

Planejamento da Expansão de Sistemas de Transmissão via Metaheurística Construtiva

F.A. Assis^{1,2} A.M. Leite da Silva¹ L.A.F. Manso² M.R. Freire³

¹Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio, RJ, Brasil

²Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de São João del-Rei – UFSJ, MG, Brasil

³Instituto de Sistemas Elétricos e Energia, Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, MG, Brasil

Resumo— Este artigo propõe uma nova ferramenta de otimização para solução do problema estático de planejamento da expansão da transmissão (PET), considerando o critério de segurança “N-1”. Um modelo de fluxo de potência linear DC com a inclusão das perdas é adotado para avaliação das configurações obtidas. A ferramenta de otimização proposta é construída a partir da combinação de duas técnicas: um algoritmo heurístico construtivo e uma metaheurística evolucionária. Dois índices são utilizados pelo processo construtivo. O primeiro aborda o problema da rede intacta “N-0”, considerando um carregamento hipotético para cada possível reforço de transmissão. A complexidade adicional para o atendimento do critério de segurança “N-1”, como restrição do problema de otimização, é contornada pela utilização do segundo índice, que consiste em um indicador de sobrecarga. Este índice é obtido pela observação das sobrecargas nos equipamentos de transmissão resultantes do estudo de contingências. Os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia proposta em um sistema teste são apresentados e discutidos.

Palavras chave— Critério de segurança, índice de sobrecarga, metaheurística construtiva, otimização, planejamento da expansão da transmissão.

I. INTRODUÇÃO

Bons planos para a expansão de um sistema de transmissão de energia elétrica devem ser capazes de garantir o compromisso entre o custo mínimo de investimento e de operação, bem como padrões desejáveis de segurança e qualidade no fornecimento da energia elétrica [1]-[14]. Devido às grandes dimensões dos sistemas de potência atuais, vários aspectos tornam o planejamento da expansão da transmissão (PET) um problema combinatório e estocástico de grande complexidade. Dentre estes aspectos destacam-se: a natureza discreta das decisões de investimento, a disponibilidade dos equipamentos, as incertezas envolvidas no crescimento da demanda e a localização de novas fontes geradoras. A consideração de critérios de segurança como restrição do processo de otimização acentua ainda mais a dificuldade de se encontrar soluções ótimas para o problema PET em se tratando de sistemas reais de grande porte.

Na literatura atual, poucos trabalhos voltados para o problema PET consideram em sua modelagem critérios de segurança no atendimento à demanda [3]-[11]. Alguns trabalhos realizam a avaliação de critérios de segurança apenas para o conjunto final de soluções com os menores investimentos, obtido a partir da ferramenta de otimização. Neste caso, são

preservadas apenas as soluções finais que permitem a operação dos equipamentos dentro de seus limites técnicos, e que garantem o atendimento total da carga. Entretanto, os custos de investimento correspondentes são mais elevados se comparados aos das soluções obtidas, quando o critério de segurança é observado durante o processo de busca [3], [10]. Dessa forma, faz-se necessária a utilização de ferramentas de otimização eficientes (i.e., com um equilíbrio adequado entre exatidão e custo computacional) no processo de busca para identificação de soluções de boa qualidade, que simultaneamente garantam o critério de segurança pré-definido.

Este trabalho propõe uma nova metodologia para a solução do problema PET estático, a qual é baseada em um modelo de fluxo de potência DC que inclui as perdas na transmissão, além de considerar o critério de segurança “N-1” ao longo do processo de otimização. A ferramenta proposta é elaborada com base em duas estratégias de otimização: heurística construtiva (e.g., [2], [12]) e metaheurística evolucionária (e.g., [9]). Dois índices são utilizados no processo construtivo para identificação de ramos atrativos ao reforço. O primeiro está relacionado ao desempenho da rede intacta (“N-0”), considerando um carregamento hipotético para cada possível reforço da transmissão. A fim de considerar o critério de segurança “N-1” como restrição do problema de otimização, um indicador de sobrecarga (segundo índice) é utilizado para contribuir na evolução das soluções do PET. Este índice é obtido pela observação das sobrecargas nos equipamentos de transmissão durante as análises de contingência. O sistema teste IEEE-RTS [15], com as mudanças consideradas em [14], é utilizado para avaliação da metodologia proposta.

II. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA PET CONSIDERANDO CRITÉRIO DE SEGURANÇA

Na formulação do problema PET estático, para um horizonte de planejamento de longo prazo, modelos matemáticos simplificados são comumente utilizados para representar a rede elétrica do sistema. Dentre eles, o modelo linear DC de rede é o mais empregado. Nesta seção é apresentada a formulação do problema PET adotada neste trabalho, a qual considera o critério de segurança “N-1” e utiliza o modelo de fluxo DC, com inclusão das perdas ôhmicas, para avaliar as configurações obtidas ao longo do processo construtivo.

