(s)$ de uma estação s é o conjunto de todas as estações religadas a s por uma conexão (incluindo a conexão atual).

Definição 11: A zona de vizinhança $N(s)$ de uma estação s consiste no conjunto de estações presentes no círculo centrado em s no raio de $R = 1,1 \times \max_{t \in \Gamma(s)} \text{distância}(s, t)$. Se $|N(s)| > 8$, então $N(s)$ e as estações mais distantes de s em $N(s)/\Gamma(s)$ são suprimidas, até que restem unicamente 8 estações.

As equações 1 e 2 expressam como calcular $c_f^E(s)$ e $c_f^R(s)$. O primeiro termo corresponde ao potencial de alocar uma frequência f às estações da zona de vizinhança. O segundo corresponde à possibilidade de interligar novas estações quando a zona de vizinhança não contém estações suficientes.

$$c_f^E(s) = \sum_{t \in N(s)/\Gamma(s)} \text{disp}R(t, f) + 8 - |N(s)| \quad (\text{Equação 1})$$

$$c_f^R(s) = \sum_{t \in N(s)/\Gamma(s)} \text{disp}E(t, f) + 8 - |N(s)| \quad (\text{Equação 2})$$

De fato, o cálculo pode ser visto como a soma dos 8 termos correspondentes às conexões que podem ser acolhidas na estação:

- Termos de valor zero associados às estações que já estão interligadas a s (estações de $\Gamma(s)$);
- Termos de valor 1 atribuídos às estações que podem aparecer na zona de vizinhança, se a mesma não possui 8 estações;
- Termos dependentes da disponibilidade da frequência associada às estações que já se encontram na zona de vizinhança, mas que ainda não estão interligadas a s .

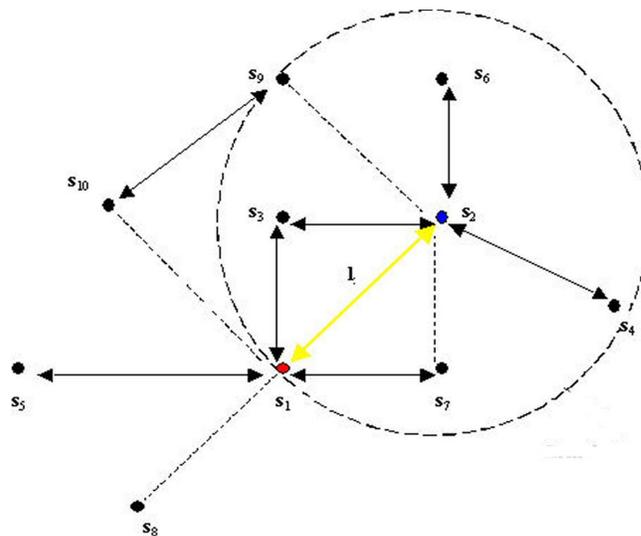


Figura 2: Vizinhança e zona de vizinhança de uma conexão

PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

A **figura 2** fornece um exemplo de expansão de uma rede de comunicação para determinação de $\Gamma(s)$ e $N(s)$. A estação considerada é s_2 , interligada à conexão em curso de tratamento na estação s_1 . Desse modo $\Gamma(s_2) = \{s_1, s_3, s_4, s_6\}$ e $N(s_2) = \{s_1, s_3, s_4, s_6, s_7, s_9\}$.

5. Resultados Experimentais

Os algoritmos propostos são comparados tendo por base 36 cenários realistas fornecidos pelo CELAR (CEntre d'ELectronique de l'ARmement), intitulados CLR_SCN_x, onde x indica o número do problema. Um exemplo de cenário é fornecido na **figura 3**, onde as retas constituem conexões e suas extremidades representam estações. As instâncias obtidas a partir destes cenários possuem entre 50 e 300 conexões, entre 28 e 168 estações e até 14755 restrições. Cada estação hospeda entre 1 e 8 conexões, variando conforme o cenário.

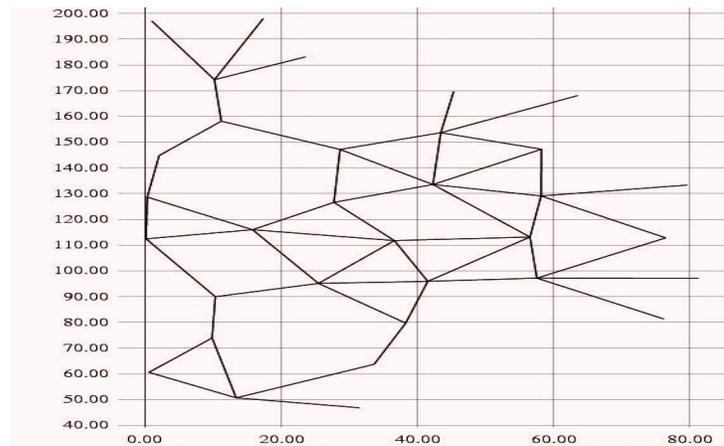


Figura 3: Exemplo de cenário com 50 conexões

A **tabela 1** mostra as principais características das instâncias. As colunas **N_Conexão**, **N_trajeto**, **N_estação**, **N_Cart8** e **N_restrições** indicam, respectivamente, o número de conexões, trajetos, estações, estações **Cart8** e restrições ao final da expansão dos cenários.

