OTIMIZAÇÃO DO AGENDAMENTO DE INTERVENÇÕES EM REDES ELÉTRICAS

Rainer Zanghi
Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal Fluminense
Rua Passo da Pátria, 156 – Bloco D sala 509 - CEP 24210-240 - Niterói, RJ
rzanghi@id.uff.br

Julio Cesar Stacchini de Souza
Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal Fluminense
Rua Passo da Pátria, 156 – Bloco D sala 509 - CEP 24210-240 - Niterói, RJ
julio@ic.uff.br

Milton Brown Do Coutto Filho
Instituto de Computação, Universidade Federal Fluminense
Av. Gal. Milton Tavares de Souza, s/nº - CEP 24210-346 - Niterói, RJ
mbrown@ic.uff.br

RESUMO

Este trabalho apresenta uma metodologia para a obtenção de soluções adequadas ao problema do agendamento de intervenções em redes elétricas (AIRE). O AIRE é entendido como um problema de agendamento ótimo, que, diferentemente daqueles comumente encontrados na literatura, não permite avaliação do custo de cada recurso antes de sua alocação. Para sua solução utiliza-se um algoritmo evolutivo (AE). Algumas técnicas e estratégias são propostas para lidar com o alto custo da função de avaliação de cada solução, preservando-se a qualidade das soluções obtidas. Resultados de simulações com sistemas-teste são apresentados e discutidos.

PALAVARAS CHAVE. Otimização, Agendamento, Algoritmos Evolutivos, Operação de Sistemas Elétricos.
Área principal: EN - PO na Área de Energia

ABSTRACT

This work presents a methodology to provide adequate solutions to the network outages scheduling (NOS) problem. The NOS is understood as an optimal scheduling problem, different from others usually found in the associated literature because it does not allow evaluating the cost of each resource before its allocation. The solution is obtained by making use of an evolutionary algorithm (EA). Techniques and strategies are proposed to deal with the high cost of the evaluation function of each solution, preserving the quality of obtained solutions. Simulations results with test systems are presented.

KEYWORDS. Optimization, Scheduling, Evolutionary Algorithms, Power Systems Operation**.**
Main area: EN - PO na Área de Energia

https://proceedings.science/p/85496?lang=pt-br

1 Introdução

A operação de sistemas elétricos de potência apresenta desafios na conciliação de requisitos técnicos e um cenário econômico competitivo. Em sistemas interligados como o SIN (Sistema Interligado Nacional), o ONS (Operador Nacional do Sistema) precisa avaliar pedidos de intervenções para manutenção programada de equipamentos de diversos agentes, atendendo a requisitos técnicos de segurança operacional do sistema elétrico (ONS, 2011). O agendamento de intervenções em redes elétricas (AIRE) é um problema atual de planejamento operacional e carece de abordagens específicas para sua solução. Dando continuidade à pesquisa presente em Souza (2011) e Zanghi (2016), neste trabalho são apresentados resultados obtidos com uma meta-heurística evolutiva que propõe soluções para o AIRE, tomado como um problema de otimização. Técnicas que viabilizem a aplicação da metodologia proposta em sistemas de grande porte são utilizadas nos sistemas-teste IEEE de 14, 30, 57 e 118 barras e numa versão simplificada do SIN da região sul-sudeste, com 45 barras.

Diversas técnicas têm sido propostas na literatura para a programação de manutenção de equipamentos, em geral associadas à manutenção de unidades geradoras e baseadas em técnicas de otimização, tais como programação inteira (Abiri-Jahromi, 2012). Aplicações de meta-heurísticas como algoritmos genéticos (Wang, 2000) e enxame de partículas (Yare, 2010), também podem ser encontradas.

Em Abirami (2014) foi apresentada uma revisão bibliográfica sobre o tema do agendamento de manutenção em redes de energia elétrica, com diversas abordagens encontradas na literatura. Esse trabalho, considera o problema do agendamento da manutenção de forma integrada entre transmissão e geração, com foco no aspecto econômico, tendo como objetivo o custo de manutenção dos equipamentos envolvidos. Na formulação apresentada, não são consideradas restrições operacionais de tensão, sendo considerado apenas o limite de carregamento das linhas.

Nos casos da literatura citados, não há uma análise que considere apenas equipamentos de transmissão, objetivando minimizar os desvios dos horários propostos pelos agentes. Esta orientação ao agendamento de intervenções apenas das unidades geradoras demonstra que o uso de prerrogativas do operador do sistema, que permitem ao analista propor grandes desvios aos desligamentos programados de equipamentos de transmissão, colocou estas intervenções em segundo plano ou fora do escopo da otimização do agendamento. Apesar de tal estratégia simplificar o processo de agendamento, em geral não atende às expectativas dos agentes solicitantes. Este trabalho propõe uma metodologia sistemática que permite avaliar o menor desvio da programação proposta pelos agentes mantenedores de equipamentos de transmissão, colaborando assim com a programação das equipes de manutenção dos diversos agentes. Neste caso, a minimização do desvio da programação passa a ser o objetivo da otimização, enquanto a preservação da segurança operativa figura como restrição do problema.

De acordo com o ONS, as empresas usualmente submetem as solicitações quinze dias antes da data pretendida para o desligamento. Em ONS (2011) está estabelecido que tais solicitações devem ser recebidas no mínimo com 48 horas de antecedência. Estas informações colocam a presente análise dentre aquelas do horizonte do planejamento de curto prazo, o que demanda das metodologias empregadas custos computacionais compatíveis. A complexidade do problema de manutenção preditiva cresce significativamente quando a intervenção em equipamentos da rede elétrica é considerada, uma vez que desligamentos de equipamentos de transmissão são solicitados com maior frequência do que desligamentos de unidades geradoras. Além disso, o impacto causado na rede pela indisponibilidade de equipamentos de transmissão deve ser cuidadosamente estudado. A dificuldade do problema do AIRE e a importância de uma análise sistemática para a solução deste problema podem ser encontradas em Fu (2009).