O problema PET, até mesmo quando a modelagem DC é adotada, consiste em um problema de otimização não linear inteiro misto (PNLIM), com um número de alternativas de expansão do sistema combinatorialmente explosivo. A consideração de restrições de segurança aumenta ainda mais a complexidade do problema e a dificuldade de se encontrar o

plano ótimo de expansão. Uma estratégia comum para tratar o problema da não linearidade das equações presentes no PET, e que é adotada por vários trabalhos da área [1], é o desacoplamento do problema original em dois subproblemas: investimento e operação, os quais são resolvidos, alternada e interativamente, de forma linearizada.

A. Subproblema de Investimento

Este subproblema tem por objetivo a identificação de planos de expansão com custos de investimento reduzidos, e que sejam capazes de atender a demanda futura respeitando certos critérios de segurança. Sendo assim, o subproblema de investimento pode ser definido por:

$$\text{Min: } f(n) = \sum_{(ij) \in \Omega} c_{ij} n_{ij} + \alpha \left(cc(n) + \sum_{k=1}^{nc} [ci(n)_k + sc(n)_k] \right) \quad (1)$$

$$\text{s.a.:} \quad 0 \leq n_{ij} \leq n_{ij}^{\max} \quad \forall (ij) \in \Omega$$

onde: $f(n)$ é a função objetivo do problema; n é o vetor decisão; n_{ij} é o componente do vetor n que armazena o número de reforços adicionados ao ramo candidato i - j ; c_{ij} é o custo de adição de um reforço no ramo i - j ; Ω é o conjunto de todos os ramos candidatos; α corresponde a uma penalização aplicada (para toda e qualquer decisão n): ao corte de carga da rede intacta ($cc(n)$), ao corte de carga por ilhamento decorrente da contingência k ($ci(n)_k$) e às sobrecargas decorrentes da contingência k ($sc(n)_k$); nc é o número de contingências observadas na aplicação do critério de segurança; $n_{ij}^{\max}$ é o número máximo de reforços que podem ser adicionados ao ramo candidato i - j . Os cortes e sobrecargas são expressos em MW. Portanto, a penalidade α é dada em unidades monetárias por MW.

Neste trabalho, é adotado o critério de segurança “N-1” [4]-[7]. Portanto, o sistema de transmissão deve garantir o total atendimento da carga, sem sobrecarregar seus equipamentos, mesmo para o caso da contingência simples de qualquer um de seus circuitos (linha de transmissão ou transformador). A penalização α , aplicada a eventuais cortes de carga e/ou sobrecargas nos equipamentos, visa permitir a consideração de soluções (i.e., planos) inviáveis em termos do critério de segurança adotado, principalmente em etapas iniciais do algoritmo de otimização proposto. Entretanto, o processo construtivo converge para soluções viáveis do problema PET.

B. Subproblema de Operação

O subproblema de operação é responsável por avaliar, tanto sob a condição de rede intacta quanto sob contingências simples, cada plano de expansão n obtido ao longo do processo construtivo. Para a consideração da rede intacta, o despacho ótimo de geração, que minimiza o corte de carga do sistema, é obtido pelo problema de otimização linear definido por:

$$\text{Min:} \quad cc(n) = \sum_{k \in \Gamma} r_k \quad (2)$$

$$\text{s.a.:} \quad \begin{cases} g + B\theta + r = d \\ |b_{ij}\theta_{ij}| \leq (n_{ij}^0 + n_{ij}) f_{ij}^{\max} \\ g^{\min} \leq g \leq g^{\max} \\ 0 \leq r \leq d \end{cases} \quad \forall (ij) \in \Omega$$

onde: r é o vetor de gerações fictícias e seu componente r_k representa o valor do corte de carga da barra k ; Γ é o conjunto de barras de carga; g é o vetor de geração; B é a matriz de susceptâncias para o sistema; θ é o vetor de ângulos das tensões nodais; d é o vetor de demanda; θ_{ij} é a abertura angular apresentada pelas tensões nodais das barras terminais i e j ; b_{ij} é a susceptância equivalente do ramo i - j ; n_{ij}^0 é o número de circuitos existentes no ramo i - j , na topologia base do sistema; $f_{ij}^{\max}$ é o valor máximo de fluxo de potência ativa para cada circuito do ramo i - j ; $g^{\min}$ e $g^{\max}$ são, respectivamente, vetores com os limites mínimos e máximos das unidades geradoras.