Devido ao grande número de dados, os resultados serão apresentados de maneira agregada segundo o número de conexões das instâncias. Os 36 cenários são decompostos em 4 grupos:

- Grupo 1: 6 cenários (01 à 06) contendo 150 conexões;
- Grupo 2: 10 cenários (10 à 19) contendo 50 conexões;
- Grupo 3: 10 cenários (20 à 29) contendo 100 conexões;
- Grupo 4: 10 cenários (30 à 39) contendo 300 conexões.

É importante destacar que o domínio considerado neste trabalho (conforme seção 2.1) utiliza a divisão de frequências específica ao sistema francês RITA, e também foi fornecido pelo CELAR.

Na sequência, as medidas de disponibilidade são denotadas por $DISP(Id)$, onde Id é um identificador associado a um tipo particular de estratégia de disponibilidade, com ou sem ponderação. A **tabela 2** indica a correspondência entre os valores de Id e o tipo de cálculo de disponibilidade.

Os programas foram escritos em C++, utilizando a tecnologia Concert 2.0 do ILOG. A ferramenta ILOG Cplex para resolução dos cálculos da disponibilidade exata síncrona. As simulações numéricas foram realizadas num Pentium III, 1200 MHz, duplo processador, 1Mb de RAM. Para cada instância, o algoritmo guloso trata iterativamente as novas conexões, atribuindo duas frequências ao par de trajetos que a constitui, ou configurando uma situação de fracasso (conexão não estabelecida). Neste último caso, o algoritmo não atribui frequências à conexão considerada e continua seu processo normalmente sobre o problema assim relaxado,

PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

com as próximas conexões. Logo que todas as conexões são tratadas, o escore do algoritmo é definido pelo número de fracassos.

Instâncias	N_Conexão	N_trajeto	N_estação	N_Cart8	N_restrições
01	150	300	83	2	2497
02	150	300	83	2	2493
03	150	300	90	1	3096
04	150	300	78	1	2633
05	150	300	87	0	2447
06	150	300	86	1	2717
10	50	100	28	0	2001
11	50	100	32	1	1793
12	50	100	33	0	1758
13	50	100	33	1	1775
14	50	100	33	1	1839
15	50	100	32	2	2103
16	50	100	34	1	1868
17	50	100	34	4	1866
18	50	100	33	1	1796
19	50	100	34	1	1899
20	100	200	61	2	3885
21	100	200	63	2	4003
22	100	200	61	2	4017
23	100	200	61	2	3880
24	100	200	59	2	3887
25	100	200	58	2	4021
26	100	200	62	2	3990
27	100	200	61	2	3894
28	100	200	65	2	3790
29	100	200	59	2	4169
30	300	600	158	1	12662
31	300	600	160	2	12361
32	300	600	155	2	12779
33	300	600	168	1	11552
34	300	600	168	3	11796
35	300	600	164	2	12318
36	300	600	163	3	13585
37	300	600	152	4	14480
38	300	600	160	4	13853
39	300	600	160	8	14755

Tabela 1: Principais características das instâncias

A fim de simular a utilização de ferramentas de Suporte a Decisão, tem-se a exigência por parte do CELAR de que o tempo de cálculo para a atribuição de frequências na chegada de uma nova conexão seja da ordem de alguns segundos, se nenhum bloqueio ocorre, onde então esse tempo seria flexibilizado para tentativa de reatribuição de frequências na rede (problemática não considerada neste trabalho). Desse modo, os testes apresentados nessa seção foram realizados com a imposição do tempo de 1 (um) segundo para atribuição de frequências a cada nova conexão. Na prática, esse tempo é geralmente da ordem de alguns millessegundos, e por isso, não foram considerados em nossa análise.

PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

Id	Tipo	Descrição
1	Padrão heurística	$disp(s) = \text{Max}(dispE(s_1), dispR(s_1)) + \text{Max}(dispE(s_2), dispR(s_2))$
2	Padrão exata assíncrona	$disp^*(s) = \text{Max}(dispE^*(s_1), dispR^*(s_1)) + \text{Max}(dispE^*(s_2), dispR^*(s_2))$
3	Padrão exata síncrona	$dispC^*(s) = dispC^*(s_1) + dispC^*(s_2)$
4	Ponderada heurística	$Pdisp(s) = disp(s)$ com ponderação
5	Ponderada exata assíncrona	$Pdisp^*(s) = disp^*(s)$ com ponderação
6	Ponderada exata síncrona	$PdispC^*(s) = dispC^*(s)$ ponderada

Tabela 2: Notação das estratégias baseadas na disponibilidade de uma estação

O objetivo dos testes é avaliar o impacto da ponderação das frequências no cerne dos métodos DISP(1..3). A tabela 3 apresenta o número médio de fracassos obtidos durante a expansão completa dos 36 cenários (grupos 1 a 4), produzidos pelas diferentes estratégias. O método GGenérico consiste na adaptação do algoritmo guloso genérico (**algoritmo 1**, conforme **seção 3.3**) usando apenas a estratégia MinMax (**algoritmo 2**, conforme **seção 3.3**). Os valores em negrito indicam os melhores resultados obtidos nas simulações.

Estratégia	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Média
GGenérico	5,83	3,06	6,58	20,52	9,00
DISP(1)	3,97	2,28	5,10	16,80	7,04
DISP(2)	2,91	1,86	4,26	14,90	5,98
DISP(3)	4,33	2,50	5,40	18,90	7,78
DISP(4)	3,30	2,04	4,98	14,94	6,32
DISP(5)	4,53	2,32	5,66	18,36	7,72
DISP(6)	2,00	1,70	4,20	11,53	4,86

Tabela 3: Síntese dos resultados - número médio de fracassos por estratégia

O método GGenérico serve como parâmetro de comparação pois representa um algoritmo guloso padrão. Observa-se que a disponibilidade exata com ponderação de frequências é o método mais eficaz em média, e com os melhores resultados sobre os quatro grupos de instâncias. Pode-se notar que a introdução da ponderação da vizinhança não é sempre eficaz com certas estratégias, como no caso de DISP(5). Ao se utilizar um peso associado às frequências da vizinhança da estação, o cálculo síncrono da disponibilidade exata é favorecido, visto que a consideração da interdependência das estações é intrínseca ao contexto. Por isso, a disponibilidade exata assíncrona com ponderação tem um desempenho 29% superior à versão padrão, enquanto que a versão síncrona ponderada tem uma melhoria de 37%. Esse tipo de comportamento fornece indícios de que a inserção de características associadas ao aspecto geográfico das estações no cálculo da disponibilidade pode conduzir a uma redução do número de fracassos na obtenção de frequências consistentes para as conexões entrantes durante a expansão da rede. Um outro aspecto evidenciado nos testes é o de que o número de fracassos é diretamente proporcional ao número de estações existentes ao final da expansão dos cenários.

6. Conclusão

Este trabalho abordou o Problema Dinâmico de Atribuição de Frequências (D-PAF) no âmbito de aplicações militares sob a ótica dos algoritmos *on line*, explorando, com bom desempenho, as características físicas das estações e das comunicações. Para a resolução deste

PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

problema foi utilizada uma extensão do conceito denominado “disponibilidade de uma estação” (estimativa da capacidade de uma estação receber novas conexões), integrada à uma ponderação sobre o conjunto de frequências disponíveis na vizinhança de uma estação. Os métodos foram avaliados e os resultados comparados a partir dos problemas teste fornecidos pelo CELAR.

A integração do conceito de “disponibilidade de uma estação” no contexto de métodos gulosos já havia mostrado uma melhoria significativa com relação aos critérios gulosos clássicos tais como re-utilização e minimização do intervalo entre as frequências (Linhares et al., 2004). Os melhores resultados foram obtidos pela estratégia de disponibilidade exata do tipo assíncrona, pois a versão síncrona mostrou algumas deficiências devido à sua incapacidade de julgar a qualidade de frequências preservando uma mesma disponibilidade.

A ponderação apresentada consiste na associação, durante o cálculo da disponibilidade, de um peso às frequências segundo o impacto de sua ocupação sobre a disponibilidade das estações vizinhas. Mais precisamente, uma frequência disponível em uma estação s será mais ou menos interessante se esta frequência encontra-se igualmente disponível nas diferentes estações suscetíveis de serem interligadas a s . Esta ponderação possibilitou uma redução bastante considerável do número médio de fracassos quando comparadas com outras estratégias baseadas na disponibilidade.