Em Zanghi (2016) foram apresentadas técnicas que permitiram um melhor desempenho do AG aplicado ao problema do AIRE em Souza (2011). Os resultados obtidos em Zanghi (2016) sugerem uma continuidade na pesquisa, tanto na inclusão de outras análises, como na utilização de conhecimento sobre o problema no processo de otimização. Nas abordagens anteriores, o processo

https://proceedings.science/p/85496?lang=pt-br

de otimização é feito através de um algoritmo do tipo "caixa preta" que não leva em consideração o conhecimento do problema para intervir e direcionar o processo de busca. Além disso, para avaliar a redução de custo computacional e permitir uma maior capacidade de generalização do uso da metodologia, sistemas maiores precisam ser estudados. No presente trabalho são apresentadas técnicas aplicadas a um Algoritmo Evolutivo (AE) utilizado como ferramenta de busca no processo de otimização. A função aptidão utilizada por este AE para avaliar as soluções é composta por uma soma ponderada dos termos associados aos somatórios de todas as violações das restrições de (2) a (6). Um termo associado aos desvios descritos em (1) também é incluído na formulação desta função, que deverá possuir o menor valor possível. O alto custo computacional da função de avaliação e a necessidade de diversificação no processo de busca para obtenção de boas soluções são abordados pelas técnicas descritas neste trabalho.

2 Agendamento de Intervenções em Redes Elétricas

Em sistemas que operam interligados, diversos agentes programam desligamentos para manutenção de seus equipamentos e encaminham requisições de tais intervenções ao operador do sistema. Cabe então a este a tarefa de conciliar todas as requisições solicitadas, de modo a que seja mantida a operação segura do sistema. Diferentes restrições operativas devem ser avaliadas de modo a levar a uma programação que atenda, da melhor forma possível, as requisições dos agentes.

Atualmente, executa-se esta tarefa através de aplicativos que calculam o fluxo de potência por todo o sistema, considerando cada cenário em que estejam incluídas as intervenções nos equipamentos de um agendamento específico. Cabe ao analista simular e verificar individual e manualmente cada cenário de intervenções simultâneas, analisando possíveis ocorrências de violações de cada elemento do sistema e propondo novos agendamentos. Estas por sua vez deverão ter seus cenários de intervenções simultâneas testados, em um ciclo contínuo, até que um agendamento sem violações seja encontrado. Usualmente, devido à complexidade e custo associado à implementação desta tarefa, os agendamentos são estabelecidos em horários de baixa demanda energética e sem simultaneidade, imputando aos agentes uma adequação dos horários pretendidos ao novo agendamento estabelecido. Nos casos em que a simultaneidade torna-se mandatória, o recurso de redespacho de potência é utilizado para minimizar e eliminar as violações dos limites operacionais dos equipamentos. Conforme estabelecido em ONS (2011), intervenções que impliquem em restrições de despacho de usinas em relação à programação sem restrições elétricas deverão ser programadas para dias e horários em que seja minimizado o afastamento em relação às metas energéticas. Caso, na solicitação original, essa condição não seja atendida, cabe ao ONS propor ao Agente períodos alternativos para a realização do serviço.

A presença de equipamentos de disponibilidade crítica ou mais sensíveis a alterações das condições operacionais de funcionamento do sistema elétrico interligado suscita verificações de estados de contingência, nos quais testa-se o sistema quanto ao desligamento fortuito destes equipamentos em cada cenário do agendamento. Desta forma, o analista pode prever o impacto operacional destas atuações imprevistas, caso ocorram dentro do período programado para cada intervenção.

O operador deverá ainda verificar a inviabilidade de determinados agendamentos tendo como base os valores de fluxo de potência no sistema e considerando as capacidades de geração e transmissão de energia dos equipamentos interligados. Estes agendamentos inviáveis devem ser descartados e as intervenções simultâneas que ocasionam estes cenários devem ser programadas em horários distintos, considerando a prioridade de cada intervenção.

Assim sendo, trata-se o AIRE como um problema de otimização com restrições, em que se objetiva um agendamento otimizado, a fim de se minimizar os desvios dos horários requisitados pelos agentes, submetidos às restrições operativas e de segurança do sistema. As funções para o processo de otimização estão descritas de (1) a (6), representando o objetivo a ser alcançado, com as restrições operativas estabelecidas.

https://proceedings.science/p/85496?lang=pt-br

$$\min\left(\frac{1}{n}\times\sum_{o=1}^{n}\left(\Delta h(o)\times P_{pri}(o)\right)\right) \quad (1)$$

$$g_k(\theta, V) = 0 \quad (2)$$

$$V_{ik}^{HI} - V_{ik} \geq 0 \quad (3)$$

$$V_{ik} - V_{ik}^{LO} \geq 0 \quad (4)$$

$$\left|S_{jk}^{nom}\right| - \left|S_{jk}\right| \geq 0 \quad (5)$$

$$\left|S_{jk}^{emerg}\right| - \left|S_{jk}\right| \geq 0 \quad (6)$$

$$i = 1,..., nb;\ j = 1,..., nr;\ k = 1,..., na;$$

A equação (1) representa o objetivo a ser minimizado, onde *Δh(o)* é o desvio (horas) da *o*-ésima intervenção de um dado agendamento, em relação ao correspondente horário na programação requisitada; $P_{pri}(o)$ é a prioridade atribuída à *o-ésima* intervenção. O problema é formulado como mono objetivo, onde se deseja minimizar os desvios ocasionados por uma possível alteração dos horários iniciais propostos pelos agentes para avaliação do operador do sistema elétrico de potência. A função objetivo do AIRE representa a relação entre os valores encontrados para as variáveis x_i do problema (horários das intervenções) e aqueles fornecidos como valores de referência. Estes valores de referência são os horários propostos ao operador do sistema elétrico pelos agentes mantenedores de cada equipamento associado à intervenção. Na função objetivo, como critério de mediação entre os diversos agentes, foi adotada a média aritmética dos desvios entre os horários da solução e aqueles propostos como referência. Cada intervenção é ponderada pela sua prioridade, determinada por critérios operacionais. Esta abordagem permite penalizar mais os desvios ocorridos em equipamentos de maior prioridade.