Para a aplicação do critério “N-1”, em cada ramo ativo do sistema deve ser retirado um circuito. Neste trabalho, entende-se por ramo ativo aquele que possui pelo menos um circuito, seja ele pertencente à topologia base do sistema ou resultante de reforço durante o processo de expansão. Em seguida, um problema de otimização semelhante ao problema (2) é resolvido. Na análise sob contingência, pretende-se avaliar a capacidade de atendimento da demanda sem a possibilidade de despacho da geração, exceto para a barra de referência, para a qual são mantidos os seus limites mínimo e máximo de capacidade. Neste novo problema, os limites de capacidade dos circuitos são ignorados, de modo a tornar possível o atendimento total da demanda, exceto em situações de ilhamento, quando, para uma dada contingência k , os possíveis cortes de carga (gerações fictícias) devem ser identificados e acumulados em $ci(n)_k$. As eventuais sobrecargas são contabilizadas por meio de $sc(n)_k$.

Identificado os possíveis cortes de carga para a rede intacta ($cc(n)$) e sob cada contingência ($ci(n)_k$), assim como as eventuais sobrecargas ($sc(n)_k$), o plano n pode ser completamente avaliado pelo subproblema de investimento.

C. Perdas na Transmissão

A fim de se obter uma melhor representação dos fluxos de potência ativa e, consequentemente, da operação futura do sistema, as perdas ôhmicas da transmissão devem ser levadas em consideração na avaliação do subproblema de operação, tanto em “N-0” quanto em “N-1”. Para o cálculo das perdas, um processo iterativo simples é realizado durante a avaliação de cada plano sob a condição de rede intacta. Após a solução do problema de otimização modelado em (2), as perdas para cada ramo ativo i - j do sistema são calculadas como:

$$P_{ij}^{\text{Perdas}} = g_{ij} \theta_{ij}^2 \quad (3)$$

onde g_{ij} é a condutância equivalente do ramo i - j .

Em seguida, para cada ramo, as barras terminais i e j recebem metade das perdas estimadas na forma de cargas fictícias, sendo o problema de otimização (2) resolvido novamente. Todo o processo é repetido uma segunda vez, visando uma maior precisão para os valores calculados. Os vetores finais de carga (incluindo as cargas fictícias que representam as perdas ativas) e de geração obtidos para a rede intacta (i.e., com a consideração dos cortes de carga) fornecem os valores utilizados nas avaliações sob contingências.

III. METAHEURÍSTICA CONSTRUTIVA

Técnicas de otimização baseadas em metaheurísticas são aplicáveis a uma gama diversificada de problemas de otimização. Diversos trabalhos da literatura atual vêm utilizando estas técnicas na solução do problema PET [1], [8]-[13]. A aplicação destas técnicas permite a identificação de soluções de boa qualidade a um custo computacional relativamente baixo (i.e., requisitos de memória e tempo de processamento factíveis), até mesmo para sistemas de grande porte.

De forma geral, a classificação de técnicas metaheurísticas é uma difícil tarefa, tendo em mente que metaheurísticas com características diferentes podem compartilhar as mesmas ideias para identificação de soluções. Entretanto, baseando-se na forma como as soluções do problema são manipuladas durante o processo de busca, três classes fundamentais de metaheurísticas podem ser distinguidas: metaheurísticas de busca local, que realizam pequenas alterações de forma iterativa em uma única solução; metaheurísticas baseadas em população, as quais realizam combinações de soluções para obtenção de novas; e metaheurísticas construtivas, que, como o próprio nome sugere, constroem soluções de forma gradual, a partir da solução vazia, em um processo iterativo, até atingir um critério de interrupção [16].

Entre as metaheurísticas classificadas como construtivas, as mais comumente utilizadas são *Ant Colony Optimization* (ACO) e *Greed Randomized Adaptive Search Procedures* (GRASP) [17]. Dois exemplos específicos ao problema PET podem ser citados: [8], [13]. Ambas as técnicas iniciam o processo de otimização a partir de soluções vazias e utilizam mecanismos de busca local para adição iterativa de elementos. A cada iteração, um elemento é escolhido, de forma aleatória ou usando alguma heurística ou memória a partir de uma lista.

A técnica de otimização proposta neste trabalho para solução do problema PET, é adequadamente classificada como uma metaheurística construtiva. Soluções viáveis de boa qualidade são construídas a partir da topologia base do sistema (solução vazia), via adição gradual de reforços mais atrativos. Adicionalmente, mecanismos de recombinação e perturbação de soluções, comumente utilizados em outras classes de metaheurísticas, são incorporados ao processo construtivo, originando uma técnica essencialmente nova.

IV. METODOLOGIA PROPOSTA

A metodologia proposta neste trabalho visa identificar planos de expansão da transmissão de boa qualidade. Conforme exposto na Seção II, o critério de segurança “N-1” é incorporado ao processo de otimização, sendo adotado o modelo de fluxo DC com a consideração das perdas ôhmicas para análise das configurações obtidas. A nova ferramenta de otimização proposta faz uso de quatro mecanismos para construção das soluções. Nas subseções que se seguem são apresentados os mecanismos utilizados e o algoritmo geral da metaheurística construtiva proposta.

