

PLANEJAMENTO DE EXPANSÃO DA TRANSMISSÃO EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA CONTEMPLANDO CRITÉRIOS DE SEGURANÇA PARA CONTINGÊNCIAS N-1

LUIZ E. DE OLIVEIRA, JOÃO P. T. SARAIVA

Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores (DEEC), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP)
Caixa Postal 4200-465, R. Dr. Roberto Frias, s/n, Porto, Portugal
E-mails: luiz.eduardo@fe.up.pt, jsaraiva@fe.up.pt

FRANCISCO D. FREITAS

Departamento de Engenharia Elétrica, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília
Caixa Postal 70910-900, Brasília, DF, Brasil
E-mails: ffreitas@ene.unb.br

Abstract— This work presents a hybrid method that uses heuristic algorithms coupled with Harmony Search (HS) metaheuristic and the combinatorial optimization Branch & Bound (B&B) algorithm to solve the problem of Static (PEEST) and Dynamic (PDEST) Transmission Network Expansion Planning. This hybrid method aims to find the optimal cost of investment for static and multi-stage approaches avoiding load-shedding and attending security constraints namely related with system contingencies. Therefore, a methodology was developed to reach the solution in three different stages, all of which considering N-1 contingencies in the calculations. The first one is responsible for obtaining an efficient set of candidate routes for the expansion. Coupled to a Local Minimum Locator Heuristic Algorithm (AHLML). In the second part, HS is used in the static optimization process to find a candidate set to dynamic expansion composed of the static optimal solution and its neighborhood (RSE). Finally, a hybrid algorithm that uses the HS and B&B concepts is adapted to provide the optimal PDEST. The developed approaches were tested and validated using the Garver and Two Valleys systems.

Keywords— Dynamic Transmission Expansion Planning, Security Constraints, Contingencies N-1, Optimal Power Flow, Heuristic Algorithms, Harmony Search, Branch & Bound.

Resumo— Este trabalho apresenta um método híbrido que utiliza algoritmos heurísticos acoplados à metaheurística *Harmony Search (HS)* e ao algoritmo de otimização combinatorial *Branch & Bound (B&B)* para resolver o problema de Planejamento Estático (PEEST) e Dinâmico (PDEST) de Expansão em Sistemas de Transmissão. Este método híbrido visa determinar o custo de investimento ótimo para as abordagens estática e multistágios evitando cortes de carga e atendendo restrições de segurança associadas às contingências no sistema. Com esta finalidade, foi desenvolvida uma metodologia para obter a solução em três diferentes etapas, todas elas considerando contingências N-1 em seus cálculos. A primeira delas é responsável por obter um conjunto eficiente de rotas candidatas à expansão. Acoplado a um Algoritmo Heurístico Localizador de Mínimos Locais (AHLML), na segunda parte, o *HS* é utilizado no processo de otimização estática para encontrar um conjunto candidato à expansão dinâmica composto pela solução estática ótima e sua vizinhança (RSE). Por fim, foi adaptado um algoritmo híbrido que mistura conceitos do *HS* e *B&B* para prover o PDEST ótimo. Foram executados testes utilizando os sistemas Garver e Two Valleys para validar o método proposto.

Palavras-chave— Planejamento Dinâmico de Expansão da Transmissão, Restrições de Segurança, Contingências N-1, Fluxo de Potência Ótimo, Algoritmos Heurísticos, *Harmony Search*, *Branch & Bound*.

1 Introdução

Após a revolução industrial, o aumento rápido do consumo energético criou um cenário de provável esgotamento de fontes energéticas não renováveis, (Sorrel et. al, 2010; EIA, 2017). Assim, torna-se necessário promover uma modificação cultural na utilização dos recursos energéticos, de tal modo que a meta deste século está associada à redução do desperdício e à otimização da geração e da operação energética. Estas preocupações também se aplicam aos Sistemas Elétricos de Potência (SEP).

No que tange às redes de transmissão, para suprir o aumento de carga, evitando sobrecargas nas linhas de transmissão e tornando possível a inserção das fontes renováveis sujeitas às incertezas naturais, os sistemas elétricos de potência devem ser reforçados e ampliados. No entanto, os custos de investi-

mento devem ser otimizados a fim de evitar gastos desnecessários com inserção de reforços pouco eficazes para o sistema. Outro critério que deve ser observado é a segurança oferecida pelos sistemas elétricos de potência aos consumidores (da Silva et al. 2017). Além disso, em uma eventual situação de manutenção ou falha de um equipamento em horário de pico, torna-se apropriado considerar também aspectos que levem em conta critérios de contingência N-1.

Como exemplo, o sistema elétrico brasileiro tem previsão de aumento de consumo de aproximadamente 4% ao ano (EPE, 2017). Tendo em vista os aspectos geográficos do vasto território nacional, as grandes distâncias entre centros de geração e de consumo, os altos custos das ampliações e reforços no sistema somados à escassez de recursos para investimentos (inerente ao histórico brasileiro), chega-se à seguinte conclusão: estratégias de expansão devem ser constantemente perseguidas visando to-

madras de decisões apropriadas durante o processo de planejamento e, sobretudo, que permitam obter uma alocação eficiente dos recursos. Esta preocupação reforça a necessidade de se procurar realizar um Planejamento ótimo na Expansão de Sistemas de Transmissão (PEST).