O AIRE apresenta restrições diretas e funcionais (Izmailov, 2012). A restrição direta é imposta de maneira rígida a todas as variáveis x_i do problema e consiste na determinação do conjunto de valores viáveis para estas variáveis. Dessa forma, o problema de agendamento é restrito a uma janela de tempo $0 \leq x_i \leq m - 1$ onde todas as intervenções deverão ser agendadas. Na metodologia apresentada neste trabalho, o método utilizado para otimização do AIRE deve admitir apenas valores dentro da janela de tempo para os horários iniciais das intervenções. Esta janela de tempo é determinada de maneira arbitrária e está ligada a uma dimensão econômica e regulatória do problema. Restringir de forma rígida estas variáveis permite limitar o máximo desvio admitido entre o horário proposto pelo agente mantenedor e aquele obtido pelo processo de otimização.

As restrições funcionais representam as violações de condições operacionais do sistema elétrico em análise. Estas restrições têm caráter informativo e permitem avaliar os cenários que apresentam condições que podem comprometer a segurança de funcionamento do sistema. Os limites para as violações podem ser determinados pelo operador do sistema elétrico em análise e representam um aspecto ligado à confiabilidade e à segurança de sua operação. A restrição (2) representa as equações de balanço de potência ativa e reativa em cada nó da rede, para cada um dos *na* cenários a analisar, representados por topologia da rede e demanda específicas. Os limites operativos são analisados através das restrições de (3) a (6), em que para cada cenário *k*, as tensões *V* das *nb* barras do sistema não podem ultrapassar o limite superior V^{HI} e inferior V^{LO}; os fluxos de potência aparente *S* dos *nr* ramos não podem ser maiores que o limite de emergência S^{emerg} ou nominal S^{nom}. A capacidade de atender a contingências simples também é considerada, através das

https://proceedings.science/p/85496?lang=pt-br

restrições de (3) a (6), e também no caso de um desligamento fortuito de equipamento que faça parte de uma lista de contingências.

Para o problema do agendamento em pauta, foram escolhidos os horários iniciais de cada intervenção como as variáveis de análise do problema. Estas são mapeadas diretamente como variáveis no processo de otimização. Sob o ponto de vista de modelagem do problema, a escolha dos horários iniciais das intervenções como variáveis do problema reside na relação causal entre estes horários e as condições operacionais do sistema elétrico. Esta relação é evidenciada pela variação de demanda com a hora do dia, e pela mudança na topologia da rede proporcionada pela desconexão do equipamento associado à intervenção. Este desligamento, e a possível combinação desta desconexão com outras ocorrendo no mesmo horário, produz efeito nas condições operacionais da rede elétrica em todos os equipamentos conectados. O conjunto destas condições operacionais (i.e. intervenções em curso e perfil de demanda) constituem um cenário. Um agendamento possui um ou mais cenários.

Vale ressaltar que esta relação causal entre variáveis e condições operacionais, embora identificável e mensurável, se constitui de forma epistática e complexa. O cômputo necessário à avaliação desta relação para cada agendamento, se dá em três etapas: **identificação dos cenários** – a partir das variáveis do problema (horários iniciais de cada intervenção) são identificados todos os cenários que descrevem os dados do sistema durante o período da programação de agendamentos; **análise dos cenários** – os dados de cada cenário são utilizados para obtenção dos estados associados do sistema (através de algoritmo de cálculo do fluxo de potência) e para análise dinâmica do sistema entre estados, quando conveniente; **avaliação das violações** – os limites pré-estabelecidos para as condições operacionais do sistema são comparados com os valores obtidos nas análises realizadas no item anterior para cada cenário. Limites violados representam o não atendimento às restrições funcionais impostas ao problema de otimização.

Pela análise das etapas descritas, nota-se que o procedimento necessário para relacionar as variáveis de entrada do problema com as condições operacionais não é trivialmente formalizado através de funções. Assim, a modelagem do AIRE como problema de otimização é apresentada de maneira qualitativa e as restrições funcionais não são expressas como funções das variáveis do problema, como é possível verificar usualmente na literatura de otimização (Izmailov, 2012). Pela dificuldade na descrição destas funções, adota-se apenas a comparação dos valores obtidos no cômputo com os limites pré-estabelecidos.

3 Técnicas de Solução

Problemas de agendamento ("*scheduling*") são o escopo de uma vasta literatura na área da Pesquisa Operacional (Pinedo, 2012). Nestes problemas, em sua concepção usual, busca-se preparar uma programação onde uma função custo total seja minimizada, podendo esta ser composta pelos custos associados à alocação de cada recurso agendado.

No problema do AIRE, os equipamentos a serem desconectados podem ser considerados como os recursos de um problema clássico de agendamento e seu custo representado pelas violações às condições operacionais e desvios da programação proposta. No entanto, de maneira distinta dos problemas clássicos de agendamento abordados na literatura (Pinedo, 2012), os recursos alocados no agendamento de intervenções possuem custo dependente dos demais recursos presentes no mesmo intervalo de tempo. Este custo é calculado através de um algoritmo cujo custo computacional aumenta com o tamanho do sistema.

