

Metodologia de otimização para alocação de chaves automatizadas na rede CELG

Gentil M. de Moraes Jr, João de Oliveira Jr, Sérgio R. Silva,
Jorge M. de Souza, Cristina Y. K. O. Adorni e Celso Cavelucci

Resumo - Este artigo apresenta uma metodologia de otimização para o problema de alocação de chaves automatizadas (PACT). O PACT é caracterizado como um problema de otimização combinatória, definindo a quantidade e os locais de instalação de chaves telecomandadas para minimizar a energia não fornecida durante interrupções do sistema e o total do investimento realizado na automação de chaves. Esse problema é restrito ao número máximo de chaves telecomandadas que podem ser instaladas e ao valor máximo do investimento. A técnica de Algoritmos Genéticos foi aplicada na solução do PACT e implementada utilizando recursos de banco de dados. A avaliação da metodologia desenvolvida foi apresentada em dois estudos de casos contemplando as subestações de Guapó e Goiá. Seus resultados foram analisados usando uma ferramenta computacional de visualização gráfica. Os resultados obtidos foram promissores, indicando a possibilidade de aplicação da metodologia no processo de planejamento da CELG.

Palavras-chave: Algoritmo Genético, Alocação de Chaves, Automação, Otimização, Rede de Distribuição.

I. INTRODUÇÃO

O objetivo deste artigo é apresentar a metodologia de otimização para alocação de chaves automatizadas desenvolvida no projeto de P&D ANEEL CELG código 44, sob o título “Redução dos Custos Operacionais pela Alocação Ótima de Equipamentos Telecomandados em Redes de Distribuição”, referente ao ciclo 2005/2006, executado pela FITec Inovações Tecnológicas e suportado pela CELG Distribuição S.A.

A regulamentação dos índices de qualidade impõe às concessionárias do setor elétrico a necessidade de investimentos no controle e operação de suas redes. Uma das linhas de atuação é a automação, em particular, a automação de chaves para reduzir o tempo de atendimento de ocorrências na rede, melhorando a qualidade do serviço e os custos de operação do sistema.

A automação de chaves é uma atividade desenvolvida durante o planejamento da rede de distribuição. Essa atividade compreende um conjunto de decisões complexas que levam a planos de investimento em automação.

Para auxiliar nesse processo, propõe-se uma metodologia de alocação de chaves telecomandadas, considerando aspectos estruturais e operacionais do sistema de distribuição, buscando uma solução de compromisso entre o investimento em chaves automatizadas e o benefício obtido pela redução da energia não fornecida devido à ocorrências de falhas no sistema. Essa abordagem caracteriza um problema de otimização combinatória [1].

Normalmente, problemas de otimização combinatória são relativamente fáceis de serem descritos, porém sua solução é difícil de ser encontrada. Eles pertencem, na sua maioria, à classe dos problemas que não existem algoritmos polinomiais [2], ou seja, algoritmos aplicados a essa classe de problemas necessita um número de iterações crescente, exponencialmente, com o tamanho da instância do problema a ser resolvido. A existência de algoritmos exatos limita-se na aplicação em instâncias pequenas comparadas àquelas encontradas em problemas práticos da área de distribuição de energia elétrica. Assim, heurísticas (algoritmos aproximados) são opções usuais para resolver esta classe de problemas de otimização.

Como metodologia de desenvolvimento, o primeiro passo foi refletir a realidade da CELG, na forma de um modelo de otimização, considerando a visão e atuação das equipes de operação, bem como os dados da topologia da rede e dados históricos disponíveis.

Como passo seguinte, foi feita a identificação da técnica de otimização que melhor resolvesse o modelo elaborado. Dentre as várias possibilidades, foi selecionada a técnica Algoritmos Genéticos [8]. Muito embora essa técnica possa parecer uma “caixa preta”, os resultados alcançados foram objetivos e validados conforme a experiência da operação, mostrando-se estável e bastante satisfatória.