Sob esta ótica, este trabalho tem por objetivo apresentar um algoritmo heurístico construtivo que acopla heurísticas à metaheurística *Harmony Search* e ao algoritmo de otimização combinatória *Branch & Bound* para resolução do PDEST com previsão de atendimento às restrições de segurança (N-1).

Além desta seção introdutória, este trabalho está dividido em mais seis seções subsequentes. A Seção 2 contém a caracterização do problema e a modelagem matemática adotada. Respectivamente, nas Seções 3 e 4 são apresentadas breves revisões sobre as técnicas de otimização *HS* e *B&B*. Dando sequência ao trabalho, na Seção 5 descreve-se o método proposto para resolução do PEST. Os resultados e análises das simulações são apresentados na Seção 6. Na Seção 7 encontra-se a conclusão.

2 Planejamento de Expansão da Transmissão

2.1 Caracterização do Problema

O PEST é um problema clássico na engenharia, tendo como objetivo determinar quando, quantos e onde novos circuitos devem ser instalados na rede. Conforme (Mendonça, 2016), a otimização do PEST apresenta alguns desafios específicos, como:

- formulação da função objetivo considerando os custos dos equipamentos a serem introduzidos no sistema e penalizando cortes de carga no sistema;
- identificação das restrições físicas e operacionais do fluxo de potência da rede;
- região de solução não convexa, característica essa que pode originar convergência prematura para ótimos locais;
- explosão combinatória de alternativas, o que resulta em elevado esforço computacional para obter uma solução de alta qualidade;
- existência de subsistemas elétricos não conexos (ilhados), resultando em matrizes linearmente dependentes, ou seja, singulares.

Para este problema, existem dois principais grupos de modelos matemáticos: os que adotam uma abordagem dinâmica (multiestágios), através de uma visão holística do problema, respeitando o acoplamento temporal entre os diferentes estágios do horizonte de planejamento (Gomes e Saraiva, 2018; De Oliveira et al., 2017); e aqueles que adotam uma abordagem estática, considerando o horizonte de planejamento como uma caixa preta onde só existe o presente (*as is*) e o futuro (*to be*) (Da Silva, 2013; Mendonça, 2016).

Neste estudo, optou-se por realizar uma análise dinâmica a partir da resposta estática (a metodologia

será apresentada na Seção 4). Busca-se uma abordagem determinística, onde são procurados os planos de expansão mais vantajosos economicamente evitando cortes de carga e atendendo critérios de segurança para contingências N-1.

2.2 Modelagem Matemática Adotada para o PEST

Foi adotada neste estudo a modelagem de fluxo de potência linear (CC) sem perdas para resolução do PDEST. Nesta modelagem, o PDEST é caracterizado como um problema de programação não-linear com variáveis contínuas e discretas. A solução do problema envolve a seleção de reforços e ampliações na rede visando minimizar o custo de investimento associado aos cortes de carga e satisfazendo as seguintes restrições:

- satisfação do balanço de potência ativa;
- expansões máximas permitidas entre os ramos (\overline{Exp}_{ij}^t);
- contingências N-1.

Portanto, o problema pode ser apresentado da seguinte forma:

$$\min \sum_{t=1}^{nt} \left(\sum_{d=1}^{nbar} C_d^t \cdot def_d^t + \sum_{(i,j) \in C} C_{ij}^t \cdot PE_{ij}^t \right) \quad (1)$$

sujeito a:

$$\sum_{t=1}^{nt} \sum_{i=1}^{nbar} \left(\begin{array}{l} g_i^t + def_d^t + \dots \\ - \sum_{j \in \Omega_i} (NR_{ij}^t - Ce_{ij}^t) \cdot fe_{ij}^t + \dots \\ - \sum_{j \in \Omega_i} (PE_{ij}^t - Cc_{ij}^t) \cdot fc_{ij}^t = Dem_i^t \end{array} \right) \quad (2)$$

$$fe_{ij}^t = \gamma_{ij} \cdot \theta_{ij}^t, \quad \forall (i,j) \in E \quad (3)$$

$$fc_{ij}^t = \gamma_{ij} \cdot \theta_{ij}^t \cdot PE_{ij}^t, \quad \forall (i,j) \in C \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^{nbar} \sum_{j \in \Omega_i} Ce_{ij}^t + Cc_{ij}^t = 1, \quad \forall (i,j) \in E, C \quad (5)$$

$$Ce_{xz}^t, Cc_{xz}^t = \begin{cases} 0, & x, z \neq i, j \quad \forall (i,j) \in E, C \\ 1, & x, z = i, j \quad \forall (i,j) \in E, C \end{cases} \quad (6)$$

$$|f_{ij}^t| \leq \overline{f_{ij}} \cdot (1 + C_{ol}), \quad \forall (i,j) \in E, C \quad (7)$$

$$\underline{g}_i^t \leq g_i^t \leq \overline{g}_i^t \quad (8)$$

$$0 \leq def_i^t \leq Dem_i^t \quad (9)$$

$$\overline{Exp}_{ij}^t - PE_{ij}^t = \overline{Exp}_{ij}^{t+1} \quad (10)$$

$$0 \leq PE_{ij}^t \leq \overline{Exp}_{ij}^t, \quad \forall (i,j) \in C \quad (11)$$

$$C_{ij}^t = \frac{C_{ij}^0}{(1 + tx)^{(t-t_0)}}, \quad \forall (i,j) \in C \quad (12)$$