No AIRE, a duração de cada intervenção é determinada pelo agente responsável pelo equipamento que avalia o tempo necessário para executar as tarefas associadas ao desligamento. A programação do agendamento é composta pelos horários iniciais de cada uma das intervenções requisitadas, dentro da janela de tempo escolhida pelo operador para atendimento dos pedidos. Na Figura 1, é possível verificar um exemplo de agendamento de 5 intervenções em diferentes equipamentos, em um período de 30 horas. Cada linha do diagrama corresponde a um desligamento requisitado, com seu horário inicial e duração propostos pelos agentes.

Em um sistema interligado, onde diversos agentes são responsáveis pela manutenção de diferentes equipamentos, a avaliação de um pedido de desligamento deve considerar a influência

https://proceedings.science/p/85496?lang=pt-br

de outras intervenções agendadas para o mesmo período. Além disso, as condições operacionais do sistema elétrico se modificam com o tempo, notadamente em situações onde há alteração de topologia (desligamento de equipamentos) ou ainda sob diferentes perfis de consumo e geração de energia elétrica. A fim de sistematizar a análise do operador, neste trabalho, cada programação de desligamentos avaliada é segmentada em um conjunto de cenários. Cada cenário corresponde a um conjunto de características operacionais únicas no agendamento analisado. O início e o fim de cada cenário são determinados pela variação, no tempo, em pelo menos uma das características operacionais. Estas características são topologia (quais equipamentos estão conectados e como estão conectados) e demanda (perfil de consumo e geração de energia elétrica).

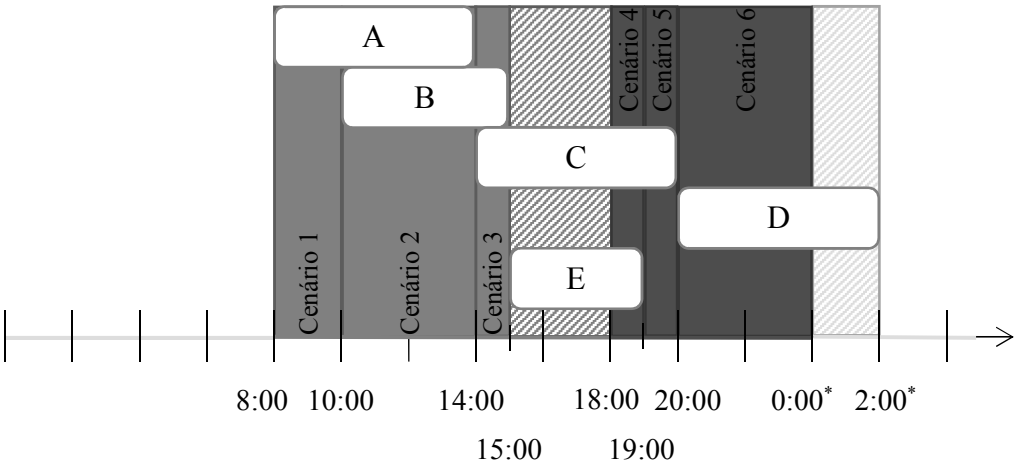


Figura 1. Agendamento de 5 intervenções em 3 perfis de demanda gerando 6 cenários

A topologia de cada cenário é determinada pelos desligamentos que estão em curso e por outros equipamentos que podem ser adicionados individualmente para uma análise de contingência. Este procedimento visa avaliar a robustez do cenário frente a eventos fortuitos, com desligamentos em equipamentos não previstos ou programados pelo operador.

O perfil de demanda é definido a partir de valores típicos de consumo e geração atribuídos pelo operador a diferentes horários, em um período de 24h. Neste trabalho, foram adotados 3 perfis de carregamento com os mesmos períodos de demanda leve, média e pesada definidos em Souza (2011). O período de demanda leve adotado vai de 0h até 8h, o de demanda média vai de 8h até 18h e o de demanda pesada vai de 18h até 0h do dia seguinte. Uma simplificação, utilizada neste trabalho para reduzir o esforço da análise, é a fusão de dois ou mais cenários, com a mesma topologia e diferentes perfis de demanda, em um único cenário. Este novo cenário será composto pelo perfil de demanda mais severo dentre aqueles presentes nos cenários originais e pela mesma topologia. Desta forma, os cenários com a mesma topologia de outros existentes, porém com demanda menos intensa, são descartados da análise. Para o agendamento mostrado na Figura 1, considerando os períodos de 3 perfis de carregamento, e excluindo-se cenários com mesma topologia e demanda menos intensa, é obtido um conjunto de 6 cenários únicos. Vale ressaltar que, no procedimento de simplificação dos cenários de mesma topologia e com demandas distintas, o cenário entre 15:00 e 18:00, com a mesma topologia que o cenário 4 e com demanda mais leve, foi removido. O mesmo critério foi adotado na escolha do cenário 6 e no descarte do cenário, de mesma topologia e de demanda mais leve, entre às 00:00 e 02:00 do dia seguinte ao início da janela de tempo de análise.

Para obter o número total de cenários em um agendamento, deve-se ainda considerar o número de equipamentos que serão desconectados, individualmente em cada cenário, para a análise de contingência. Para o exemplo da Figura 1 e considerando uma lista com 3 equipamentos em contingência, teremos um total de 18 cenários únicos no agendamento. Na presença de uma lista de contingências, os cenários sem contingências passam a não ser analisados e serão substituídos por cenários onde os equipamentos da lista são incluídos individualmente no conjunto de

https://proceedings.science/p/85496?lang=pt-br

equipamentos desligados. Esta estratégia visa reduzir o número de cenários avaliados e considera que o atendimento ao cenário que inclui o desligamento do equipamento em contingência é condição suficiente para o atendimento ao cenário análogo sem a contingência.