Adicionalmente foram desenvolvidas outras técnicas de suporte, como enumeração exaustiva, possibilitando estabelecer um resultado de referência para validar o modelo. A implementação da enumeração exaustiva foi um importante marco para se obter conhecimento do problema e ter um padrão de comparação com os resultados obtidos por meio da técnica de selecionada.

Ao longo do desenvolvimento do projeto surgiram situações que exigiram definições buscando um compromisso entre o desempenho computacional e a complexidade da implementação, principalmente relacionados ao modelo de otimização. Porém, foram adotadas abordagens para atender os objetivos do projeto, trazendo resultados relevantes na utilização da ferramenta computacional pela CELG.

A aplicabilidade da metodologia foi verificada utilizando várias redes de características diferentes, destacando nesse trabalho os resultados obtidos para as subestações Guapó e Goiá.

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VI CITENEL), realizado em Fortaleza/CE, no período de 17 a 19 de agosto de 2011.

G. M. de Moraes Jr, J. de O. Jr, S. R. Silva trabalham na Celg Distribuição S. A. (e-mails: gentil.jr@celg.com.br, joaojr@celg.com.br e sergio.rs@celg.com.br).

J. M. de Souza, C. Y. K. O. Adorni e C. Cavelucci trabalham na FITec Inovações Tecnológicas (e-mails: jmdsouza@fitec.org.br, cadorni@fitec.com.br e celso@clctec.com.br).

Este artigo foi organizado em seções que apresentam os principais resultados da pesquisa. Na seção II são apresentadas publicações da literatura técnica relevantes à metodologia apresentada. Na seção III descreve-se o problema de otimização a ser resolvido. Na seção IV uma visão geral da solução é apresentada. Na seção V descreve-se a representação da rede de distribuição e a formulação do modelo de otimização proposto. Na seção VI detalha-se a técnica de solução selecionada. Na seção VII são discutidos os estudos de casos elaborados para avaliar a metodologia desenvolvida. As conclusões desse trabalho são apresentadas na seção VIII.

II. ESTADO DO CONHECIMENTO

Nesta seção apresentam-se publicações na literatura técnica que abordem metodologias correlatas ao problema de otimização para alocação de chaves telecomandadas.

Levitin, Mazal-Tov e Elmakis [7] abordam dois tipos de problemas de otimização:

1. Alocação ótima de um número especificado de seccionalizadores em uma rede radial, considerando as chaves de manobras já existentes;
2. Alocação ótima de um número especificado de chaves seccionalizadoras e de manobra.

O problema tipo 1 é útil nos estudos de instalação de seccionalizadores em redes de distribuição existentes. Para o planejamento de redes de distribuição novas ou na expansão, a abordagem do tipo 2 é a mais conveniente.

Os autores propõem um modelo matemático para avaliar a média anual de energia não fornecida de um sistema de distribuição radial, definida pela alocação de seccionalizadores e chaves de manobra. Esse modelo pode ser aplicado aos dois tipos de problema indistintamente. Caracterizam um problema de otimização para minimizar a média anual de energia não fornecida e utilizam a técnica de computação evolutiva para sugerir estratégias ótimas de alocação das chaves. Dois algoritmos genéticos [8] foram propostos: o primeiro, numa estrutura clássica, não garantindo a factibilidade das soluções; o segundo assegura essa factibilidade. Uma rede com 52 pontos de carga e 96 trechos foi utilizada no estudo de caso apresentado. Os melhores resultados foram obtidos pela versão modificada com tempos computacionais de aproximadamente 8s para problemas de instalação de no máximo 6 seccionadores e até 3 chaves de manobra.

