

Abordagens Genéticas para a Realocação Hierárquica e de Múltiplas Capacidades dos Laboratórios de Metrologia do Comando da Aeronáutica - COMAER

Silvio Luiz Castro Silva e ¹Luiz Antônio Nogueira Lorena

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE - Laboratório Associado de Computação e Matemática Aplicada - LAC
 Av dos Astronautas, 1.758 - Jd. Granja, CEP: 12227-010 São José dos Campos - SP, Brasil

Resumo - Esse trabalho apresenta um modelo para o Problema de Localização de Concentradores (PLC) aplicado ao problema logístico enfrentado pelo Sistema de Metrologia da Aeroespacial (SISMETRA). A estrutura primordial implementada para atender as demandas metrológicas que dão suporte aos serviços de manutenção aeronáutica, possui limitações logísticas, sendo dessa forma necessária, a busca por uma solução otimizada que melhore o transporte de materiais e pessoas durante as Diagonais de Calibração (DC), possibilitando economia de recursos públicos e eficiência operacional para a garantia da confiabilidade metrológica do SISMETRA. Toda essa estrutura laboratorial possui três níveis hierárquicos de metrologia: Laboratório Central de Calibração (LCC), Laboratórios Regionais de Calibração (LRC) e Laboratórios Setoriais de Calibração (LSC), onde cada laboratório possui demandas de calibração em 3 (três) áreas de grandeza (Dimensional, Elétrica e Física).

Palavras-Chave — Otimização, Localização de Concentradores.

I. INTRODUÇÃO

Com a idealização do Sistema de Metrologia Aeroespacial em 07 de dezembro 1988 [1], pertencente ao Comando da Aeronáutica (COMAER), órgão subordinado ao Ministério da Defesa (MD), foi criada uma estrutura de laboratórios de metrologia localizados e alocados, inicialmente, em algumas organizações militares do COMAER, visando o amplo atendimento dos projetos aeronáuticos de manutenção espalhados no território nacional. Esses laboratórios estão organizados em uma estrutura composta por 3 (três) níveis hierárquicos de metrologia [2].

Na Fig. 1. Cadeia de rastreabilidade do SISMETRA é apresentada a estrutura hierárquica dos laboratórios do SISMETRA, onde o Laboratório Central de Calibração (LCC) contém os laboratórios de maior nível metrológico do SISMETRA. Esses laboratórios do LCC são diretamente ligados ao Laboratório Nacional de Metrologia (LNM), que é representado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO).

silvioslcs@ifi.cta.br, lorena@lac.inpe.br, Tel.: +55-12-3947-5274.
¹Agradecimentos ao CNPq pelo auxílio nos projetos: 300692/2009_9 e 470813/2010_5.

Os laboratórios pertencentes ao LCC têm seus padrões metrológicos calibrados pelo LNM ou por laboratórios pertencentes à Rede Brasileira de Calibração (RBC), quando a calibração não for possível dentro do país à mesma pode ser realizada por laboratórios internacionais de mesmo nível metrológico do LNM. Essa estrutura superior de laboratórios permite a disseminação da rastreabilidade dos padrões internacionais de metrologia aos padrões do SISMETRA garantindo subsídio para o cumprimento da missão de manutenção aeronáutica do COMAER [1].

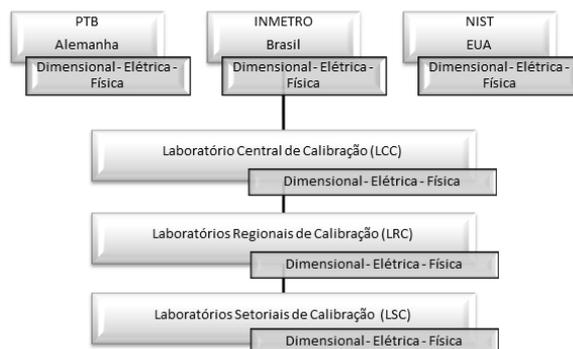


Fig. 1. Cadeia de rastreabilidade do SISMETRA

Esses laboratórios atendem paralelamente as múltiplas demandas de calibração originárias de cada uma das 3 (três) áreas de grandezas de cada laboratório: Dimensional, Elétrica e Física. Com isso durante as Diagonais de Calibração (programação anual para a calibração dos padrões do SISMETRA) cada laboratório envia, na data agendada, seus instrumentos para cada uma das áreas equivalentes do seu laboratório de referência dentro do sistema.

Os laboratórios que são referências também executam atividades de auditoria e visitas técnicas. Essas atividades têm como objetivo realizar verificações periódicas no sistema da qualidade dos laboratórios subordinados, proporcionando mecanismos de treinamento para a homogeneização dos procedimentos técnicos de calibração e medição.

Como essas múltiplas demandas de transporte de instrumentos e técnicos vêm crescendo ao longo da maturidade do sistema, a necessidade de otimizar a localização e alocação dos laboratórios pertencentes ao

SISMETRA se torna inquestionável, pois proporcionaria redução nos custos operacionais, melhorando o fluxo logístico de materiais e técnicos.

A utilização de abordagens genéticas tem como justificativa a complexidade do problema, sendo o problema de localização de concentradores pertencente à classe dos problemas NP-hard [2] e [3], onde essa classe de problemas depende de grande custo computacional para obtenção de soluções ótimas, entretanto, metaheurísticas comumente apresentam soluções de boa qualidade para o problema, como por exemplo: os AG para a configuração de uma *rede hub-and-spoke* para uma empresa de caminhões no Brasil [4] e abordagens neurais versus tradicional para a localização das instalações concentradoras [5].