Definidos todos os cenários que representam um agendamento, serão executadas análises para cada um destes cenários, a fim de avaliar a solução proposta para o problema. A análise estática, através da verificação de limites de tensão nas barras e de fluxo de potência ativa nos ramos, bem como da identificação do atendimento à demanda, utiliza um algoritmo de fluxo de potência como ferramenta de avaliação. Neste algoritmo, os elementos da lista de equipamentos em contingência são considerados já desligados, simulando a situação após o evento que originou seu desligamento fortuito.

O algoritmo de fluxo de potência utilizado na análise estática é um algoritmo com complexidade computacional polinomial ($O(v^2 + v)$ para o método iterativo de resolução de equações não lineares via método de Newton, utilizando eliminação de Gauss) considerando um número v de variáveis proporcional ao número de barras do sistema. Para efetuar a análise de um agendamento, é necessário executar este algoritmo para todos os cenários que representam o agendamento analisado. Em sistemas elétricos com um número elevado de barras, a tarefa de avaliar um único agendamento, com diversos cenários, demanda um custo computacional considerável. Para o problema do agendamento ótimo, se torna inviável enumerar e computar todos os agendamentos possíveis a fim de obter um ótimo global. Deve-se então utilizar abordagens encontradas em problemas de Otimização Custosa ("*Expensive Optimization"*) que visam reduzir o custo computacional do processo de otimização. A característica combinatória do problema, as relações entre os elementos da programação e consequente complexidade do espaço de busca, aliada ao alto custo computacional do algoritmo de avaliação das soluções, incentiva a utilização de métodos não-exatos para resolução deste problema.

4 Técnicas aplicadas ao AE

Neste trabalho são apresentadas técnicas computacionais que lidam com a relação de compromisso entre custo computacional da função de aptidão e a qualidade das soluções encontradas pelo processo evolutivo do AE utilizado na otimização do AIRE.

4.1 Tabela de violações por cenário

O alto custo computacional associado ao problema do AIRE reside nas repetidas avaliações da já custosa função de aptidão durante o processo evolutivo do AE. A avaliação da aptidão de uma solução requer a identificação e análise de diversos cenários operativos. O número total de cenários diferentes que podem ser encontrados no processo evolutivo é calculado por:

$$scen = load \times ctg \times (2^{out} - 1) \qquad (7)$$

onde: *load* representa o número de perfis de carregamento distintos, considerando a janela de tempo na qual as intervenções são agendadas; *ctg* é o número de contingências listadas; *out* é o número de intervenções que serão agendadas.

É possível verificar em (7) que *scen* é mais afetado pelo número de intervenções que precisam ser agendadas, e este número usualmente não é alto para uma dada janela de tempo. Desta forma, é razoável avaliar todos os cenários operativos somente uma vez, reduzindo o esforço computacional que seria empregado para avaliações sucessivas do mesmo cenário. Esta estratégia é adotada neste trabalho e, sempre que um novo cenário é avaliado, as violações das restrições do problema são computadas e armazenadas em uma estrutura de dados eficiente (tabela de dispersão com acesso direto) que associa cada cenário com as correspondentes violações (caso existam). Assim, caso este cenário seja visitado novamente na avaliação da aptidão de um indivíduo do AE, não é necessário executar o algoritmo de fluxo de potência novamente. Neste caso, os valores das violações previamente armazenados para aquele cenário são lidos da tabela para o cálculo da aptidão da solução. Vale ressaltar que todas as avaliações das funções de aptidão podem ser executadas de forma paralela distribuindo o cálculo das violações de cada cenário em uma unidade de processamento distinta.

https://proceedings.science/p/85496?lang=pt-br

4.2 Repopulação com Conjunto Elite

A estratégia RCE apresentada em Zanghi (2016), promove uma reinicialização do processo evolutivo após *g* gerações, preservando um grupo de indivíduos da última população, chamado conjunto elite, e populando as demais posições com novos indivíduos. Desta forma, esta estratégia pretende produzir inovação baseado nas interações entre um conjunto elite migrado e uma população com novos indivíduos. Estas interações são representadas por operadores genéticos como seleção e cruzamento, complementados pela mutação. De modo a gerar inovação com boa qualidade a partir das interações entre estes dois grupos de indivíduos, a estratégia RCE almeja produzir um conjunto elite que tem indivíduos com um genótipo diversificado e boa qualidade, esta medida pelas respectivas aptidões. Este processo é realizado em duas etapas, iniciando com uma seleção dos melhores indivíduos quanto à sua aptidão e terminando com uma filtragem, aplicada a estas soluções, que remove do conjunto elite indivíduos com genótipos muito semelhantes.

No presente trabalho, o parâmetro *g* que define o número de gerações do ciclo geracional entre cada repopulação é determinado automaticamente por um critério adaptativo durante a execução do algoritmo. Este critério é apresentado na seção 4.3.

Vale ressaltar que dentro de um ciclo geracional, as populações das demais gerações são compostas pelo indivíduo elite e pelos indivíduos gerados pelos operadores de seleção, cruzamento e mutação. A estratégia de elitismo associado à reinicialização da população só será aplicada após *g* gerações. Nesta implementação, o tamanho da população é mantido constante durante todo o processo evolutivo e o indivíduo elite da última geração é a solução obtida pelo AE.

4.3 Critério de Unicidade

Em Reeves (2010) é mencionado que uma medida da diversidade da população é comumente utilizada como um critério de parada para AEs. Métricas de diversidade baseadas nos genótipos de cada solução são as mais usuais. Um estudo teórico sobre o papel da diversidade em AEs pode ser encontrado em Gouvêa (2015). Como ressaltado nos dois trabalhos, métodos baseados em limites que usam estatísticas relacionadas à diversificação em genótipos ou valores de aptidão são promissores na tarefa de guiar a otimização de funções multimodais em um AE.