Em 1996, Levitin, Mazal-Tov e Elmakis [9] apresentam um método para estimar o tempo médio de interrupções e a energia anual não fornecida em sistemas radiais de distribuição. Uma rede neural é treinada para aproximar as funções representando o índice de confiabilidade e o coeficiente de localização do defeito. No seu treinamento foram utilizados os parâmetros de entrada: área da rede (S), ângulo do setor do alimentador (A), número de clientes (N) e a topologia da rede. Para um dado conjunto de parâmetros (S,A,N) foram geradas aleatoriamente 100 diferentes redes por meio de um gerador de configuração de rede, caracterizando os padrões de treinamento da rede neural. Os autores comentam que a instalação de seccionalizadores automáticos pode reduzir de 30% a 60% a energia não fornecida devido a falhas nas linhas.

Um procedimento para alocação de chaves baseado em *Simulated Annealing* foi proposto por Billinton e Jonnavithula [10]. O critério de otimização adotado é de minimização da soma dos custos devido às interrupções de energia no consumidor e aqueles devido à instalação de chaves e sua manutenção, caracterizando uma função não-linear e não-diferenciável. O custo devido às interrupções de energia no consumidor é função da natureza e do grau de dependência que a atividade exercida por esse consumidor tem com o consumo de energia elétrica [11]. As restrições do modelo de otimização incluem os limites máximos e mínimos das tensões, correntes e fluxo de potência no início do alimentador. Dois estudos de casos foram desenvolvidos utilizando um sistema de teste de confiabilidade, elaborado para fins educacionais. Os resultados obtidos indicam reduções de aproximadamente 20% em custo (estudo de caso I) e 13% no número de chaves (estudo de caso II). Observa-se no estudo de caso II que o número de chaves instaladas na rede no início e no fim do procedimento de otimização é muito próximo, porém a localização das chaves diferencia significativamente, caracterizando, possivelmente, uma adequação aos níveis de confiabilidade do sistema.

Haghifam [12] propõe um método usando o paradigma de algoritmos genéticos [8] para o problema de localização ótima de chaves de manobras de carga (chaves normalmente abertas). As soluções do problema são avaliadas por uma função de otimização com duas parcelas: custo de energia não suprida (CENS) e custo de instalação das chaves. A parcela CENS é ponderada pelo fator de importância da carga baseado em um modelo de lógica nebulosa que classifica as cargas em importantes, normais e pouco importantes. Utiliza um cromossomo binário associado a cada alimentador, atribuindo os valores 0 e 1 aos bits do cromossomo para representar, respectivamente, a instalação ou não de chaves nos pontos candidatos à transferência de carga. Foram elaborados quatro estudos de casos, cada um deles variando os parâmetros de custo de interrupção dos pontos de carga, custos de instalação das chaves de manobras, tempo de reparo, tempo de detecção e isolamento do defeito, tempo de chaveamento para restauração da carga, probabilidade dos alimentadores suportarem a carga e fatores de importância das cargas. As conclusões apresentadas pelo autor mostram um adequado grau de aderência do modelo de otimização na aplicação de problemas reais.

Celli e Pilo [13] utilizam o princípio de otimalidade de Bellman [14] para definir estratégias ótimas de instalação de seccionalizadores automáticos (em inglês *Automatic Sectionalizing Switch Devices - ASSD*). O modelo de otimização irrestrito proposto define uma função objetivo para maximizar a diferença entre o custo total de interrupções e o custo total pela instalação dos ASSD. Algumas propriedades da função de benefício (representada no modelo pelo custo de interrupção) são destacadas para definir critérios baseados no princípio de otimalidade. Esses critérios foram usados para reduzir o número de combinações dos locais possíveis de instalação dos ASSD. A rede utilizada no estudo de caso apresentado possui 35 barras (nós). Garantindo a solução ótima do problema, os tempos computacionais obtidos pela execução do algoritmo são diminuídos, quando aplicados os critérios definidos.