A. Mecanismos Construtivos

1) Mecanismo de Adição (MA)

Para uma dada solução corrente, após a aplicação do MA, é gerado um número fixo de soluções (e.g., 6), cada uma com

a adição de um só reforço. Os reforços a serem adicionados são obtidos por meio de dois índices de atratividade e formam a Lista de Reforços Mais Atrativos (LRMA). Cabe destacar que cada solução corrente terá sua própria LRMA.

O primeiro índice de atratividade (Ind_{ch-ij}), expresso em p.u. (i.e., por unidade) da capacidade do respectivo circuito, é calculado para cada ramo candidato (ativo ou inativo) $i-j$, a partir da solução do problema de fluxo ótimo DC com perdas na condição de rede intacta. Este índice, conforme (4), está diretamente relacionado ao módulo da abertura angular ($|\theta_{ij}|$ em radianos) das tensões das barras terminais do ramo, e inversamente relacionado com a reatância (x_{ij}) e a capacidade máxima ($f_{ij}^{\max}$) do circuito a ser adicionado.

$$Ind_{ch-ij} = \frac{|\theta_{ij}|}{x_{ij} f_{ij}^{\max}} \quad (4)$$

Este índice visa identificar os circuitos com maior carregamento hipotético (sem considerar a consequente redução na abertura angular entre as barras terminais do ramo) após sua inserção. Tais circuitos terão, em princípio, maior potencial para contribuir para uma melhor distribuição do fluxo de potência ativa, o que traz benefícios para alguns aspectos operativos do sistema, como a redução das perdas ôhmicas e do nível de carregamento dos circuitos. Este último aspecto é fundamental para o bom desempenho do sistema, tanto para a condição de rede intacta quanto sob eventuais contingências.

O segundo índice (Ind_{sc-ij}), dado por (5), é calculado para cada ramo candidato ativo $i-j$, a partir da análise de contingências aplicada à solução corrente (plano n). A cada contingência k , a eventual sobrecarga no ramo candidato ativo $i-j$ ($sc(n)_{k-ij}$) é acumulada no respectivo somatório.

$$Ind_{sc-ij} = \sum_{k=1}^{nc} sc(n)_{k-ij} \quad (5)$$

Pela própria composição do índice Ind_{sc-ij} , infere-se que os ramos por ele indicados poderão contribuir de forma significativa para o atendimento do critério de segurança considerado. O número de reforços selecionados a partir de cada índice para formar a LRMA é um parâmetro a ser definido pelo planejador, e deve estar diretamente relacionado com as dimensões do sistema em estudo.

2) Mecanismo de Cruzamento (MC)

Este mecanismo é comumente utilizado por metaheurísticas evolucionárias, como, por exemplo, algoritmos genéticos [18]. O MC consiste, basicamente, em extrair características de duas soluções diferentes e recombiná-las a fim de criar duas novas soluções. Neste trabalho, é utilizado o cruzamento uniforme, o qual é aplicado a pares de soluções. Portanto, dentro do conjunto de soluções progenitoras, um par é selecionado por meio de sorteio, onde cada solução possui uma probabilidade de ser escolhida proporcional à sua aptidão, a qual é avaliada por meio da função objetivo do subproblema investimento, ou seja, de acordo com (1). Isso significa que soluções com valores mais reduzidos de $f(n)$ têm maiores chances de procriação.

O par de soluções gerado pelo MC segue para posterior aplicação do mecanismo de mutação, apresentado no próximo subitem. A aplicação do MC ao par de soluções progenitoras selecionado está condicionada a uma taxa de probabilidade definida pelo planejador, conhecida como *taxa de cruzamento*. Dessa forma, quando por sorteio o MC não é aplicado ao par de soluções selecionado, as duas soluções descendentes que seguem são idênticas às suas genitoras.

3) Mecanismo de Mutação (MM)

Assim como o MC, este mecanismo é frequentemente utilizado por metaheurísticas evolucionárias. O MM é responsável por aplicar modificações aleatórias nos elementos de uma solução para criar uma nova. Cada solução resultante da aplicação do MC deve ser submetida ao MM. Durante a aplicação deste mecanismo, para cada elemento da solução em processo de mutação é realizado um primeiro sorteio que define, de acordo com certa probabilidade, chamada de *taxa de mutação*, se este elemento sofrerá ou não uma modificação. Em caso afirmativo, um segundo sorteio define, com igual probabilidade, se o elemento será incrementado ou decrementado, respeitando-se os limites superior e inferior para o elemento.