3 Harmony Search

Nesta formulação: $nt \in \mathbb{N}$ é o número de estágios contidos no horizonte de planejamento; $nbar \in \mathbb{N}$ é o número de barras; $NR_{ij}^t \in \mathbb{N}$ é a quantidade de reforços existentes entre as barras i e j no estágio t ; Ce_{ij}^t e $Cc_{ij}^t \in \mathbb{N}$ são, respectivamente, a contingência prevista para o ramo existente e candidato $i-j$ no estágio t ; C é o conjunto de rotas candidatas à expansão; E é o conjunto de ramos existentes no sistema de transmissão; C_d^t é o custo de déficit de energia no estágio t ; def_d^t é o déficit de energia nas barras d deficitárias; C_{ij}^t é o custo presente de investimento do reforço ou ampliação do ramo $i-j$ no estágio t ; g_i^t é a geração da barra i no estágio t ; Dem_i^t é a demanda da barra i no estágio t ; fe_{ij}^t e fc_{ij}^t são, respectivamente, o fluxo de potência ativa no ramo $i-j$ existente e candidato no estágio t ; C_{ol} é a capacidade percentual de sobrecarga permitida a cada linha de transmissão $i-j$ em uma situação de contingência; γ_{ij} é a susceptância do ramo $i-j$; θ_{ij}^t é a diferença angular entre as barras $i-j$ no estágio t ; $PE_{ij}^t \in \mathbb{N}$ é o parâmetro de expansão planejado para o ramo $i-j$ no estágio t ; tx é a taxa de interesse anual.

A função objetivo, descrita em (1), corresponde à minimização da soma dos investimentos das linhas candidatas e dos custos do déficit de energia para cada um dos estágios do horizonte de planejamento. O corte de carga, def_d^t , possui um elevado custo operacional e pode ser interpretado como uma geração fictícia de potência ativa inserida em cada barra visando garantir a viabilidade do sistema.

Neste trabalho o modelo de fluxo de carga CC para problemas de PEST é representado por (2-4). Esta modelagem é baseada no acoplamento entre a potência ativa e o ângulo da tensão e permite atender às leis de Kirchhoff e determinar a distribuição dos fluxos de potência ativa na rede de transmissão.

As Eqs. (5) e (6) refletem as restrições de segurança impostas pelo sistema, considerando-se que para cada estágio do planejamento o sistema deverá funcionar perfeitamente sob a contingência N-1.

A restrição (7) corresponde aos limites de fluxo de potência ativa nos circuitos existentes e candidatos, representando a capacidade de transporte de potência ativa da rede de transmissão. Assumindo-se que quando ocorre uma contingência, é permitido o funcionamento do sistema de transmissão em sobrecarga. Assim como em (da Silva, 2013), este estudo considerou C_{ol} de 20% da potência nominal.

As restrições (8) e (9) estão associadas aos limites inferiores e superiores dos geradores existentes e artificiais, sendo estes últimos referentes aos eventuais cortes de carga existentes no sistema.

A decisão de construir ou não determinados circuitos é representada por uma variável discreta, PE_{ij}^t . Uma vez definido o parâmetro de expansão, é necessário fazer a atualização do limite máximo de expansões possíveis para o próximo estágio em cada rota, conforme (10) e (11). O custo presente do investimento nas rotas candidatas para uma determinada taxa de interesse anual, tx , é obtido através de (12).

Inspirado no processo de improvisação musical de um trio de jazz, onde cada músico procura a harmonia perfeita entre eles, o *Harmony Search*, ou Busca Harmônica, funciona sob as seguintes premissas: cada solução proveniente das variáveis (os músicos) é denominada harmonia. O conjunto de harmonias é conhecido por Memória Harmônica (MH). Cada harmonia é associada a uma nota de *performance* que mede sua capacidade harmônica. Após cada iteração ou ensaio, são avaliadas e ranqueadas novas harmonias produzidas através de improvisação e/ou mesclagem. As piores harmonias são descartadas e repete-se o ciclo até que se satisfaça o critério de parada (Yang, 2010; De Oliveira, 2017).

Conforme demonstrado em (Yang, 2010), para inicialização do algoritmo devem ser definidos o critério de parada, a Taxa de Consideração da Memória Harmônica (TCMH), a Taxa de Ajuste de Tom (TAT), a Largura de Banda (lb) e o Tamanho da Memória Harmônica (TMH). A Memória Harmônica é criada com TMH vetores aleatórios de tamanho correspondente às variáveis de decisão.

O processo de improvisação gera novas harmonias a cada iteração. A criação do novo vetor harmonia pode ser explicada em mais detalhes com o auxílio da discussão do processo de improvisação musical. O novo vetor solução $X_i^t = [x_1^t, x_2^t, x_3^t, \dots, x_n^t]$ é gerado levando em consideração as três possibilidades de criação que o músico pré-dispõe para a improvisação de uma nova harmonia: (i) compor novas harmonias de forma aleatória; (ii) tocar qualquer parte famosa de uma música exatamente como veio de sua memória; (iii) tocar algo similar a um trecho conhecido (assim ajustando o tom levemente). Ao formalizar estas três opções em um processo de otimização, obtêm-se as seguintes três componentes: (i) aleatoriedade, (ii) uso de memória harmônica através da inteligência coletiva e (iii) ajustes de tonalidade (Yang, 2010). O algoritmo do processo de improvisação do HS é descrito como:

para (i=1 até TMH) faça se ($rand < TCMH$) então $x_i^t = x_i^{t-1}$ se ($rand < TAT$) então $x_i^t = x_i^t \pm lb \cdot rand$ senão $x_i^t = rand * (UB_i - LB_i)$ fim para
--

Nesta formulação: UB_i e LB_i são respectivamente os limites superiores e inferiores das variáveis de decisão x_i^t ; $rand$ são valores aleatórios entre $[0,1] \in R$.