II. METROLOGIA

Metrologia é a ciência da medição e suas aplicações e tem como objetivo primordial fornecer confiabilidade às medições. Essa confiabilidade é conseguida através de uma cadeia ininterrupta de medições, sendo assim, rastreadas a padrões internacionais de medição. A metrologia é dividida em Metrologia Científica responsável pelo desenvolvimento e manutenção dos padrões de referência utilizados no território nacional, Metrologia Industrial que é responsável pela adequação dos instrumentos e ensaios utilizados na indústria e Metrologia Legal que é responsável pelo controle metrológico das áreas da metrologia que possuem exigências legais compulsórias para as unidades de medição, para os métodos de medição e para os instrumentos de medição.

Para conseguir padrões confiáveis os laboratórios realizam a calibração de seus padrões, essa calibração é uma operação que estabelece uma relação entre os valores e as incertezas dos Padrões de Referência com as indicações correspondentes do Mensurando (Equipamento/Instrumento de medição a ser calibrado) [6].

Essas calibrações são realizadas ininterruptamente entre os níveis metrológicos, definindo assim, a *Rastreabilidade Metrológica*, que é a propriedade de um resultado de medição pela qual tal resultado pode ser relacionado a uma referência através de uma cadeia ininterrupta e documentada de calibrações, cada uma contribuindo para a incerteza de medição [6].

Incerteza de Medição: Calculo estatístico que radiografa a qualidade e a exatidão de um processo de medição, representado por um parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando. A incerteza de medição é avaliada através de duas abordagens: Incerteza do TIPO A, essa incerteza é estimada a partir dos desvios padrão das medições realizadas no mensurando. A segunda abordagem de avaliação é denominada avaliação do TIPO B da incerteza de medição que é estimada a partir de funções densidade de probabilidade baseadas na experiência ou em outras informações [6]

III. SISMETRA

O SISMETRA é constituído de organizações militares dispostas em uma estrutura matricial, Fig. 2, atuando, tanto

verticalmente quanto horizontalmente nas atividades metrológicas de interesse do COMAER, sendo composto no seu Nível Estratégico pela Coordenadoria Geral de Metrologia, no Nível Tático pelo Órgão Central do SISMETRA e, no Nível Operacional pelos Elos do SISMETRA [1]. O Nível Estratégico é representado pela Coordenadoria de Metrologia do SISMETRA a qual é um conselho que tem a responsabilidade de assessorar o Comandante do Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA) na elaboração de diretrizes metrológicas, visando operacionalidade para o sistema. Essa coordenadoria é assessorada por especialistas nacionais e/ou internacionais, podendo essa assessoria participar de atividades específicas, relacionadas à Coordenadoria de Metrologia do SISMETRA.

O Nível Tático é representado pela Divisão de Confiabilidade Metrológica Aeroespacial (CMA) pertencente ao Instituto de Fomento e Coordenação Industrial (IFI), localizado em São José dos Campos dentro do DCTA, a qual tem a responsabilidade de planejar, controlar, normalizar e aprimorar o SISMETRA, garantindo recursos humanos e o gerenciamento das informações metrológicas.

O Nível Operacional é formado pelo LCC que é composto por um conjunto de laboratórios pertencentes ao DCTA, que é o laboratório de mais alto nível metrológico dentro da estrutura do SISMETRA, estando no topo da cadeia de rastreabilidade metrológica do COMAER, garantindo que os padrões metrológicos do sistema sejam rastreáveis a padrões nacionais e internacionais de medição. No nível nacional a rastreabilidade é garantida diretamente pelo LNM do INMETRO ou por laboratórios da Rede Brasileira de Calibração. Quando os padrões do SISMETRA não puderem ser calibrados nacionalmente, os mesmos poderão ser enviados para calibração em laboratórios internacionais de metrologia.

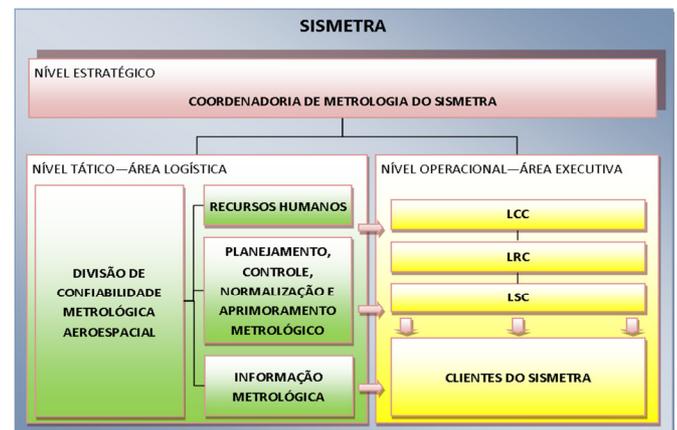


Fig. 2. Concepção Matricial do SISMETRA

Ainda no Nível Operacional temos os Laboratórios LRC, laboratórios subordinados ao LCC, tendo seus padrões calibrados pelo LCC. Os LRC são laboratórios alocados em Organizações Militares (OM) no território nacional, sendo esses laboratórios autorizados pelo Órgão Central para fornecer rastreabilidade aos padrões dos LSC. Os LSC são

laboratórios dispostos no território nacional e que tem a responsabilidade de calibrar instrumentos de medição, equipamento, sistemas de medição para fins de medição e controle dos processos tecnológicos de interesse do COMAER.