No presente trabalho, o critério de unicidade adotado é baseado na detecção de inovação na população. Indivíduos que apresentem valores únicos de aptidão são considerados novos. A ideia subjacente consiste em tomar ações que promovam diversificação ou intensificação no processo evolutivo, sempre que uma estatística que quantifica inovação, aqui chamada de unicidade, fica abaixo de um limite u_t. No presente trabalho, uma heurística, que representa o conhecimento sobre o problema introduzido no processo de busca, foi utilizada para a escolha deste limite. A partir da aplicação da técnica da tabela de violações por cenário descrita na seção 4.1, foi possível calcular o percentual de cenários com violações, dentre todos os possíveis para uma dada instância de teste. O percentual de cenários com violações foi adotado como limite u_t para a instância de teste. Na hipótese presente nesta heurística, a dificuldade do AE encontrar indivíduos com todos os cenários sem violações deve aumentar a exigência em manter um alto nível de diversidade. Desta forma, instâncias com um alto percentual de cenários com violações, exigem que um nível alto de indivíduos únicos esteja sempre presente para fomentar a diversificação na população.

Para quantificar a métrica de unicidade, o número de indivíduos com aptidão inédita gerados pelo AE, acumulado em um contador de unicidade u_c, é dividido pelo número total de indivíduos (tot_{ind}) criados no processo evolutivo, até aquele ponto. O critério de parada por unicidade é definido como:

$$\frac{u_c}{tot_{ind}} \leq u_t \tag{8}$$

Por utilizar a cardinalidade do conjunto de soluções únicas, a métrica de unicidade em (8) é resistente a problemas de escalonamento, usualmente presentes quando são empregadas estatísticas (e.g. média) computadas sobre os valores de aptidão dos indivíduos. Por não representar

https://proceedings.science/p/85496?lang=pt-br

um critério de convergência sobre os valores de aptidão ou das variáveis do genótipo, esta métrica não é negativamente afetada por técnicas que promovem diversificação. Não existe dependência explícita entre o valor de aptidão e o número de indivíduos com valores de aptidão distintos dos demais em um dado grupo. A métrica de unicidade representa numericamente a diversificação de um processo evolutivo e apresenta uma informação de desempenho importante, que pode ser utilizada como um critério de decisão para harmonizar diversificação e intensificação. As fontes possíveis de novos indivíduos são o grupo gerado utilizando a estratégia de RCE e aqueles indivíduos que resultam dos operadores genéticos (cruzamento e mutação).

O critério de unicidade adotado neste trabalho é empregado para calibrar automaticamente o número de repopulações da técnica de RCE. O objetivo é ganhar em eficiência computacional através da redução do número de repopulações, enquanto um alto nível de diversificação no processo evolutivo é mantido. Esta abordagem não necessita que um número máximo de gerações seja determinado e o número de gerações em cada ciclo de repopulação é determinado automaticamente. Sempre que o nível de diversificação do processo evolutivo fica abaixo de um limite para o critério de unicidade, um novo ciclo de repopulação é ativado. Dessa forma, o número de gerações em cada ciclo geracional não é fixo, passando a depender do critério de unicidade mostrado em (8). Como resultado, o número total de gerações no processo evolutivo tende a diminuir quando comparado com situações onde este critério não é empregado. Para garantir a redução do número de gerações total, foi adotado o seguinte procedimento na utilização do critério de unicidade sobre a estratégia RCE, dados um critério de parada que limita um número de gerações máximo *maxgen* e um limite u_t para o critério de unicidade: o primeiro ciclo geracional do RCE é iniciado atribuindo *maxgen* à *g*; a cada geração, o critério de unicidade é avaliado e se a razão entre o número de indivíduos únicos e o número total de indivíduos encontrados até aquela geração (8) for menor que o limite u_t, o ciclo geracional é interrompido e uma RCE é executada; os ciclos geracionais subsequentes serão interrompidos utilizando o mesmo critério de unicidade e o número de repopulações que serão executadas até a parada do AE (*maxrun*) é determinado por:

$$maxrun = \frac{maxgen}{g_1} \tag{9}$$

Onde g_1 corresponde à geração do primeiro ciclo geracional onde o limite de unicidade foi alcançado.

A hipótese subjacente à utilização de g_1 para determinar um novo critério de parada que promova uma redução do número total de gerações utiliza a previsão que os ciclos geracionais subsequentes terão no máximo g_1 gerações. Esta previsão se apoia na redução observada do valor da razão presente em (8) a cada nova geração do processo evolutivo do AE. Desta forma, mesmo com o fluxo de novos indivíduos promovido pela RCE, a cada geração dentro de um ciclo geracional, a população tenderá a convergir e o número de indivíduos já visitados anteriormente aumentará, fazendo com que o contador de unicidade u_c cresça em uma taxa menor que o número total de indivíduos (tot_{ind}), reduzindo cada vez mais o valor da razão presente em (8).

5 Resultados

Nesta seção são apresentados resultados que ilustram simulações realizadas aplicando a metodologia apresentada em uma biblioteca de instâncias de teste que utiliza os sistemas IEEE 14, 30, 57 e 118 barras e o SIN 45 barras, todos descritos em Zanghi (2016). Três perfis de carregamento foram considerados para cada instância de teste. Dez solicitações de intervenções foram incluídas em cada agendamento para os sistemas IEEE 30, 57, 118 barras e SIN45, enquanto que 5 intervenções foram consideradas nos testes com o sistema IEEE 14 barras. Além disso, cada sistema deveria suportar a ocorrência de uma lista de três contingências simples. Para o agendamento das intervenções, foi assumido que deveriam ser iniciados em uma janela de tempo de 32 horas. Os parâmetros do AE e fatores de penalidade usado como pesos nos termos da função de aptidão foram os mesmos utilizados em Zanghi (2016).