4) Mecanismo de Seleção (MS)

O MS é aplicado, a cada nível do processo construtivo, às soluções produzidas pelos demais mecanismos. O seu objetivo é a definição dos conjuntos reduzidos, de soluções inviáveis, que seguem para o próximo nível, assim como, a identificação de eventuais soluções que atendam ao critério de segurança. Estas últimas soluções são armazenadas no Conjunto de Planos que atendem ao Critério de Segurança (CPCS). Cabe destacar que os conjuntos reduzidos são formados pelas soluções inviáveis com os melhores valores de aptidão. Tanto o CPCS quanto os conjuntos reduzidos devem ter seus tamanhos limitados. Estes limites são definidos pelo planejador.

B. Algoritmo da Metodologia Proposta

Na metodologia proposta aplicada ao problema PET, cada elemento de uma dada solução (plano candidato à expansão) representa um ramo candidato ao reforço. Partindo da configuração base do sistema, os quatro mecanismos apresentados no item anterior trabalham mutuamente no intuito de gradativamente construir soluções, até atingir bons planos de expansão para o problema PET.

Além do CPCS definido no Item 4 da Seção III.A, outros dois conjuntos são utilizados ao longo do processo construtivo. São eles: o Conjunto Reduzido de Planos obtidos pelo MA (CRPMA) e o Conjunto Reduzido de Planos obtidos pelos mecanismos MC e MM (CRPMCM). Todos estes três conjuntos são inicialmente vazios. No primeiro nível construtivo, apenas o MA é aplicado. Por consequência, apenas o CRPMA é alterado neste nível, recebendo os planos obtidos pelo MA. A partir do segundo nível construtivo, com a inclusão dos demais mecanismos, em particular do MS, todos os três conjuntos são modificados/atualizados. Logicamente, no planejamento de sistemas reais, soluções que atendam ao critério de segurança só devem surgir em níveis mais avançados do processo construtivo. Portanto, espera-se que o CPCS permaneça vazio

durante a maior parte das iterações do algoritmo metaheurístico construtivo proposto, para o qual os passos principais são apresentados a seguir:

- i) *Adição* - Defina o nível atual do processo construtivo como primeiro e aplique o MA à topologia base do sistema (solução inicialmente vazia). Insira todos os planos obtidos no CRPMA;
- ii) *Adição* - Incremente o nível construtivo atual e aplique o MA aos planos dos conjuntos CRPMA e CRPMCM;
- iii) *Cruzamento e Mutação* - Una todos os planos dos conjuntos CRPMA, CRPMCM e CPCS, formando o conjunto de progenitores, ao qual os mecanismos MC e MM serão aplicados. Estes mecanismos são aplicados de forma a gerar novos planos (excluídas as repetições) com quantidade máxima de reforços igual ao número do nível mais um. A geração de novos planos é interrompida quando o total de planos obtidos é igual ao número de planos progenitores;
- iv) *Seleção* - Aplique o MS aos planos definidos no passo (ii) para determinar o novo CRPMA, e aos planos definidos no passo (iii) para determinar o novo CRPMCM. Eventuais planos viáveis serão inseridos no CPCS;
- v) *Critério de Parada* - Interrompa o processo construtivo se o melhor plano (em termos de investimento) do CPCS é mantido por um número de níveis n_{rep} . Caso contrário, retorne ao passo (ii).

Cabe destacar que as soluções finais do primeiro nível do processo construtivo possuem apenas um reforço (i.e., topologia base mais um reforço). A partir do segundo nível, quando os mecanismos MC e MM passam a ser empregados no processo, os planos podem apresentar uma quantidade de reforços limitada à ordem do nível mais um reforço. Essa delimitação garante ao processo construtivo um comportamento parcimonioso, melhorando seu desempenho.

Por fim, as melhores soluções do problema PET estarão contidas no CPCS.

V. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O sistema IEEE-RTS de 24 barras [15], comumente testado em estudos de planejamento da expansão, é utilizado para avaliação do desempenho da metodologia proposta. Este sistema possui em sua topologia original 38 circuitos, distribuídos em 34 ramos. Os valores de demanda em cada barra e a capacidade de geração de cada unidade foram triplicados, conforme [14]. Os valores de investimento dos ramos candidatos à expansão foram ainda multiplicados por 100, do mesmo modo que em [4]. Para a penalidade α , do subproblema investimento, foi considerado o valor de 10^6 \$/MW. São considerados como ramos candidatos os 34 ramos existentes e mais 7 ramos novos, perfazendo um total de 41 ramos candidatos a expansão, os quais podem receber no máximo 3 reforços. Para realização dos testes a metodologia foi implementada na linguagem C#.NET, com utilização da biblioteca GLPK para solução dos problemas de otimização linear. O computador utilizado possui processador Intel Core i7 de 2.93GHz.