A atualização da MH será realizada se ocorrer um melhor encaixe musical das novas harmonias/soluções aos/à ouvidos/função *fitness*.

Como ação final de uma iteração, o algoritmo testará se o critério de parada foi satisfeito. Em caso de insucesso, deve-se improvisar uma nova harmonia, dando sequência ao processo de busca. No final do processo de otimização, com o critério de parada satisfeito e a convergência do método constatada, o algoritmo retorna a melhor solução obtida. Em (De

Oliveira, 2017) apresentam-se exemplos numéricos detalhados da metaheurística *HS* descrita.

4 Branch & Bound

Proveniente da escola clássica de algoritmos, o *Branch & Bound* utiliza o conceito de relaxamento do problema (PDEST) e dividi-o (*to branch*) em nt (estágios) subproblemas de modo a encontrar a solução ótima para o problema inicial por comparações. O *B&B* tem por característica exercer uma enumeração sistêmica e inteligente de todas as soluções possíveis. A cada iteração, seus limites inferiores (*LI*) e superiores (*LS*) são atualizados de modo a executar a poda (*to bound*) de conjuntos de soluções infrutíferas, trazendo assim eficiência ao método. É importante salientar que o algoritmo só atinge o seu critério de parada quando os nt subproblemas são analisados. Ou seja, no final do algoritmo a solução encontrada é a real solução ótima (De Oliveira, 2017).

Neste estudo, foi criado um algoritmo baseado no *HS* para inicialização do *B&B* que garante um limite inferior subótimo aumentando assim sua eficácia. Em cada estágio do horizonte de planejamento, o método *B&B* poda os ramos mortos (alternativas de planejamento em que se verifica ocorrer cortes de carga) ou infectados (planos de expansão mais caros que o *LS*) e permite o crescimento dos bons galhos (soluções baratas e factíveis) até o fim do horizonte de planejamento.

5 Método Proposto

Visando ultrapassar as dificuldades já mencionadas para solucionar o problema, divide-se o procedimento para explicar a técnica adotada em três etapas: o primeiro bloco refere-se à determinação das rotas relevantes e redução do espaço amostral através do Algoritmo Heurístico Redução do Espaço Amostral (AHREA); o segundo bloco resolve o PEEST e fornece ao próximo estágio uma região de soluções ótimas estáticas; no terceiro e último bloco, o *HS-B&B* resolve o PDEST, a partir de todas as soluções do PEEST, a fim de encontrar a melhor solução dinâmica considerando o acoplamento temporal.

5.1 Problema Mestre-Escravo

Nesta formulação, o PEST é rearranjado de modo a ser colocado como um problema com a relação mestre-escravo. Devido a não linearidade proporcionada pelo acoplamento temporal dos investimentos, somada aos custos associados ao corte de carga, o PEST se torna uma programação não-linear inteira mista. No entanto, é possível dividir o problema de expansão da transmissão em mestre (não-linear) e escravo (linear).

O problema mestre tem a função de minimizar a parte da FOb, Eq. (1), associada aos custos de investimento, e que está sujeita às restrições (10), (11) e

(12). Em outras palavras, o problema mestre envolve a criação de um PEST com o menor custo de investimento possível, desde que este não implique em corte de carga na rede de transmissão durante o horizonte de planejamento.

O problema escravo, por sua vez, contém toda característica linear referente à otimização do fluxo de potência CC associado aos cortes de carga, representados pelos déficits, def_d^t , na Eq. (1), sujeito às restrições (1-9). Para resolução do problema de fluxo de potência ótimo linearizado sem perdas, foi utilizado o Método dos Pontos Interiores via *toolbox* LINPROG do MATLAB.

A satisfação das restrições de segurança é verificada por meio do FPO linearizado executado para todas as contingências N-1.

5.2 Algoritmo de Redução do Espaço Amostral

O Algoritmo Heurístico de Redução do Espaço Amostral (AHREA) tem por objetivo reduzir o conjunto inicial de rotas candidatas à expansão a um selecionado grupo de rotas relevantes com maior probabilidade de fazerem parte dos PEEST e PDEST ótimos. Este tipo de algoritmo, quando bem utilizado, isto é, quando reduz o espaço amostral de maneira eficiente, resulta no aumento da taxa de convergência, bem como na redução do tempo de simulação do problema de PEST. (Da Silva, 2013; Mendonça, 2016; De Oliveira, 2017).

O AHREA é iniciado com a proposta de avaliar e colher dados de TMH planejamentos aleatórios provenientes do *HS-B&B*, onde em cada plano é verificada sua factibilidade.