Até o momento, não existem experimentos numéricos similares aos realizados neste trabalho, sobre os mesmos 36 cenários. Os resultados apresentados em Dupont(2005) consideram a existência de um núcleo inicial de conexões e se apoiam sobre mecanismos de reparação para situações de insucesso (fracasso) na atribuição de frequências. Além disso, os cenários foram disponibilizados pelo CELAR unicamente no cerne de um projeto intitulado “*Étude de la Robustesse et d’affectation de fréquences*”, ou seja, não são instâncias públicas, e gentilmente cedidos para experimentações adicionais nas teses de doutorado oriundas desse projeto. Uma das perspectivas de continuidade deste trabalho é aplicar as noções desenvolvidas acerca da disponibilidade no contexto de outras aplicações, como por exemplo, na geração de resumos automáticos de texto.

Outra perspectiva interessante a este trabalho seria explorar características geográficas diferentes das que exploramos com relação à configuração das estações, visando definir uma nova estratégia para o cálculo da disponibilidade. Na problemática aqui evidenciada, não existe possibilidade de suprimir uma estação, contrariamente ao que ocorre na realidade. Se esta hipótese é considerada, poderia-se adicionar a probabilidade da aparição de uma estação numa certa região geográfica, baseada num histórico da evolução da rede, para a ponderação das frequências.

Agradecimentos: À CAPES e FUNCAP, pelo apoio financeiro.

Referências Bibliográficas

Artigues, C., Feillet, D., Linhares, A. C., Michelon, P., Dupont, A., Vasquez, M. & Defaix T. (2004). Résolution du Problème d’Affectation de Fréquences Dynamique, 10ièmes Journées Nationales Résolution Pratiques de Problèmes NP-complets, 27-42.

Aardal, K. I., Van Hoesel, S. P. M., Koster, A. M. C. A., Mannino, C. & Sassano, A. (2003). Models and Solution Techniques for Frequency Assignment Problems. 4OR, 4 (1), 261-317.

Allen, S. M., Smith, D. H. & Hurley, S. (2001). Characteristics of Good Metaheuristic Algorithms for the Frequency Assignment Problem. Annals of Oper. Research, 107, 285-301.

Brunato, M. (1999). Channel Assignment Algorithms in Cellular Networks. PhD thesis, Università Degli Studi Di Trento, Italy.

PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

Dupont, A. (2005). Etude d'une Métaheuristique Hybride pour l'Affectation de Fréquences dans les Réseaux Tactiques Évolutifs. PhD thesis, Université Montpellier II, France.

Dupont, A., Linhares, A. C., Artigues, C, Feillet, D, Michelon, P. & Vasquez, M. (2009). The dynamic frequency assignment problem. *European Journal of Oper. Research*, 195, 75-88.

Eisenblatter, A., Grottschel, M., & Koster, A. M. C. A (2000). Frequency Planning and Ramifications of Coloring. Technical report N.00-47, Zuse Institute, Berlin, Germany.

Fotakis, D., Pantziou, G., Pentaris, G. & Spirakis, P. (1999). Frequency Assignment in Mobile and Radio Networks. DIMACS Series on Discrete Math and Theoretical Computer Science, Networks in Distributed Computing, 45, 73-90.

Hao, J. K., Galinier, P. & Habib, M. (1999). Méta-heuristiques pour l'Optimisation Combinatoire et l'Affectation sous Contraintes. *Revue d'Intelligence Artificielle*, 1-39.

Kolen, A. W. J., Van Hoesel, C. P. M. & Van der Wal, R (1994). A Constraint Satisfaction Approach to the Radio Link Frequency Assignment Problem. Technical report, University of Limbourg, Maastricht, Netherlands.

Linhaires, A. C., Vasquez, M., Feillet, D. & Michelon, P. (2004). Resolução de Problemas de Alocação Dinâmica De Frequências. XII Congresso Latino-Ibero Americano de Optimização - Memórias del XII CLAIO, 46-52.

Linhaires, A. C. (2007). Problèmes d'Affectation de Fréquences Dynamique. PhD thesis, Université d'Avignon, Avignon, France.

Murphey, R. A., Pardalos, P. M. & Resende, M. G. C. (1993). Frequency Assignment Problems. In: *Handbook of Combinatorial Optimization, Supplement vol. A of International Series in Operations Research and Management Science* [edited by D.-Z. Du and P. M. Pardalos], Kluwer Academic Publishers, 295-377.

Rajasekaran, S., Naik, K. e Wei, D. (2000). On Frequency Assignment in Cellular Networks. DIMACS Series in Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science, 52, 293-302.

Smith, D. H., Hurley, S. & Thiel, S. U. (1997). Frequency Assignment Algorithms. Technical report RCCM 070, Radiocommunications Agency Agreement.