Wenyu et al. [15] descrevem um procedimento baseado em algoritmos genéticos para determinar a localização ótima de chaves seccionadoras e chaves de transferências de carga (chaves normalmente abertas). O modelo de otimização proposto define a função objetivo para maximização benefício líquido, sujeito a estrutura radial da rede de distribuição e pelo limitante inferior do índice de qualidade do sistema. O algoritmo genético proposto utiliza um cromossomo representando o número binário do local onde serão instaladas as chaves. A seleção de indivíduos é feita pelo método da roleta [8] e o *crossover* é adaptativo [17]. O critério de parada usado condiciona a função de avaliação (*fitness*) dos indivíduos ótimos a dez gerações sucessivas permanecendo em um intervalo pré definido. Os resultados foram obtidos utilizando a rede IEEE RBTS-2 [16].

A metodologia proposta por Carvalho, Ferreira e Cerejo da Silva [18] aborda o problema de alocação de chaves telecomandadas. Utilizando um modelo de otimização irrestrito, maximiza a função que representa o custo de benefício da confiabilidade do sistema, expressa pela diferença entre o custo total de energia não suprida e o custo total de investimento em chaves telecomandadas – não está explícito se os autores consideraram os custos de manutenção nesse modelo. A técnica de solução utiliza um procedimento de duas fases: decomposição e otimização. A fase de decomposição usa um algoritmo polinomial para particionar a rede de distribuição em subconjuntos independentes, reduzindo a complexidade do problema. Na fase de otimização, os subproblemas independentes, gerados na fase de decomposição, são resolvidos para encontrar a estratégia ótima de alocação de chaves telecomandadas. O algoritmo desenvolvido foi inspirado em técnicas clássicas de otimização.

O trabalho de Sperandio et al. [19] descreve um programa computacional de apoio à decisão para alocação de chaves automáticas, denominado AUTOMATA. Estimando os ganhos de confiabilidade e mantendo o atendimento às metas estabelecidas pelo órgão regulador, o programa AUTOMATA maximiza os benefícios do investimento realizado na instalação de chaves em redes de distribuição. A metodologia proposta utiliza o conceito de Agrupamento, que os autores definem como “dois alimentadores interligados por uma chave normalmente aberta e mais uma chave normalmente fechada de cada lado, coordenadas pelo Centro de Operação de Distribuição via canal de comunicação”. O programa computacional é composto por três módulos: Reconfiguração, Confiabilidade e Multicritério. O módulo Reconfiguração define os agrupamentos e calcula a capacidade de transferência de carga de cada um desses agrupamentos. A simulação de interrupções em troncos e ramais e o cálculo dos valores correspondentes ao DEC, FEC e Energia não suprida para essas interrupções são realizados pelo módulo Confiabilidade. Após a execução dos módulos Reconfiguração e Confiabilidade, o módulo Multicritério gera uma lista das opções de instalação de chaves normalmente fechadas para cada um dos agrupamentos. Esta lista está classificada por ordem decrescente do índice de desempenho atribuído a cada uma das opções de instalação definidas. O índice de desempenho é obtido pela avaliação do nível de impacto que cada opção exerce no DEC, FEC e na energia não fornecida do agrupamento. A metodologia

desenvolvida foi aplicada em redes de distribuição da CELESC – Centrais Elétricas de Santa Catarina – e foi considerada pelos autores apropriada para ser integrada ao processo de tomada de decisão da concessionária.

III. O PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO

A automação de alimentadores em redes de distribuição é estudada desde a década de 70 [3]. Um dos principais objetivos da automação é tornar possível a operação remota de chaves para isolar os defeitos, através das chaves seccionadoras, e restaurar o suprimento de energia nas seções que não apresentem defeitos, utilizando para isso chaves denominadas nesse trabalho como chaves de manobras. A operação remota de chaves permite melhorar tempo gasto em manobras para o atendimento de falhas do sistema de distribuição e, conseqüentemente, reduzir a quantidade de energia não suprida. Destacando-se os benefícios como redução das perdas de receita, maior confiabilidade do sistema e redução do tempo de atendimento.