Para os planos factíveis, é obtida a utilização média da potência instalada por dólar investido, Ψ_{ij} , conforme a Eq. (13). Uma vez obtido Ψ_{ij} , este valor é comparado com o valor médio dos Ψ_{ij} para todas as rotas $i-j$, ψ_{min} . As rotas que apresentarem Ψ_{ij} mais elevado do que ψ_{min} serão consideradas relevantes.

$$\Psi_{ij} = \sum_{it=1}^{itmax} \frac{fc_{ij}^{nt}}{nl_{ij}^{nt} \cdot C_{ij}^0}, \quad \forall (i,j) \in C \quad (13)$$

Nesta expressão fc_{ij}^{nt} é o fluxo de potência na rota candidata $i-j$ no último estágio do horizonte de planejamento; nl_{ij}^{nt} é o número de reforços inseridos ao longo dos $itmax$ planejamentos de expansão.

Através da Eq. (14), o mesmo se aplica ao multiplicador de Lagrange, λ_{ij} , obtido para cada plano infactível. Posteriormente, os valores de λ_{ij} são comparados com o valor médio dos multiplicadores, λ_{min} , para ingressar no conjunto de rotas relevantes.

$$\lambda_{ij} = \sum_{it=1}^{itmax} \frac{lamb_{ij}^{nt}}{nl_{ij}^{nt}}, \quad \forall (i,j) \in C \quad (14)$$

Nesta expressão $lamb_{ij}^{nt}$ é o multiplicador de Lagrange referente à rota candidata $i-j$ no último estágio do horizonte de planejamento de cada simulação.

A fim de garantir um maior conjunto de rotas, optou-se, neste trabalho, por fazer a união dos conjuntos de relevância obtidos por carregamento percentual médio e pelos multiplicadores de Lagrange. Este conjunto é muito pertinente, porque mesmo tendo em conta diversas simulações apresenta a capacidade para reduzir de forma exponencial o espaço amostral dos problemas de PEST.

Durante o processo de refinamento proposto pelo AHREA, é tão necessário que todas as rotas candidatas sejam observadas e testadas ao menos uma vez em PEESTs factíveis e infactíveis, quanto *it* alcançar um limite máximo de planos de expansão testados predefinido, *itMax*, para que o AHREA termine suas operações.

5.3 Planeamento Estático de Expansão

Com o conjunto de rotas relevantes definido, é necessário realizar o processo de otimização estática. Com este fim, utiliza-se o *HS*, tal como foi apresentado na Seção 3. Neste estudo, foi proposto um Algoritmo Heurístico Localizador de Mínimos Locais (AHLML) para determinar a região de otimização estática de forma eficiente.

5.3.1 Algoritmo Heurístico Localizador de Mínimos Locais

O AHLML proposto visa especificamente localizar mínimos locais em problemas de PEEST. Na Figura 1 é ilustrada a inicialização de um problema de minimização sem a utilização do AHLML considerando-se que as soluções iniciais se encontram, aleatoriamente, fora dos pontos mínimos. Por outro lado, na Figura 2 ilustra-se a mesma FOb, porém com a utilização do AHLML.

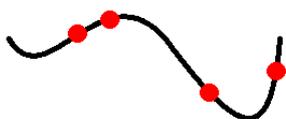


Figura 1. Ilustração da MH em um problema de minimização antes da utilização do AHLML.



Figura 2. Ilustração da MH em um problema de minimização após a utilização da AHML.

A técnica de “escorregamento” das soluções aleatórias para mínimos locais é descrita em seguida. Retira-se uma linha candidata de cada vez e verifica-se a factibilidade da solução $N-1$ para a primeira solução contida na MH. Caso seja factível, muda-se a rota e retira-se outra LT, e assim sucessivamente, até que ocorra a não factibilidade do PEEST. Em seguida, reinsere-se a última linha retirada do PEEST, tornando-o novamente factível. Deste modo, segue-

se observando outras rotas, até que todos os ramos estejam no limite mínimo para o PEEST factível. No final deste processo, quando não houver mais rotas candidatas a serem excluídas do plano de expansão, sem que o PEEST final se torne infactível, terá sido identificado um mínimo local.

5.4 Processo de Otimização Estática

Com o processo de otimização partindo de soluções satisfatórias, o *HS* volta-se, então, para a busca do mínimo PEEST, respeitando as restrições de balanço de potência e discretização dos parâmetros de expansão. É importante salientar que ao contrário do que convencionalmente se faz ao otimizar um processo, nesta metodologia, o *HS* foi modificado para encontrar não somente um único Planeamento Estático Ótimo ($PEEST_{min}$), mas também para disponibilizar uma Região de Soluções Estáticas (RSE), a ser refinada, posteriormente, na parte dinâmica do método proposto. Ou seja, a otimização estática fornecerá os melhores PEESTs à expansão dinâmica. A Figura 3 ilustra o conceito empírico de zona ótima empregado neste trabalho, onde são consideradas participantes da RSE todas as soluções obtidas com custos de investimento inferiores aos de $PEEST_{min} \cdot (1 + tx)$.

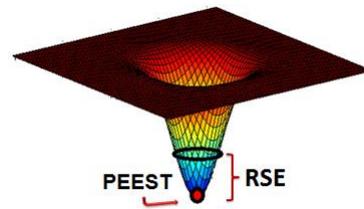


Figura 3. Ilustração da Região de Soluções Estáticas (RSE).

O processo de otimização estática é executado até que todas as soluções contidas na MH se mantenham com custo de investimento iguais entre si por no mínimo 20% das iterações já ocorridas no processo de busca harmônica.