A Fig. 1 ilustra os níveis hierárquicos que proporcionam rastreabilidades dos padrões metroológicos do SISMETRA a padrões nacionais e internacionais. Nessa estrutura o INMETRO, através de seu LNM, envia seus padrões ao *Bureau International Des Poids Et Measures* (BIPM), na França, ou realiza a comparação de seus padrão com padrões de outros países mediante as comparações chave coordenados pelo próprio BIPM, ou por outros Institutos Nacionais de Metrologia (INM) de reconhecimento internacional que dão suporte ao Sistema Internacional de Unidades (SI).

Essa estrutura em árvore com níveis metroológicos hierárquicos possibilita um fluxo de demanda em que os laboratórios de nível inferior (demanda) são atendidos pelo seu laboratório (facilidade concentradora) do nível superior, concentrando assim, as demandas de rastreabilidade e fornecendo estrutura para o entendimento de todo o sistema.

Os laboratórios do SISMETRA estão estruturados de acordo com o seguinte organograma, apresentado na Fig. 3. Organograma do SISMETRA

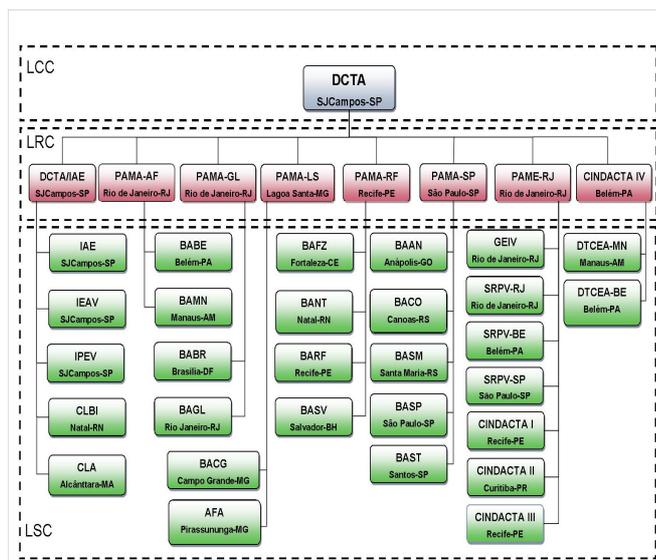


Fig. 3. Organograma do SISMETRA

Nesse organograma pode-se visualizar a hierarquia dos níveis metroológicos onde o DCTA representa o LCC (raiz da árvore), sendo o laboratório ligado diretamente ao LNM e que dissemina a rastreabilidade nacional ao SISMETRA. Temos também os laboratórios concentradores de demanda, os LRC (nós intermediários), que são os laboratórios que ampliam a abrangência da rastreabilidade atendendo as demandas dos LSC (nós folhas) que são os laboratórios responsáveis pelo controle da instrumentação diretamente ligada a manutenção aeronáutica.

IV. PROBLEMA DE LOCALIZAÇÃO DE CONCENTRADORES

Existem problemas conhecidos como problemas de localização-alocação e tem por objetivo de localizar facilidades que serão alocadas as demandas, maximizando o atendimento ou minimizando os custos operacionais. Segundo Yaman [7] e Arakaki [8], muitos desses problemas de localização-alocação pertencem à classe dos problemas NP-Difícil.

O modelo para o PLC idealiza uma estrutura de rede tipo eixo-raio (*hub-and-spoke network*), Fig. 4, onde são localizados concentradores para aglomerar o fluxo de demanda existente, sendo criadas conexões de maior fluxo entre todos os concentradores, para que dessa forma, o deslocamento da demanda seja realizado através do concentrador em que o nó de demanda está alocado, até o concentrador em que o nó de destino está alocado, que por sua vez, distribuirá a demanda para o destino pertinente. Esse tipo de rede pode ser encontrado nos trabalhos de [9], [10], [11] e [12].

Esse modelo segundo Sá [12] e O' Kelly & Miller [10] é utilizado com muita propriedade como suporte estratégico para implementações de atendimento de demandas de transporte público, pois como as conexões de origem/destino são inúmeras, acaba sendo inviável financeiramente a criação de todas essas vias de conexão, sendo dessa forma, uma solução promissora a concentração do fluxo em pontos estratégicos (concentradores), criando mecanismos para o transporte em massa entre os concentradores até os pontos de destino.

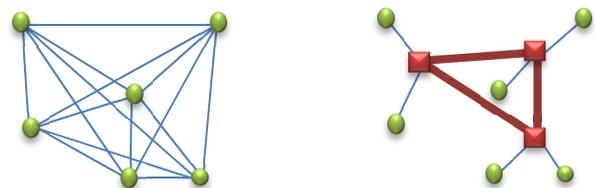


Fig. 4. (a) Conexão entre origem/destino. (b) Rede eixo-raio.

A primeira publicação realizada para apresentar o problema de localização de concentradores foi realizada por Goldman [13], mas O'Kelly [14] publica a primeira formulação quadrática para o problema de localização não capacitada de p -concentradores, (USApHMP - *Uncapacitated Single Allocation p-Hub Median Problem*)

Existe outro tipo de rede conhecido com *star-star network*, Fig. 5, nessa estrutura em estrela os nós Concentradores localizados estão diretamente ligados a Unidade Central e cada nó restante é alocado a um concentrador. Nesse tipo de rede o processo de otimização consiste em localizar as facilidades concentradoras minimizando os custos de localizar os concentradores e alocar os terminais a esses concentradores [15] e [7].