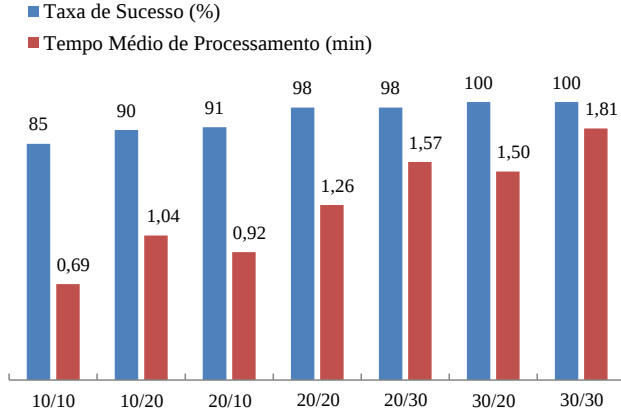


Figura 1. Desempenho de Algumas Combinações de Parâmetros.

Para planejar este sistema, em cada teste realizado, foram simuladas 100 execuções da metodologia proposta. Para formação da LRMA a cada nível construtivo, foram selecionados 2 reforços a partir do Ind_{ch-ij} e 4 reforços a partir do Ind_{sc-ij} , exceto para o primeiro nível. Neste caso foi permitido selecionar 10 reforços por Ind_{ch-ij} e 20 por Ind_{sc-ij} . Entretanto, eliminando as interseções, apenas 15 ramos foram selecionados pelo segundo índice. Os demais ramos candidatos não selecionados não apresentaram sobrecarga nas avaliações sob contingências. Os valores considerados para as taxas de cruzamento e de mutação dos mecanismos MC e MM foram 65% e 8%, respectivamente. Finalmente, o tamanho do CPCS foi limitado a um valor igual ao dobro dos tamanhos dos conjuntos CRPMA e CRPMCM, sendo o critério de parada definido como a repetição da melhor solução deste conjunto por 5 níveis consecutivos do processo construtivo (i.e., $n_{rep} = 5$).

Inicialmente, foram realizados vários testes combinando dois parâmetros da metodologia: tamanho máximo do CRPMA e tamanho máximo do CRPMCM. Tais testes tiveram por objetivo não apenas identificar a melhor combinação, mas também comprovar a baixa sensibilidade da metodologia proposta em relação à variação destes parâmetros. A Fig. 1 apresenta o percentual de acerto (azul) e o tempo médio de processamento por execução (vermelho) para 7 dessas combinações CRPMA/ CRPMCM: de 10/10 até 30/30. Uma execução é considerada de sucesso quando encontra o menor investimento (ótimo conhecido) identificado em todos os testes, cujo valor é \$681 milhões. Salienta-se que na aplicação do modelo proposto não foi considerada uma ordem de despacho para os geradores, sendo, então, encontradas cinco diferentes soluções com este mesmo investimento, todas com 17 reforços. Dentre essas soluções, a que apresenta menor valor de perdas ativas possui os seguintes reforços: $n_{01-05} = 1$, $n_{02-04} = 1$, $n_{03-09} = 2$, $n_{06-10} = 2$, $n_{07-08} = 3$, $n_{09-12} = 1$, $n_{10-11} = 2$, $n_{11-12} = 2$, $n_{20-23} = 1$ e $n_{14-23} = 2$.

Verifica-se que todas as combinações exibidas apresentam um elevado percentual de acerto, mesmo para tamanhos muito reduzidos dos conjuntos, como é o caso do par 10/10. Observa-se ainda, que o aumento dos parâmetros analisados causa um pequeno e quase linear impacto no esforço computacional. O tempo de processamento associado ao par 20/20 é 1,26 minutos e a taxa de sucesso correspondente é de 98%. A partir de um pequeno aumento destes parâmetros para, por exemplo,

TABELA I. DESVIOS PERCENTUAIS MÉDIOS

CRPMA/ CRPMCM	$D_{1Melhor}$ (%)	$D_{10Melhor}$ (%)
Teste 1: 10/10	0,71	8,49
Teste 2: 10/20	0,49	7,64
Teste 3: 20/10	0,51	6,40
Teste 4: 20/20	0,11	5,59
Teste 5: 20/30	0,16	4,96
Teste 6: 30/20	0,00	4,32
Teste 7: 30/30	0,00	3,83

30/20, a taxa de sucesso atinge 100% com tempo computacional de 1,50 minutos. Não é demais lembrar que a metodologia implementada considera perdas ôhmicas e o critério “N-1”, o que implica em um número muito elevado de soluções de problemas de otimização linear. Sem dúvida, o método proposto apresenta alta precisão e eficiência computacional.