5.5 Planeamento Dinâmico de Expansão

Esta etapa do método visa identificar o PDEST de todas as soluções estáticas contidas na RSE, respeitando o acoplamento temporal e evitando os possíveis cortes de carga. A fim de apurar a atuação do *B&B* e encontrar com maior rapidez o melhor PDEST, é feita a distribuição das soluções estáticas através do *HS*. Neste algoritmo de inicialização utilizado exclusivamente para o planeamento dinâmico, é dada prioridade à inserção das rotas mais baratas, atrasando ao máximo a construção de rotas mais caras. Quando mais de uma rota tem o mesmo custo de construção, então é priorizada aquela que possuir a melhor taxa de carregamento médio, Ψ_{ij} , calculada pelo AHREA. Caso o planejador opte pela não utilização do AHREA, o *HS-B&B*, aleatoriamente, optará por um dos caminhos.

Tendo obtido um PDEST subótimo, o *B&B* encara-se de procurar a solução ótima, pesquisando sistematicamente, estágio por estágio, os diversos subgrupos de soluções, procurando por respostas melhores que a solução inicial sugerida pelo *HS*. Como o *B&B* já parte de um bom parâmetro de resposta, a poda da árvore de soluções passa a ser executada observando não apenas as restrições de factibilidade do planejamento multiestágios, mas também comparando o custo de investimento do PDEST inicial, ao das novas inserções executadas em cada etapa do horizonte de planejamento. Isto é, além de podar os galhos mortos, representados pelos PDESTs infactíveis, o *B&B* também executa o corte prévio de alternativas que estejam associadas a um elevado custo de investimento nos estágios iniciais e (antes de chegarem aos estágios finais do horizonte de planejamento) apresentem custos finais superiores à melhor solução conhecida pelo algoritmo híbrido proposto.

Uma vez que se tem toda RSE testada, o método compara os possíveis PDESTs a fim de encontrar a melhor solução, ou seja, o PDEST ótimo.

6 RESULTADOS

Nesta seção são reportados os resultados obtidos com os sistemas-teste IEEE Garver (Garver, 1970) e *Two Valleys* (De Oliveira, 2017).

Em todas as simulações foram considerados os seguintes dados gerais: horizonte de planejamento de 10 anos, isto é, 10 estágios; taxa anual de atualização, $tx = 10\%$; a demanda do primeiro ano equivalente a 50% da demanda final admitindo o seu crescimento linear; corte de carga máximo de 1 MW por estágio de planejamento; foram permitidos redespacho de potência ativa nas unidades geradoras; escoamento máximo das rotas equivalente a 120% da potência nominal para os casos onde há contingência. Os demais dados estão contidos nas descrições dos testes e nas tabelas seguintes.

Todos os testes foram realizados utilizando o MatLab 9.2.0.538062 (R2017a) num notebook Dell com as seguintes características: Intel core i5-480M, 2.67GHz e 6.0GB de RAM. A fim de demonstrar a robustez e eficácia do algoritmo descrito, todos os sistemas foram testados utilizando os algoritmos heurísticos propostos.

Levando em consideração que o sistema *Two Valleys* (10 barras, 10 linhas existentes e 25 linhas candidatas) é uma variação do sistema Garver, optou-se por apresentar os dados de ambos os sistemas nas mesmas Tabelas 1, 2 e 3. Em azul estão contidos os dados do Sistema Garver (6 barras, 6 ramos existentes, 15 ramos candidatas).

6.1 Sistema Garver

Apesar de pequeno, este sistema ilustra as dificuldades encontradas na resolução do problema de PDEST. Para resolução do problema, inicialmente é

recomendado aplicar o AHREA e refinar as rotas existentes.

Tabela 1. Dados de Barra dos Sistemas Garver e *Two Valleys*.

Bus	Gmin (MW)	Gmax (MW)	Demanda Inicial (MW)	Demanda Final (MW)
1	0	150	40	80
2	0	0	120	240
3	0	360	20	40
4	0	0	80	160
5	0	0	120	240
6	0	600	0	0
7	0	150	40	80
8	0	0	120	240
9	0	360	20	40
10	0	0	80	160

Tabela 2. Ramos Existentes do Sistema Garver e *Two Valleys*

Linhas Existentes	Número de Linhas	Reatância (Ω)	\overline{f}_{ij} (MW)
1-2	1	40	100
1-4	1	60	80
1-5	1	20	100
2-3	1	20	100
2-4	1	40	100
3-5	1	20	100
6-7	1	10	100
6-8	1	28	100
7-9	1	20	100
9-10	1	30	100

Tabela 3. Rotas Candidatas do Sistema Garver e *Two Valleys*

Ramo	Linhas Candidatas	\overline{Exp}_{ij}^0	Reatância (Ω)	\overline{f}_{ij} (MW)	C_{ij}^0 (MUSS)
1	1-2	3	40	100	40
2	1-3	4	38	100	38
3	1-4	3	60	80	60
4	1-5	3	20	100	20
5	1-6	4	68	70	68
6	2-3	3	20	100	20
7	2-4	3	40	100	40
8	2-5	4	31	100	31
9	2-6	4	30	100	30
10	3-4	4	59	82	59
11	3-5	3	20	100	20
12	3-6	4	48	100	48
13	4-5	4	63	75	63
14	4-6	4	30	100	30
15	5-6	4	61	78	61
16	6-7	3	10	100	10
17	6-8	3	28	100	28
18	6-9	4	60	80	60
19	6-10	4	20	100	20
20	7-8	4	68	70	68
21	7-9	3	20	100	20
22	7-10	4	40	100	40
23	8-9	4	31	100	31
24	8-10	4	30	100	30
25	9-10	3	30	82	30

A partir do AHREA baseado no fluxo de potência médio entre as linhas, Ψ_{ij} , foi possível observar a

relevância das linhas 1-5, 2-3, 2-6, 3-4 e 3-5. Por outro lado, quando este método privilegia a análise sobre os multiplicadores de Lagrange, λ_{ij} , as linhas com mais relevância são 2-3, 2-6, 3-5 e 4-6. Caso fosse considerada somente a análise de Ψ_{ij} para esta iteração específica o algoritmo convergiria obrigatoriamente para uma solução subótima. Todavia, optou-se pela união dos conjuntos de soluções encontradas pelo AHREA a fim de garantir maior robustez ao método.