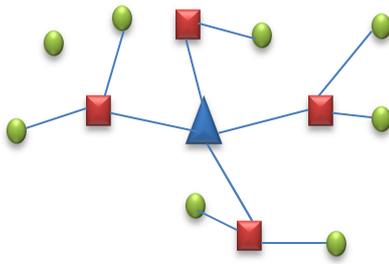


Fig. 5. Modelo de rede star-star com três níveis hierárquicos

Nesse tipo de rede *star-star* os nós de demanda direcionam o fluxo através de um nó concentrador para a Unidade Central. Esse tipo de rede é um caso especial do problema de p -medianas onde é acrescentado um custo de ligar os concentradores, localizados, a Unidade Central. Esse tipo de problema é chamado na literatura de Problema de Localização de Concentradores Não Capacitado em uma Rede Estrela-Estrela (UHLP-S - *Uncapacitated Hub Location Problem in a Star-Star Network*). O UHLP-S também é modelado como um Problema de Localização de Facilidades Não Capacitado (UFLP - *Uncapacitated Facility Location Problem*). Segundo [16] a modelagem UFLP aplicada a uma rede *star-star* é introduzida por Hakimi [17] quando ele aplica os modelos 1-mediana e o p -mediana para a localização de centros de troca em redes de comunicação.

Para problemas capacitados existe a modelagem para o Problema de Localização de Concentradores Capacitados em uma Rede *Star-Star*. Esse modelo é composto por um conjunto de *Terminais*, $T_i, i \in N, N = \{1, \dots, n\}$, normalmente idênticos, dispersos geograficamente e de localização conhecida; um conjunto de *Concentradores*, $C_j, j \in M, M = \{1, \dots, m\}$, unidades de porte e capacidade superior aos terminais, podendo ou não estarem localizadas juntos aos terminais, e cujo número e instalação, normalmente, é desconhecido; e uma *Unidade Central*, C_0 , equipamento de grande porte quando comparado com os demais elementos e de localização normalmente conhecida. A formulação para o Problema de Localização de Concentradores Capacitados em uma Rede *Star-Star* (CHLP-S - *Capacitated Hub Location Problem in a Star-Star Network*) e é apresentada na Equação (1) [18]:

$$\text{Minimizar } z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij}x_{ij} + \sum_{j=1}^m d_j y_j \quad (1)$$

$$\text{Sujeito a: } \sum_{j=0}^m x_{ij} = 1, \quad i = \{1, \dots, n\} \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} \leq k_j y_j, \quad j = \{1, \dots, m\} \quad (3)$$

$$x_{ij}, y_j \in \{0,1\}, \quad \forall i, j \quad (4)$$

onde:

y_j é uma variável binária que assume o valor 1 se o nó i é escolhido para concentrador e 0, caso contrário.

x_{ij} é uma variável binária que assume o valor 1 se o terminal T_i está ligado ao concentrado C_j e 0, caso contrário.

d_j representa o custo de implementação de uma unidade concentradora no ponto j .

c_{ij} representa o custo de ligar um terminal T_i ao concentrador C_j .

k_j representa a capacidade máxima, aconselhável, de terminais que cada concentrador C_j pode gerenciar.

Nesse modelo os terminais i são ligados diretamente aos concentradores j e os concentradores j ligados diretamente à unidade central C_0 . A restrição (2) garante que cada terminal i será ligado somente a um concentrador j . A restrição (3) restringe o número máximo, aconselhável, de terminais que cada concentrador C_j pode gerenciar. A restrição (4) garante a integralidade das variáveis de decisão.

A formulação procura otimizar uma solução que minimize os custos de implantação dos concentradores e da alocação dos terminais, permitindo responder as seguintes perguntas [19]:

- Quantos concentradores são necessários?
- Onde eles deverão estar localizados?
- De que forma os concentradores estarão ligados à central?
- Quais terminais serão designados a quais concentradores?
- De que maneira os terminais estarão conectados aos concentradores a eles designados?

Para que seja possível representar efetivamente a estrutura e funcionalidade do SISMETRA foram realizadas algumas mudanças na formulação apresentada em (1), transformando o modelo CHLP-S em um modelo para o Problema de Localização de Concentradores com Múltiplas Capacidades em uma Rede Estrela-Estrela (MCHLP-S - *Multi-Capacitated Concentrator Location Problem in a Star-Star Network*):

$$\text{Minimizar: } z = \sum_{s \in S} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m Q_{is} c_{ij} x_{ij} + \sum_{j=1}^m d_j y_j \quad (5)$$

$$\text{Sujeito a: } \sum_{j=1}^m x_{ij} = 1, \quad i = \{1, \dots, n\} \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n Q_{is} x_{ij} \leq k_{js} y_j, \quad j = \{1, \dots, m\} \text{ e } s = \{1, 2, 3\} \quad (7)$$

$$x_{ij}, y_j \in \{0,1\}, \quad \forall i, j \quad (8)$$

onde:

Terminais, $T_i, i \in N, N = \{1, \dots, n\}$, LSC com estrutura metroológica normalmente idênticas, dispersos geograficamente e de localização conhecida.