Na Tab. I são apresentados dois índices percentuais médios de desvio considerando os sete pares de parâmetros. O primeiro, $D_{1Melhor}$, fornece a diferença percentual média entre o melhor investimento encontrado em cada execução e o melhor investimento conhecido (\$681 milhões). O segundo, $D_{10Melhor}$, é análogo ao primeiro, mas considera as 10 melhores soluções de cada execução. O $D_{10Melhor}$ fornece uma medida, em termos médios, para a qualidade do conjunto das 10 melhores soluções de cada execução. Por exemplo, considerando o par 20/20 (Teste 4), o $D_{1Melhor}$ ficou atingiu 0,11%. Isto significa que a distância entre as soluções encontradas pela metodologia proposta e o melhor valor conhecido é, em média, 0,11%, em 100 execuções do algoritmo. Interpretação análoga é feita para o índice $D_{10Melhor}$. Portanto, em média, as 10 melhores soluções encontradas no Teste 4 (100 execuções) apresentaram investimento apenas 5,59% acima do melhor valor conhecido, atestando a boa qualidade do conjunto final de soluções.

O método proposto apresenta um excelente desempenho para o problema PET, não apenas em termos de taxa de sucesso (Fig. 1), mas também em relação à qualidade das melhores soluções (Tab. I). Este último aspecto é igualmente importante, pois oferece aos planejadores diferentes alternativas de expansão de boa qualidade.

A fim de ilustrar a construção de soluções via metodologia proposta, na Fig. 2 é apresentado um gráfico contendo a melhor solução encontrada em cada nível do processo construtivo, para a primeira execução realizada para o Teste 7 (combinação de parâmetros 30/30). No gráfico, a curva em azul representa o custo de investimento (em \$), o qual aumenta com a evolução do nível construtivo, como esperado. Para esta execução, o menor investimento (\$681 milhões, que corresponde ao menor valor conhecido para este sistema) é identificado já no décimo sexto nível construtivo. Dessa forma, de acordo com o critério de parada adotado ($n_{rep} = 5$), o processo é interrompido no vigésimo nível. Ainda no gráfico da Fig. 2, a curva em vermelho corresponde à soma entre os montantes de corte de carga e de eventuais sobrecargas referentes ao melhor plano de cada nível construtivo. Este valor fica nulo a partir do décimo sexto nível, quando surgem planos viáveis (CPCS não vazio). Finalmente, a curva em verde corresponde

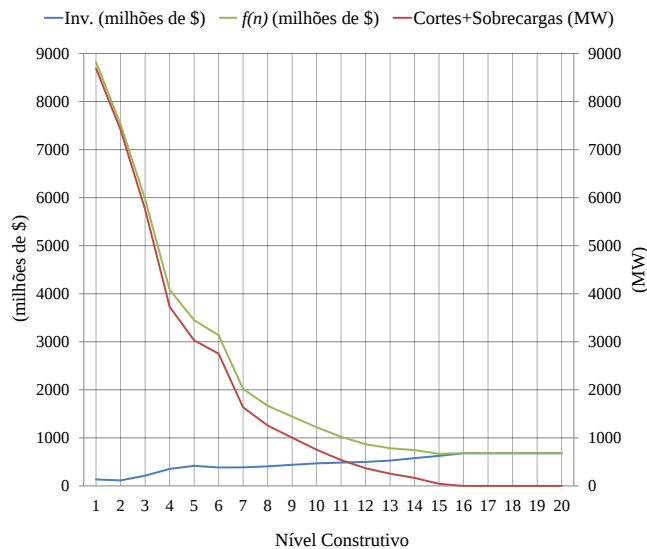


Figura 2. Evolução do Processo Construtivo – Execução 1/Teste 7.

ao valor de aptidão, $f(n)$, do melhor plano de expansão corrente. Como pode ser verificado, este valor decresce com a evolução do processo construtivo, até se igualar ao investimento no décimo sexto nível, com valor de \$681 milhões.

VI. CONCLUSÕES

Uma nova metodologia para solução do problema PET estático, baseada no modelo de fluxo DC com perdas, foi apresentada. O critério determinístico “N-1” é adotado durante todo o processo construtivo a fim de produzir soluções de mais baixo custo, quando comparadas àquelas encontradas por metodologias que aplicam restrições de segurança somente ao conjunto das melhores soluções obtidas. A metodologia proposta combina características de duas técnicas de otimização: algoritmos heurísticos construtivos e metaheurísticas evolucionárias. Um mecanismo de adição de reforços à rede de transmissão é proposto, tendo por base dois índices de atratividade. O primeiro índice está relacionado a um máximo carregamento hipotético para cada circuito candidato, na condição de rede intacta. Já o segundo índice leva em consideração as eventuais sobrecargas nos circuitos durante a análise de contingências. Outros três mecanismos, comumente encontrados em metaheurísticas evolucionárias (cruzamento, mutação e seleção) são utilizados pelo processo construtivo.