Ao não considerar sobrecarga nas rotas do sistema em condições de contingência, em 100 simulações, o bloco estático de otimização encontrou em 94 das simulações o custo relativo ao planejamento estático ótimo de US\$180M, em que são previstas expansões para as rotas 2-3 (1), 3-5 (2), 2-6 (1) e 4-6 (3). Para estas condições, o planejamento multiestágio obtido foi a inserção de 2-3, 3-5 e 4-6 no primeiro ano; 4-6 no quarto e sétimo estágios; 3-5 no oitavo; 2-6 no nono estágio. O custo de investimento para este plano é de aproximadamente US\$133,7M. O tempo computacional médio para cada simulação foi de aproximadamente 1min53s.

Por outro lado, sabe-se que em situações de contingência, embora aumentem as perdas e se reduza a vida útil dos equipamentos elétricos, estes poderão funcionar em sobrecarga. Assim como utilizado em (Da Silva, 2013), foram determinados planejamentos de expansão admitindo 20% de sobrecarga nos equipamentos de transmissão. Foram identificados quatro planejamentos para compor a região estática de soluções. Coincidentemente, três com o mesmo valor de US\$160M. O Plano estático com custo de US\$170M apresentou um PDEST equivalente a US\$124M, e por isso não foi considerado na Tabela 4.

Tabela 4. Custos de Investimento para o Sistema Garver Considerando Restrições de Segurança

Algoritmo	HS-B&B		HS-B&B		HS-B&B	
	Garver $X_{max}=3$		Garver $X_{max}=3$		Garver $X_{max}=3$	
Investimento Estático	US\$160M		US\$160M		US\$160M	
Ano	Rotas	C'_{ij} (US\$M)	Rotas	C'_{ij} (US\$M)	Rotas	C'_{ij} (US\$M)
1	3-5 4-6	50,00	3-5 4-6	50,00	3-5 4-6	50,00
2	4-6	27,27	2-6	27,27	2-6	27,27
6	4-6	18,63	2-6	18,63	2-6	18,63
8	3-5 2-6	25,66	3-5	10,26	3-5	10,26
10	-	-	2-6	12,72	4-6	12,72
Investimento Dinâmico	US\$121.558M		US\$118.886M		US\$118.886M	

O resultado, ano a ano, do PDEST com contingências é comparado ao encontrado em (De Oliveira et al., 2017) na Tabela 5. Deve-se notar que a diferença percentual do custo entre os investimentos sem considerar restrições de segurança e considerando-as, tanto para o PEEST, quanto para o PDEST, foi de aproximadamente 45%.

Tabela 5. Custos de Investimento para o Sistema Garver

Restrições N-1	Não		Sim	
	HS-B&B		HS-B&B	
Investimento Estático	Garver $X_{max}=3$ US\$110M		Garver $X_{max}=3$ US\$160M	
Ano	Rotas	C'_{ij} (MUS\$)	Rotas	C'_{ij} (MUS\$)
1	4-6	30,00	3-5 4-6	50,00
2	-	-	2-6	27,27
3	-	-	-	-
4	4-6	22,54	-	-
5	-	-	-	-
6	3-5	12,42	2-6	18,63
7	4-6	16,93	-	-
8	-	-	3-5	10,26
9	-	-	-	-
10	-	-	4-6	12,72
Investimento Dinâmico	US\$81.892M		US\$118.886M	

6.2 Sistema Two Valleys

Para este sistema de dez barras, o AHREA encontrou as 11 rotas relevantes. São elas 1-5, 2-3, 2-6, 3-4, 3-5, 4-6, 6-7, 6-8, 7-9, 8-10 e 9-10.

Ao comparar os resultados obtidos neste trabalho com os de (Oliveira, 2017), nota-se um aumento considerável do esforço computacional e o custo de investimento final é superior em aproximadamente 63%. Embora a abordagem N-1 confira uma segurança adicional ao sistema, superdimensiona-o, adiando investimentos que poderiam ser executados posteriormente a um custo presente inferior.

As Tabelas 6 e 7 apresentam os resultados detalhados do HS-B&B para o sistema *Two Valleys*. Os tempos para convergência do HS-B&B para todos os casos podem ser encontrados na Tabela 7.