Nos resultados apresentados, para avaliar a qualidade da solução encontrada são mostrados os valores de aptidão mínima (i.e., as melhores soluções encontradas), média e seu desvio padrão

https://proceedings.science/p/85496?lang=pt-br

para 100 execuções do AE. Para a eficiência computacional é apresentada a média do tempo computacional de uma execução completa do AE.

A fim de indicar, de forma escalável para sistemas de grande porte, o efeito proporcionado pela tabela de violações por cenário na redução do número de avaliações da função aptidão, foram feitas simulações com as 5 instâncias de teste utilizando o AE e a estratégia RCE com um número fixo (10) de gerações para cada uma das (70) repopulações. Na Tabela 1, são mostrados os resultados destas simulações através da média de cenários visitados e da média de cenários diferentes visitados durante o processo evolutivo de 100 execuções do AE, para cada instância de teste. Como referência, são incluídos na mesma tabela os números de cenários possíveis para cada instância.

Tabela 1. Cenários possíveis e visitados durante o processo evolutivo

Instância de Teste	Média de cenários visitados	Média de cenários diferentes visitados	Número de cenários possíveis
IEEE14	1.526.156	279	279
IEEE30	2.770.696	7518	9207
IEEE57	2.838.707	6835	9207
IEEE118	2.671.497	7423	9207
SIN45	2.738.890	6198	9207

Os resultados da Tabela 1 mostram que a quantidade de cenários visitados no processo evolutivo do AE utilizado nas simulações tem de 3 a 4 ordens de grandeza a mais que o número de cenários possíveis. Esta relação justifica o uso da técnica de tabela de violações por cenário como estratégia de não-repetição dos cenários. Este resultado mostra que é possível obter uma redução significativa no custo computacional com a aplicação desta estratégia, tendo em vista que o AIRE é um problema onde o custo da avaliação de apenas uma solução pode possuir muitas ordens de grandeza a mais que o custo do processo de otimização. Esta redução se torna ainda mais expressiva quando o custo associado à avaliação de cada cenário é maior, o que acontece quando o sistema em análise é de grande porte.

Para ilustrar o efeito na eficiência computacional da aplicação do critério de unicidade para regular automaticamente o número de gerações e repopulações na estratégia de RCE, foram feitas simulações sem o uso da tabela de aptidão por cenários. O objetivo da retirada desta técnica é ilustrar de maneira mais marcante as diferenças na eficiência computacional quando da aplicação de diferentes técnicas. Sem a aplicação desta técnica, todos os cenários são avaliados pela função aptidão, inclusive os já visitados anteriormente. Os resultados dessas simulações podem ser vistos na Tabela 2. Também foram incluídas nesta tabela as médias dos cenários visitados durante o processo evolutivo, para as 100 execuções do AE sem utilizar a RCE, com 700 gerações.

Com os resultados apresentados na Tabela 2, é possível verificar mais acentuadamente a redução do esforço computacional proporcionada pela técnica de ajuste automático da RCE através do critério de unicidade em comparação com os casos onde a RCE não é utilizada. Esta redução também pode ser verificada na média do número de cenários por execução. É interessante notar a forte influência da avaliação de cenários no tempo computacional total, em todos os resultados apresentados na Tabela 2, onde não é utilizada a técnica de não repetição da avaliação de cenários proporcionada pela tabela de violações por cenário. Em três das cinco instâncias de teste, ocorreu uma pequena redução de qualidade, identificada apenas na aptidão média. Em duas das instâncias (i.e. IEEE118 e SIN45), as médias de aptidão foram melhoradas pelo uso do critério de unicidade, parametrizada automaticamente pelo percentual de cenários com violações. É interessante notar que, mesmo valorizando a diversificação, a estratégia conseguiu uma redução expressiva no tempo computacional através da redução do número total de gerações. Os resultados demonstram uma

https://proceedings.science/p/85496?lang=pt-br

boa relação de compromisso entre qualidade e custo computacional com o uso do critério de unicidade para regular automaticamente a RCE.

Tabela 2. Efeito do critério de unicidade para RCE na eficiência computacional

Instância de teste	RCE	Critério de unicidade	Mínima	Aptidão Média	σ	Tempo médio (s)	Média de cenários visitados
IEEE14	Não	Não	2,600	2,622	0,110	21	1.396.351
	Sim	29,39%	2,600	2,644	0,135	5	232.275
IEEE30	Não	Não	1,300	1,372	0,134	80	2.281.651
	Sim	36,46%	1,300	1,405	0,151	30	761278
IEEE57	Não	Não	3,500	4,605	1,386	677	2.453.095
	Sim	55,00%	3,500	4,869	1,567	192	660.140
IEEE118	Não	Não	6,200	8,871	4,038	4525	2.199.082
	Sim	63,64%	6,200	8,834	4,043	1389	644.422
SIN45	Não	Não	4,900	6,572	2,078	568	2.334.217
	Sim	85,60%	4,900	6,464	1,665	238	885.448

As soluções encontradas com a aplicação das técnicas apresentam um agendamento capaz de eliminar todas as violações das restrições de (2) a (6). A fim de ilustrar um agendamento encontrado pelo processo de busca, os desvios nos horários iniciais das intervenções requisitadas, necessários para a eliminação das violações na instância de teste do SIN 45 barras, podem ser vistos no diagrama de tempo da Figura 2. Neste diagrama podem ser vistos o agendamento requisitado e aquele otimizado, obtido com a aplicação da metodologia apresentada neste trabalho. Nota-se que, no agendamento otimizado, intervenções (ramos 7-39, 4-45 e 5-7), originalmente no período de perfil de demanda pesada, são reagendadas para horários em perfis de demanda leve e média. Outras intervenções (ramos 43-44 e 4-33) são defasadas do período com perfil de demanda média para aquele de demanda leve.