Concentradores, $C_j, j \in M, M = \{1, \dots, m\}$, LRC com capacidade metroológica superior aos LSC, podendo ou não estarem localizadas juntos aos terminais, e cujo número é conhecido e a instalação é desconhecida.

Unidade Central, C_0 , LCC, laboratório de grande porte quando comparado com os demais laboratórios e de localização conhecida.

Áreas de Grandeza, $s \in S, S = \{1 = \text{Dimensional}, 2 = \text{Elétrica}, 3 = \text{Física}\}$, representa as três áreas de atendimento de calibração.

y_j é uma variável binária que assume o valor 1 se o nó i é escolhido para LRC e 0, caso contrário.

x_{ij} é uma variável binária que assume o valor 1 se o LSC T_i está ligado ao LRC C_j e 0, caso contrário.

d_j representa a distância do LRC na localidade j ao LCC.

c_{ij} representa a distância do LSC T_i ao LRC C_j .

Q_{is} representa a demanda de calibração do laboratório i da área de grandeza s .

k_{js} representa as múltiplas capacidades máximas de serviços que cada setor do LRC C_j pode atender, com $s \in \{1,2,3\}$ representando as subárea de cada laboratório: Dimensional, Elétrica e Física.

No modelo modificado $n = m$, pois todas as localidades podem ser escolhidas tanto para LRC como para LSC, onde cada LSC i é alocado a um dos p LRC j localizados, e os LRC j são ligados diretamente ao LCC C_0 . A restrição (6) garante que cada LSC i será ligado a um LRC j . Já a restrição (7) foi alterada e agora gerencia a capacidade de atendimento de cada setor $s \in \{1,2,3\}$ do LRC j da demanda Q_{is} de cada setor do LSC i , para que a mesma não seja excedida. A restrição (8) ainda garante a integralidade das variáveis de decisão do modelo.

Pode-se transformar o modelo para o MCHLP-S em um modelo para o Problema de Localização de p -Concentradores com Múltiplas Capacidades em uma Rede Estrela-Estrela (MCpHLP-S *Multi-Capacitated p-Concentrator Location Problem in a Star-Star Network*), acrescentando a restrição abaixo:

$$\sum_{i=1}^m y_j = p \quad (9)$$

V. ALGORITMOS GENÉTICOS

Algoritmos Genéticos (AG) fazem parte do conjunto de algoritmos computacionais pertencentes à Computação Evolucionária (CE) na área de Inteligência Artificial (IA). Inicialmente são baseados nos mecanismos de seleção natural e da genética introduzidos por John Holland [20] e popularizados por David Goldberg [21]. Normalmente são usados para resolver problemas complexos que possuem espaço de soluções robusto e que não possuam um algoritmo de solução em tempo polinomial. Essa metaheurística utiliza mecanismos para encontrar regiões de soluções viáveis, procurando o ponto com “alta aptidão” que melhor representa uma solução para o problema.

Essa classe de algoritmos estocásticos Darwinista possuem algoritmos que são normalmente aplicados a problemas que não possuem métodos exatos de solução com complexidade polinomial. Esses problemas são conhecidos como problemas *NP-Hard* e os AGs frequentemente encontram soluções, aproximadamente, ótimas para esses tipos de problemas. [22, p. 13].

Os AG possuem reconhecimento científico por servirem de ferramenta robusta para a eficiente otimização de problemas acadêmicos e problemas reais. Algumas das implementações de sucesso dos AG são: otimização do plano

de tratamento em radioterapia conformal 3D [23], configuração de redes de distribuição [24], sequenciamento de projetos com recursos limitados [25], na clusterização de aprendizes de acordo com seus estilos de aprendizagem [26], problemas de *clustering* de grafos orientados [27]; problemas de localização de p -medianas [28]; problemas de programação de operações em um ambiente de produção *Flow Shop*, tendo como objetivo minimizar o estoque em processamento [29]; problemas de expansão de sistemas de transmissão [30]; problemas químicos [31], etc.

VI. ABORDAGENS GENÉTICAS UTILIZADAS

Buscando a simplicidade e eficiência para representação dos indivíduos esse trabalho utiliza a representação proposta por [32] e utilizada por [3, p. 44]. Essa representação é formada por dois vetores que, respectivamente, representam os concentradores localizados e as alocações selecionadas. Nessa representação binária cada j -ésima posição do *hubArray* quando igual a 1 (um) representa que foi localizado um concentrador na j -ésima localidade e 0 (zero) caso contrário. Na representação das alocações tem-se o *AssignArray* onde a i -ésima posição armazena a j -ésima posição do concentrador, ao qual a i -ésima localidade está alocada.

HubArray	0	1	0	0	1	0	0	1
AssignArray	2	2	2	8	5	8	5	8

Fig. 6. Representação do Indivíduo

A representação Fig. 6. Representação do Indivíduo demonstra uma alocação dos nós 1, 2 e 3 ao concentrador 2; dos nós 5 e 7 ao concentrador 5 e dos nós 4, 6 e 8 ao concentrador 8, sendo os nós concentradores alocados a eles mesmos. Essa representação proporciona eficiente movimentação sobre o espaço de busca tornando fácil o cálculo da função objetivo.

A População Inicial de tamanho N_p é composta por um conjunto de cromossomos, onde inicialmente é preenchido, de forma aleatória, o vetor *hubArray* com um conjunto de concentradores $\leq p$ e depois cada nó Terminal i é alocado, aleatoriamente, a um dos concentradores j localizados anteriormente.