Tabela 6. Custos de Investimento para o Sistema Two Valleys

Restrições N-1	Sim		Não	
	Plano 1		Plano 2	
Investimento Estático	US\$260M		US\$170M	
Ano	Rotas	C'_{ij} (MUS\$)	Rotas	C'_{ij} (MUS\$)
1	3-5 2-6 8-10	80,00	4-6	30,00
2	4-6 6-7	36,36	8-10	27,27
3	8-10	24,80	-	-
4	7-9	15,03	4-6	22,54
6	4-6	18,63	3-5	12,42
7	-	-	4-6 6-7	22,58
8	3-5 6-7	15,40	-	-
9	-	-	7-9	9,33
10	4-6	12,72	-	-
Investimento Dinâmico	US\$202.928M		US\$124.134M	

Tabela 7. Tempos de Convergência para o PDEST Ótimo com Redespacho na Geração

Sistema	HS-B&B	Sistema	HS-B&B
Garver $N - 0$	min 17s max 25s média 19s	<i>Two Valleys</i> $N - 0$	min 98s max 134s média 111s
Garver $N - 1$	min 87s max 113s média 98s	<i>Two Valleys</i> $N - 1$	min 488s max 621s média 554s

7 Conclusão

Neste trabalho foram propostas melhorias ao algoritmo descrito em (Oliveira, 2017), resultando em um algoritmo híbrido mais capaz de solucionar o Planejamento Dinâmico de Expansão em Sistemas de Transmissão sujeito a restrições de segurança. Como inovações, todos os estágios do Algoritmo Heurístico Construtivo, aqui apresentado, passaram a utilizar a análise determinística com previsão de contingências N-1.

Tanto para o PEEST, quanto para o PDEST, o HS-B&B convergiu para a possível solução ótima em todos os casos testados.

O aumento do esforço computacional, em sua predominância, se deveu ao fato de ser necessário calcular fluxos de potência para cada rota candidata e ou/existente retirada visto que se consideram restrições de segurança. Em contrapartida, quando estas restrições eram desconsideradas, tornava-se necessário calcular a solução de um único fluxo de potência por opção de expansão. A inserção do Algoritmo Heurístico Localizador de Mínimos Locais no algoritmo proposto para tratamento dos planejamentos identificados pelo HS é igualmente responsável pelo aumento do esforço computacional. No entanto, as soluções obtidas após o refinamento do AHLML são de qualidade superior às apresentadas anteriormente pelo HS, justificando, assim, a sua permanência em estudos futuros.

Devido ao aumento do esforço computacional e ao aumento de custo inerente às análises determinísticas de segurança, fica aberto espaço para o desenvolvimento de análises probabilísticas que visem prever o investimento de tal modo que o sistema possa operar de forma adequada com carga máxima bem como em caso de contingência.

Para continuação deste trabalho prevê-se a inserção de perdas nas linhas; a adoção de modelagem AC considerando as restrições operativas de tensão; utilização do método de simulação Monte Carlo às incertezas em carga e confiabilidade; realização de testes com sistemas de maior dimensão.

Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem ao INESC TEC e à Portfólio Engenharia por todo suporte financeiro.

Referências Bibliográficas

- Da Silva A. M. L.; de Assis F. A.; Manso L. A. F.; Freire, M. R. and Flávio S. A. (2017), "Constructive metaheuristics applied to transmission expansion planning with security constraints," 19th International Conference on Intelligent System Application to Power Systems (ISAP), San Antonio, TX, 2017, pp. 1-7. doi: 10.1109/ISAP.2017.8071414
- Da Silva E. F. (2013), "Planejamento Estocástico da Expansão da Rede de Transmissão de Energia Elétrica Multiestágio Considerando Restrições de Segurança", Ph.D. thesis, Univ. Est. Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP), Ilha Solteira - SP, Brasil.
- De Oliveira, L. E. (2017), "Planejamento Dinâmico de Expansão em Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica via Algoritmos Híbridos de Otimização", Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.DM - 681/2017, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 152p.
- De Oliveira, L. E.; Freitas, F. D.; Silva Jr., I. C. ; Gomes, P. V. (Sep. 2017), "Dynamic and Static Transmission Network Expansion Planning via Harmony Search and Branch & Bound on a Hybrid Algorithm", Lecture Notes in Computer Science, 1ed.: Springer International Publishing, Porto, Portugal, 2017, v. 10423, p. 271-282.
- Empresa de Pesquisa Energética - EPE (Jan. 2017), Projeção da demanda de energia elétrica para os próximos 10 anos (2017-2026), Série Estudos da Demanda, Nota Técnica DEA 001/17, Rio de Janeiro - RJ, Brasil.
- Garver, L. L (Sep. 1970), "Transmission Network Estimation Using Linear Programming", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. PAS-89, n. 7, p. 688-1697.
- Gomes, P. V.; Saraiva, J. T. (Feb. 2018), "A novel efficient method for multiyear multiobjective dynamic transmission system planning", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, v. 100, p. 10-18. doi: 10.1016/j.ijepes.2018.02.020
- Mendonça, I. M. (2016), "Identificação de Rotas Relevantes para o Planejamento Estático da Expansão de Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica," Ph.D. thesis, Dept. Eng. Elt., Univ. Federal de Juiz de Fora, UFJF, Juiz de Fora - MG, Brasil.
- Sorrell, S.; Speirs J.; Bentley R.; Brandt A and Miller R. (2010), "Global oil depletion: A review of the evidence", Energy Policy, Vol. 38, Issue 9, pp. 5290-5295. doi: 10.1016/j.enpol.2010.04.046
- U.S. Energy Information Administration - EIA (Sep. 2017), "International Energy Outlook 2017", Report Number: DOE/EIA-0484(2017).
- Yang, X. S. (2010), "Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms", 2nd edn., Luniver Press, Univ. of Cambridge, United Kingdom.