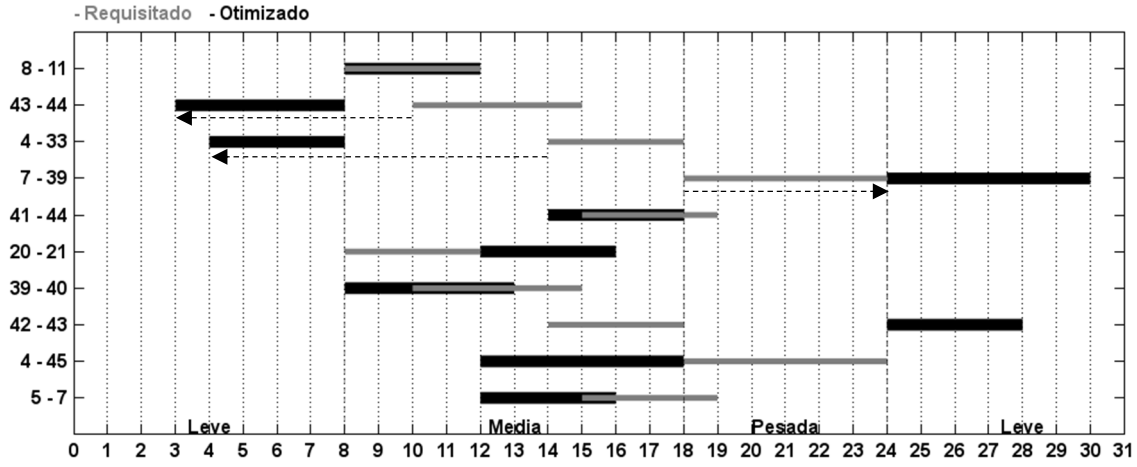


Figura 2 - Diagrama de tempo para agendamento de intervenções nos horários requisitados e obtido com otimização para o SIN 45 barras

6 Conclusões

Neste trabalho são apresentados aspectos computacionais do agendamento de intervenções em redes de energia elétrica e técnicas para sua solução como um problema de agendamento ótimo com restrições. O AIRE é aqui apresentado como um problema da Otimização Custosa, com alto custo computacional associado à avaliação de sua solução. Foram apresentadas técnicas de redução deste custo aplicadas a um AE empregado como ferramenta de otimização. A partir da divisão de cada solução em um número reduzido de cenários possíveis, uma técnica de não-recálculo da

https://proceedings.science/p/85496?lang=pt-br

avaliação das violações, presentes ou não, em cada cenário do agendamento foi apresentada. Buscando uma relação de compromisso entre custo computacional e qualidade, foi introduzida uma técnica de repopulação com conjunto elite configurada automaticamente por um critério de unicidade da aptidão das soluções. Através dos resultados obtidos em simulações realizadas com 5 diferentes sistemas elétricos de potência, foi possível verificar o efeito das técnicas na redução do custo computacional e na qualidade das soluções encontradas.

Referências

ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) (2009). Procedimentos de Rede, Submódulo 6.5, rev 2.0, "Programação de Intervenções em Instalações da Rede de Operação", Rio de Janeiro: ONS.

Souza, J.C.S.; Do Coutto Filho, M.B.; Roberto, M.L.R. (2011). A Genetic-Based Methodology for Evaluating Requested Outages of Power Network Elements. IEEE Trans. on PWRS, vol.26, pp.2242-2249.

Abiri-Jahromi, A.; Fotuhi-Firuzabad, M.; Parvania, M. (2012). Optimized midterm preventive maintenance outage scheduling of thermal generating units, IEEE Trans. on PWRS, vol.27, no.3, pp.1354-1365.

Wang, Y. and Handschin, E. (2000). A new genetic algorithm for unit maintenance scheduling of power systems, Elect. Power & Energy Syst., vol.22, no.5, pp.343-348.

Yare, Y. and Venayagamoorthy, G.K. (2010). Optimal maintenance scheduling of generators using multiple swarms-MDPSO framework, Eng. Applic. of Artific. Intellig., vol.23, no.6, pp.895-910.

Abirami, M.; Ganesan, S.; Subramanian, S.; Anandhakumar, R. (2014). Source and transmission line maintenance outage scheduling in a power system using teaching learning based optimization algorithm, Applied Soft Computing, Elsevier, vol.21, pp.72-83.

Fu, Y.; Li, Z.; Shahidehpour, M.; Zheng, T. and Litvinov, E. (2009). Coordination of midterm outage scheduling with short-term security-constrained unit commitment, IEEE Trans. on PWRS, vol.24, no.4, pp.1818-1830.

Zanghi, R. (2016). Meta-heurísticas aplicadas ao Agendamento de Intervenções em Redes Elétricas. Tese de Doutorado, Instituto de Computação, Universidade Federal Fluminense, [pdf]. Disponível em http://www2.ic.uff.br/PosGraduacao/Teses/741.pdf.

Izmailov, A. and Solodov, M.V. (2012). Otimização vol.2 – Métodos Computacionais, 2a ed, IMPA, ISBN 9-788-52440-2-685.

Pinedo, M.L. (2012). Scheduling. Theory, Algorithms, and Systems, 4th edn., Springer New York

Reeves, C.R. (2010). Genetic Algorithms. In: Gendreau, M.; Potvin, Y., (eds.) Handbook of Metaheuristics, 2nd edn., vol.146 in Int. Series in Oper. Res. & Manag. Science, pp.109-140, Springer, Verlag, New York.

Gouvêa, M.M. and Araújo, A.F.R. (2015). Evolutionary Algorithm with Diversity-Reference Adaptive Control in Dynamic Environments, Int. Journal on Artific. Intellig. Tools, vol.24, no.01, pp.1450013-1-36