Na ocorrência de uma falha, em qualquer seção da rede, os dispositivos de proteção, seccionamento e manobra possibilitam, se operados convenientemente, reduzir o tempo de interrupção do serviço de fornecimento de energia elétrica. São eles que, acionados de forma coordenada, permitem o isolamento de defeitos e restauração do serviço. Portanto, a alocação desses dispositivos deve seguir critérios operacionais e econômicos para que possam contribuir na melhoria dos índices de qualidade do sistema.

A operação desses dispositivos depende do estado em que se encontra a rede de distribuição. No Estado Normal, os limites operacionais e a confiabilidade do sistema são definidos pelo planejamento. Na ocorrência de qualquer contingência, a rede é conduzida para Estado de Emergência. Neste estado, os dispositivos de proteção, se coordenados adequadamente, detectam o tipo de defeito temporário ou permanente. No caso de defeitos temporários a rede é restaurada sem necessidade de intervenção do operador de rede, retornando ao Estado Normal de operação. Se o dispositivo de proteção detecta um defeito permanente, ele desliga o fornecimento de parte da rede com defeito. O operador de rede através das chaves seccionadoras isola o defeito, conduzindo a rede para o Estado de Restauração. Em seguida, elabora um plano de restauração da parte da rede sem defeito. Usando as chaves de manobras transfere a carga para circuitos alternativos, restabelecendo o fornecimento de energia aos consumidores ligados à seção da rede sem defeito. Observa-se que, nesse processo, a possibilidade de acionamento remoto das chaves contribui na redução do tempo de manobras para isolar o defeito e transferir a carga.

No contexto do planejamento da rede, a quantidade e localização das chaves telecomandadas definem o nível de confiabilidade desejado para o sistema. As chaves telecomandadas são equipamentos de alto custo, exigindo do planejador buscar o melhor compromisso entre o investimento realizado e os benefícios a serem alcançados. Além do custo do equipamento, é importante considerar também custos relativos à manutenção e deslocamento da equipe de manutenção.

O problema de alocação de chaves telecomandadas (PACT) pode ser caracterizado como um problema para definir a quantidade e os locais de instalação das chaves

telecomandadas, minimizando a energia não fornecida durante interrupções do sistema e o total do investimento realizado na automação de chaves.

O valor do benefício da alocação de chaves telecomandadas (dispositivos seccionadores e de manobra) pode ser representado por uma função que valorize a energia não suprida (ENS) devido às falhas que ocorrem no sistema. Seu custo pode ser estimado do ponto de vista da concessionária ou dos consumidores. Pela concessionária o custo, conhecido como custo do não faturamento, normalmente está relacionado ao provável prejuízo sofrido pelas concessionárias por não ter concretizado a venda de energia a seus usuários. Sua avaliação depende da tarifa praticada pelas concessionárias [4]. O valor do custo da ENS do ponto de vista do consumidor, ou custo da interrupção, não é fácil de ser definido muito menos quantificado [5], existindo vários métodos para estimá-lo [6]. A obtenção do custo de interrupção foge do contexto deste trabalho.

O valor do investimento é a soma dos custos das chaves telecomandadas instaladas, incluindo o custo de instalação e o custo de manutenção do equipamento.

A solução do PACT está restrita ao número máximo de chaves telecomandadas que podem ser instaladas e ao valor máximo do investimento.

IV. VISÃO GERAL DA SOLUÇÃO

A solução desenvolvida no projeto é composta pelos módulos *Otimizador*, que trata da solução do PACT, e *Aplicação*, responsável pela interface com o planejador. Esses módulos e seu relacionamento são mostrados no diagrama da Figura 1.

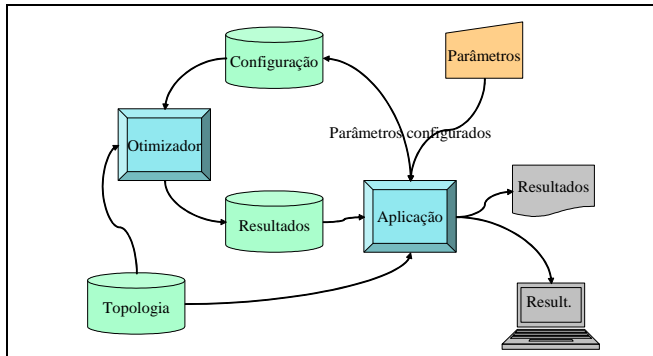


Figura 1: Visão Geral da Solução.