O operador de cruzamento utilizado, na abordagem proposta, é o operador de dois pontos, onde os vetores *hubArray* e *AssignArray* são empilhados e dois pontos, aleatórios, de cruzamento cortam os dois vetores simultaneamente e os genes entre esses dois pontos são trocados entre os pais selecionados, proporcionando dois novos filhos. Esse operador é aplicado com probabilidade T_c . Com essa operação alguns filhos podem não representar uma solução válida para o problema, sendo necessário realizar um ajuste. Esse ajuste é realizado em duas situações:

1. Quando o cruzamento gerar uma solução em que uma alocação não tenha o seu respectivo concentrador localizado.

Ajuste: Verificar, no sentido crescente, qual j -ésimo concentrador não foi localizado no vetor *hubArray* e realizar e alteração para 1 (um) da j -ésima posição.

- Quando uma solução tiver um concentrador localizado sem nenhuma alocação referenciada no vetor *AssignArray*. Esses erros de representação são corrigidos através dos seguintes procedimentos:

Ajuste: Verificar, no sentido crescente, qual j -ésimo concentrador não possui alocações referenciadas e atribuir ao j -ésimo gene do vetor *hubArray* o valor 0 (zero).

Abordagens de ajustes semelhantes são apresentadas em [32].

Pelo tipo de problema e pela forma de representação utilizada alguns movimentos com os concentradores e com os terminais, podem ser implementados aplicando diversidade à população, permitindo que ela tenha recursos para fugir dos ótimos locais. Nesse trabalho foram aplicados 4 (quatro) tipos de movimentos permitidos pela representação, onde os operadores de mutação M1 e M2 se baseiam nos procedimentos de mutação em [32].

M1: Nesse procedimento é selecionado, aleatoriamente, um concentrador, e o movimento de mutação consistem em localizá-lo em outra localidade aleatória, mantendo os nós alocados a nova localidade do concentrador [32]. Mesmo que essa nova localidade já seja um concentrador.

M2: Nessa operação realizamos a permutação entre dois concentradores selecionados aleatoriamente, atribuindo às localidades alocadas de um para o outro e vice e versa [32].

M3: Nesse procedimento é selecionado um nó Terminal e o movimento de mutação consiste em realocar, aleatoriamente, esse nó para outro concentrador, caso esse nó seja o único alocado ao concentrador a operação de mutação não é realizada.

M4: Nessa operação realizamos a permutação entre dois nós alocados, atribuindo o concentrador de um para o outro e vice e versa.

O intervalo de geração utilizado é o Intervalo Geracional $\lambda(=\mu)$ ($\mu=n^\circ$ de pais, $\lambda=n^\circ$ de filhos) acrescido de Elitismo, onde o melhor indivíduo da população corrente é mantido na próxima geração, substituindo o pior indivíduo dessa nova população.

Também é aplicada uma penalidade aos cromossomos que apresentam o número de concentradores localizados $> p$. Essa penalidade é aplicada multiplicando o valor da aptidão, do cromossomo a ser penalizado, por *Tpenal*, que é a taxa de penalidade. Essa taxa de penalidade também é aplicada caso a solução fira as capacidades de atendimento dos concentradores.

VII. RESULTADOS

Para esse artigo são utilizados valores aleatórios para os parâmetros de demanda e capacidade das localidades. A determinação das matrizes de distâncias foi determinada através de (10), onde é determinada a distância geodésica (radianos) entre duas localidades selecionadas sobre o globo terrestre [33, p. 38].

As coordenadas das OM utilizadas foram coletadas através do site: <https://maps.google.com.br/>.

$$d(l_i, l_j) = \cos^{-1}[\cos l_{i1} \cos l_{j1} \cos (l_{i2} - l_{j2}) + \sin l_{i1} \sin l_{j1}] \quad (10)$$

onde:

l_i representa, respectivamente, as coordenadas de latitude e longitude do laboratório i .

l_j representa, respectivamente, as coordenadas de latitude e longitude do laboratório j .

As execuções do CPLEX 10.1 e do AG foram realizada em um computador *Atom* 1,66 GHz, 2GB com *Windows 7 Starter 32 bits* e o AG foi implementado na linguagem de programação JAVA. O resultado é comparado na Tabela 1.

Nessa execução do AG implementado foram utilizados: o operador de cruzamento de dois pontos, as abordagens de mutação M1, M2, M3 e M4 com suas respectivas taxas de mutação Tm_1 , Tm_2 , Tm_3 e Tm_4 , também se utilizou um intervalo de geração geracional com elitismo. A verificação da eficiência da otimização foi medida através de um erro proporcional comparando os resultados encontrados com o AG com os da execução com o CPLEX 10.1 na configuração *default*.

Essa comparação foi realizada utilizando (11) onde os dois métodos conseguiram encontrar a solução ótima.

$$\text{Erro} = \frac{(\text{Resultado SGA} - \text{Resultado CPLEX})}{\text{Resultado CPLEX}} \times 100 \quad (11)$$

TABELA 1 – ANÁLISE DOS RESULTADOS DA ABORDAGEM GENÉTICA PARA O MODELO MCpHLP-S.