O sistema utilizado para testes apresenta um razoável grau de dificuldade, oferecendo um número significativo de opções de reforços (41 ramos candidatos) e necessitando de elevados investimentos (17 ou mais reforços). Os resultados obtidos são bastante promissores. A taxa de incidência do menor investimento e a qualidade do conjunto final de soluções, alcançados com tempos de processamento bastante reduzidos, confirmaram a eficiência e robustez da metodologia proposta. Por último, os resultados apresentados neste artigo, utilizando o sistema IEEE-RTS, correspondem aos testes iniciais da metodologia proposta. Atualmente, o processo construtivo está sendo revisto, recebendo aprimoramentos e novos mecanismos, visando sua aplicação em sistemas reais de grande porte.

REFERÊNCIAS

- [1] G. Latorre, R.D. Cruz, J.M. Areiza, A. Villegas, “Classification of publications and models on transmission expansion planning,” *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 18, no. 2, pp. 938-946, 2003.
- [2] R. Romero, C. Rocha, J.R.S. Mantovani, I.G. Sánchez, “Constructive heuristic algorithm for the DC model in network transmission expansion planning,” *IEEE-GTD*, vol. 152, no. 2, pp. 277-282, Mar. 2005.
- [3] A.M. Leite da Silva, L.S. Rezende, L.A.F. Manso, “Transmission expansion planning: A methodology to include security criteria and uncertainties using optimization techniques,” Chap. 6, *Innovations in Power Systems Reliability*, Springer, pp. 191-220, 2011.
- [4] I.J. Silva, M.J. Rider, R. Romero, A.V. Garcia, C.A. Murari, “Transmission network expansion planning with security constraints,” *IEEE Gen., Transm., Distrib.*, vol. 152, no. 6, pp. 828-836, Nov. 2005.
- [5] A. Seifu, S. Salon, G. List, “Optimization of transmission line planning including security constraints,” *IEEE Trans. on Power Syst.*, vol. 4, pp. 1507-1513, 1989.
- [6] O.B. Tor, A.N. Guven, M. Shahidehpour, “Congestion-driven transmission planning considering the impact of generator expansion,” *IEEE Trans. on Power Syst.*, vol. 23, no. 2, pp. 781-789, May 2008.
- [7] A.M. Leite da Silva, L.S. Rezende, L.A.F. Manso e G.J. Anders, “Transmission expansion planning: a discussion on reliability and N-1 security criteria,” 11th PMAPS, Singapore, pp. 14-17, June 2010.
- [8] A.M. Leite da Silva, L.S. Rezende, L.A.F. Manso, L.C. Resende, “Reliability worth applied to transmission expansion planning based on ant colony system,” *Int. Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 32, no. 10, pp. 1077-1084, Dec. 2010.
- [9] A.M. Leite da Silva, L.S. Rezende, L.M. Honório, L.A.F. Manso, “Performance comparison of meta-heuristics to solve the multi-stage transmission expansion planning problem,” *IET-GTD*, vol. 5, no. 3, pp. 360-367, 2011.
- [10] P.E. Abreu, L.A.F. Manso, L.C. Resende, A.M. Leite da Silva, C.E. Sacramento, “Planejamento da Expansão de Redes de Transmissão Considerando o Custo da Confiabilidade” XXI SNPTTE, Florianópolis, pp. 1-9, Oct. 2011.
- [11] L.A.F. Manso, P.E. Abreu, L.C. Resende, A.M. Leite da Silva, “Transmission expansion planning including unreliability costs,” 12th PMAPS, Istanbul, pp. 1-6, June 2012.
- [12] L.A.F. Manso, F.A. Assis, A.M. Leite da Silva, L.C. Resende e F.L. Santos, “Constructive heuristic algorithm for sub-transmission system planning,” 18th PSCC, Wroclaw, Poland, pp. 18-22, Aug. 2014.
- [13] S. Binato, G.C. Oliveira, J. L. Araújo, “A greedy randomized adaptive search procedure for transmission expansion planning,” *IEEE Trans. on Power Syst.*, vol. 16, no. 2, pp. 247-253, May 2001.
- [14] R. Fang, D.J. Hill, “A new strategy for transmission expansion in competitive electricity markets,” *IEEE Trans. on Power Syst.*, vol. 18, no. 1, pp. 374-380, Feb. 2003.
- [15] Reliability Test System Task Force of the IEEE Subcommittee on the Application of Probability Methods, “IEEE reliability test system,” *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. 1, pp. 2047-2054, 1979.
- [16] K. Sörensen, F. Glover, “Metaheuristics,” *Encyclopedia of Operations Research and Management Science*, New York: Springer US, pp. 960-970, 2013.
- [17] M. Randall, “A general framework for constructive meta-heuristics,” Chap. 7, *Operations Research/Management Science at Work*, New York: Springer Science & Business Media, pp. 111-128, 2002.
- [18] D.E. Goldberg. *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1989.