O módulo *Otimizador* recebe os parâmetros da base *Configuração* e os dados da base *Topologia*, obtém a solução otimizada e gera a base de *Resultados*.

O módulo *Aplicação* inclui a interface gráfica que possibilita a configuração de parâmetros de forma amigável para a atualização da base *Configuração*. A partir da base *Resultados* e da base *Topologia* o módulo *Aplicação* gera relatórios proporcionando uma visualização gráfica do resultado da otimização.

V. FORMULAÇÃO DO PACT

A. Representação da rede de distribuição

A rede de distribuição é representada por um modelo de grafo [20], sendo os arcos associados às chaves existentes e

os nós associados aos blocos – blocos representam a abstração de elementos de rede compreendidos entre dispositivos de proteção, seccionadores e chaves de manobra.

Por exemplo, a Figura 2 mostra a topologia da subestação GOIANIRA representada por um grafo.

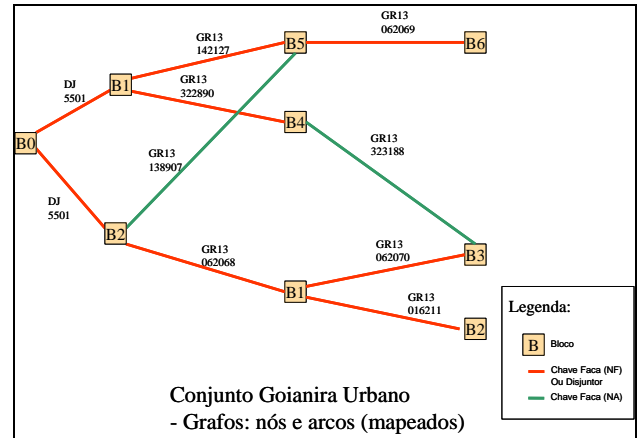


Figura 2: Topologia em grafo da subestação GOIANIRA.

B. Modelo de Otimização

O PACT formulado com enfoque no alimentador mostrou-se mais apropriado para a solução do problema de localização de chaves seccionadoras e de manobra, buscando-se minimizar a energia não fornecida pelo sistema na ocorrência de falhas. A Figura 3 mostra o modelo matemático de otimização para alocação de chaves telecomandadas.

$$\varphi \sum_{j=1}^{NA} \left\{ \sum_{i=0}^{|N_j|} \lambda_i \left[\mathbf{1} - x_{D(i)} \Delta t_d \right] L_{D(i)} + (\tau_i - x_{C(i)} \Delta t_r) L_{D(i)} \right\} +$$

$$\text{Min} \sum_{m \in Q_j} \left(\sum_{i \in P_m} L_{C(i)} \sum_{i \in S_{C(i),j}} \lambda_i (\tau_i - x_{C(i)} \Delta t_r) \right) + y_m \sum_{i \in P_m} L_{C(i)} \Delta t_m \Bigg\} +$$

$$C_s \sum_{j=1}^{NA} \sum_{i=1}^{N_j} x_i + C_m \sum_{j=1}^{NA} \sum_{m=1}^{M_j} y_m$$

$$\text{s. a,}$$

$$C_s \sum_{j=1}^{NA} \sum_{i=1}^{N_j} x_{ki} + C_m \sum_{j=1}^{NA} \sum_{m=1}^{M_j} y_m < \text{Investimento}_{\max}$$

$$\sum_{j=1}^{NA} \sum_{i=1}^{N_j} (x_i + y_i) < \text{LimiteMaxAutom}$$

$$x_i \in \{0,1\}, \quad \text{para } \forall i = 1 \dots N_j \text{ e } \forall j = 1 \dots NA$$

$$y_i \in \{0,1\}, \quad \text{para } \forall i = 1 \dots N_j \text{ e } \forall j = 1 \dots NA$$

Figura 3: Modelo de otimização do PACT.