N	p	CPLEX	Tempo (seg)	SGA	Tempo Médio (seg)	Erro (%)
37	8	130722,00	0,59	132453,75	61,22	0,013

Com a otimização das localizações dos LRC que são ligados diretamente ao LCC e com a otimização das alocações dos LSC aos LRC é conseguida uma nova configuração em arvore para a distribuição dos laboratórios do SISMETRA, conseguindo assim, um Melhoramento Logístico (ML), $ML = \frac{(Z_{Atual} - Z_{Otimizado})}{Z_{Atual}} * 100 = 87,4\%$. Essa otimização é apresentada na Fig. 7 e proporcionará um melhoramento logístico para as atividades que garantem a confiabilidade metrológica do SISMETRA.

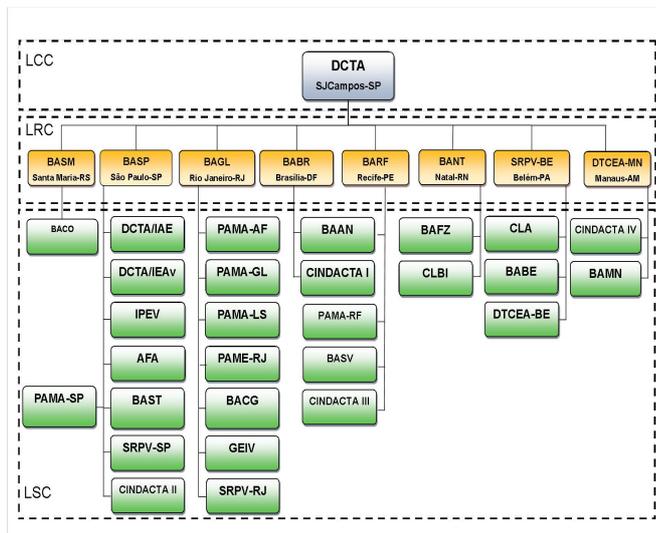


Fig. 7. Organograma Otimizado do SISMETRA

VIII. CONCLUSÃO

Para as execuções do AG foram padronizados os seguintes parâmetros genéticos: Tamanho da População (NP)=10, $T_c=0,9$, $T_{m1}=0,1$, $T_{m2}=0,01$, $T_{m3}=0,001$, $T_{m4}=0,005$, $T_{penal}=100$ e critério de parada igual a 80000 iterações, onde em 50 (cinquenta) execuções seguidas o AG conseguiu encontrar a solução ótima em 32% das execuções, tendo um valor médio para $FOB=132453,75$, com um valor médio de chamadas da Função Objetivo, $NFOB=1128195,80$. As execuções foram realizadas para otimizar o modelo MCpHLP-S com $p=8$. Com essas execuções também foi obtido um tempo médio de execução de 61,22 segundos e um desvio padrão para $FOB_{DesvioPad}=2397,76$. Analisando a variável FOB da amostra através da média estatística Coeficiente de Variação (CV), tem-se $CV=0,02 < 25\%$, caracterizando que o conjunto de soluções obtido é um conjunto homogêneo, contendo resultados com baixa variação, demonstrando a competência do AG em buscar a solução ótima ou soluções bem próximas da solução ótima.

A otimização das localizações-alocações dos laboratórios de metrologia do SISMETRA foi realizada utilizando o conjunto atual de localidades, apresentada na Fig. 3, sendo composta de 38 localidades militares, distribuídas em 1 (um) LCC (SJ dos Campos), 8 (oito) LRC e 29 (vinte e nove) LSC, e gerou uma nova proposta de distribuição apresentada na Fig. 7. As demandas e capacidades solicitadas pelo o modelo foram determinadas aleatoriamente, onde as capacidades foram superestimadas aumentando a região de soluções viáveis.

Utilizando (5) para medir a atual localização-alocação dos laboratórios do SISMETRA obtemos $Z_{Atual}=1034797$, e comparando a atual configuração com o valor obtido pela otimização $Z_{Otimizado}=130772$ para a configuração proposta, obtemos um Melhoramento Logístico (ML), $ML = \frac{(Z_{Atual}-Z_{Otimizado})}{Z_{Atual}} * 100 = 87,4\%$. Dessa forma, esse ML poderá melhorar a eficiência na realização das atividades metrologicas facilitando o transporte de materiais e

funcionários para a realização das atividades que proporcionam a confiabilidade metrologica do SISMETRA.

REFERÊNCIAS

- [1] BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica, NSCA 9-1 Sistema de Metrologia Aeroespacial (SISMETRA), São José dos Campos, SP, 2008, p. 21.
- [2] R. G. I. Arakaki and L. A. N. Lorena, "Uma heurística de localização-alocação (HLA)," *Produção*, vol. 16, no. 2, pp. 319-328, Maio-Agosto 2006.
- [3] W. G. d. Almeida, *Métodos Heurísticos para o Problema de Concentradores*, São José dos Campos, SP: INPE, 2009, p. 112.
- [4] C. B. Cunha and M. R. Silva, "A genetic algorithm for the problem of configuring a hub-and-spoke network for a LTL trucking company in Brazil," *European Journal of Operational Research*, vol. 179, pp. 747-758, 2007.
- [5] K. Smith, M. Krishnamoorthy and M. Palaniswami, "Neural Versus Traditional Approaches to the Location of Interacting Hub Facilities," *Location Science*, vol. 4, no. 3, pp. 155-171, 1996.
- [6] INMETRO, *Vocabulário Internacional de Metrologia Conceitos Fundamentais e Gerais e Termos Associados (VIM 2008)*, 1º ed., Rio de Janeiro, RJ: INMETRO, 2009, p. 78.
- [7] H. Yaman, "Star p-hub median problem with modular arc capacities," *Computers & Operations Research*, vol. 35, pp. 3009-3019, 2008.
- [8] R. G. I. Arakaki, *Heurística de Localização-Alocação para Problemas de Localização de Facilidades*, São José dos Campos, SP: INPE, 2002.
- [9] J. F. Campbell, "Integer programming formulations of discrete hub location problems," *European Journal Of Operational Research*, vol. 72, pp. 387-405, 1994.
- [10] M. E. O' Kelly and H. J. Miller, "The hub network design problem A review and synthesis," *Journal of Transport Geography*, vol. 2, no. 1, pp. 31-40, 1994.
- [11] M. E. O'Kelly, D. Bryan, D. Skorin-Kapov and J. Skorin-Kapov, "Hub Network Design with Single and Multiple Allocation : a Computational Study," *Locafion Scienc*, vol. 4, no. 3, pp. 125-138, 1996.
- [12] E. M. Sá, *Localização de Concentradores Aplicada ao Transporte Público*, Belo Horizonte, Minas Gerais: Universidade Federal de Minas Gerais, 2011, p. 78.
- [13] A. Goldman, "Optimal location for centers in a network.," *Transportation Science*, vol. 3, p. 352-360, 1969.
- [14] M. O'Kelly, "A quadratic integer program for the location of interacting hub facilities," *European Journal of Operational Research*, vol. 32, pp. 393-404, 1987.
- [15] J. G. Klincewicz, "Hub location in backbone/tributary network design: a review," *Location Science*, vol. 6, pp. 307-335, 1998.
- [16] M. Labbé and H. Yaman, "Solving the Hub Location Problem in a Star - Star Network," *NETWORKS*, vol. 51, no. 1, pp. 19-33, 2008.
- [17] S. L. Hakimi, "Optimum locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph," *Oper Res*, vol. 12, p. 450-459, 1964.
- [18] M. Gen, Y. Tsujimura and S. Ishizaki, "Optimal design of a star-LAN using neural networks," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 31, pp. 855-859, 1996.
- [19] M. C. Goldberg e H. P. L. Luna, *Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos*, 2ª ed., Rio de Janeiro, RJ:

Elsevier, 2005, p. 518.

- [20] J. H. Holland, "Adaptation in Natural and Artificial Systems," MIT Press, pp. 11-147, 1975.
- [21] D. E. Goldberg, Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning, Addison-Wesley, 1989.
- [22] Z. Michalewicz, Genetic algorithms + data structures = evolution programs, 3^a ed., New York: Spring-Verlag, 1996, p. 387.
- [23] M. C. Goldbarg, E. F. G. Goldbarg, C. R. d. A. Mendes, F. S. L. N. Araújo, G. Corso and N. M. Osti, "Algoritmo evolucionário para otimização do plano de tratamento em radioterapia conformal 3D," Pesquisa Operacional, vol. 29, no. 2, pp. 239-267, Maio a Agosto 2009.
- [24] E. P. Bento and N. Kagan, "Algoritmos genéticos e variantes na solução de problemas de configuração de redes de distribuição," Controle & Automação, vol. 19, no. 3, pp. 302-315, Junho, Agosto e Setembro 2008.
- [25] J. J. d. M. Mendes and J. F. Gonçalves, "Um algoritmo genético para o problema de sequenciamento de projectos com recursos limitados," Investigação Operacional, vol. 23, pp. 179-195, 2003.
- [26] S. L. C. Silva and L. A. N. Lorena, Algoritmo Genético para a clusterização de grupos de aprendizes utilizando o inventário de estilos de aprendizagem de Felder-Soloman, Aracaju, Sergipe, 2011, p. 4.
- [27] C. R. Dias, "Algoritmos Evolutivos para Problemas de Clusterização de Grafos Orientados: Desenvolvimento e Análise Experimental," Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2004.
- [28] L. A. N. Lorena and J. C. Furtado, "Constructive Genetic Algorithm for Clustering Problems," Evolutionary Computation, vol. 9, no. 3, pp. 309-327, 2001.
- [29] G. F. Ribeiro, M. S. Nagano e L. A. N. Lorena, "Metaheurística Híbrida Algoritmo Genético-Clustering Search para redução de estoques em processamento em sistemas de produção Flow Shop permutacional," em XXXIX Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Fortaleza, 2007.
- [30] C. T. Miasaki and R. Romero, "Um Algoritmo Genético Especializado Aplicado ao Planejamento da Expansão do Sistema de Transmissão com Alocação de Dispositivos de Compensação Série," Revista Controle & Automação, vol. 18, no. 2, pp. 210-222, 2007.
- [31] P. A. C. Filho and R. J. Poppi, "Algoritmo Genético em Química," Química Nova, vol. 22, no. 3, pp. 405-411, 1999.
- [32] H. Topcuoglu, F. Corut, M. Ermis and G. Ylmaz, "Solving the uncapacitated hub location problem using genetic algorithms," Computers and Operations Research, vol. 32, pp. 967-984, 2005.
- [33] R. F. Love, J. G. Morris and G. O. Wesolowsky, Facilities Location: Models & Methods, vol. 7, S. I. Gass, Ed., New York: Elsevier Science Publishing, 1988, p. 296.
- [34] BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica, NSCA 9-4 - Estrutura Funcional do Sistema de, 2009, p. 37.
- [35] M. M. Reche and A. S. d. Assis, "Acervo Digital," in CONGRESSO INTERNO DO INMETRO, Rio de Janeiro, 2010.