No modelo temos:

NA	número de alimentadores;
N_j	número de blocos do alimentador j ;
T_d	tempo médio para localizar o bloco com defeito;
λ_i	taxa de falha anual do bloco i ;
τ_i	tempo médio de reparo do bloco i ;

x_i	variável binária associada a automação ($x_i = 1$) ou não ($x_i = 0$) da chave seccionadora fonte do bloco i ;
y_m	variável binária associada a automação ($y_i = 1$) ou não ($y_i = 0$) da chave de manobra existente no bloco m ;
Δt_d	redução média do tempo de localização do defeito devido à operação de abertura remota da chave seccionadora fonte;
Δt_r	redução média do tempo de reparo devido à operação de abertura remota da chave seccionadora carga;
Δt_m	redução média do tempo de reparo devido à operação de abertura remota da chave de manobra;
$L_{D(i)}$	fluxo de carga da chave seccionadora fonte do bloco i ;
$L_{C(i)}$	fluxo de carga da chave seccionadora carga do bloco i ;
Q_j	conjunto de blocos com chaves de manobra pertencentes ao alimentador elétrico j ;
P_m	conjunto de blocos a montante do bloco m , pertencentes ao caminho de m até a subestação;
φ	valor médio da energia;
C_s	custo para automatizar uma chave seccionadora;
C_m	custo para automatizar uma chave de manobra;
$Investimento_{max}$	investimento destinado para automação de chaves seccionadoras e de manobra da rede de distribuição;
$LimiteMaxAut$	número máximo de chaves a serem automatizadas.

Os GAs simulam o processo de evolução natural baseados na teoria evolucionista de Darwin [21]. As soluções de um problema são associadas aos cromossomos dos indivíduos de uma população. Os cromossomos são constituídos por uma cadeia de genes que codifica uma possível solução. Essa codificação é definida especificando os valores possíveis (alelos) para cada uma das posições (genes) do cromossomo e organizando os genes numa estrutura adequada ao problema. A adaptação de cada indivíduo ao ambiente é medida por uma função de avaliação, ou *fitness*. É usual, em problemas de otimização, associar-se o *fitness* à função objetivo do problema.

As soluções do PACT são representadas por um cromossomo binário com duas seções para codificar as chaves candidatas à automação, conforme ilustra o desenho mostrado na Figura 4.

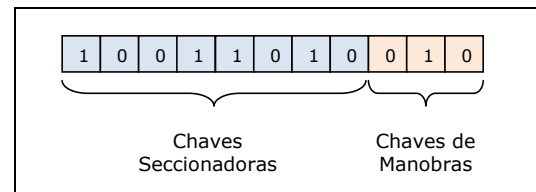


Figura 4: Estrutura do cromossomo para o PACT.

A primeira seção codifica a automação das chaves seccionadoras (chaves normalmente fechadas). Se o alelo correspondente ao locus (posição) i tem valor 1, isso significa que deverá ser instalada uma chave automatizada no bloco i ; caso contrário o seu valor deverá ser zero (0), indicando a não instalação de chave automatizada. Observa-se que a dimensão dessa sequência de números binários é N_j (número de blocos no alimentador j). A segunda seção é reservada para as chaves de manobra (chaves normalmente abertas). Nesta codificação, se o alelo do gene é igual a 1, a chave de manobra existente deve ser automatizada. Caso contrário, a chave de manobra não é automatizada e o alelo é igual a zero.

O método roleta é adotado na seleção dos indivíduos da população para sua recombinação, que utiliza o operador *crossover* uniforme. A fase de mutação usa um operador binário simples. A função de avaliação guarda uma relação estrita com a função objetivo do PACT, medindo a qualidade dos indivíduos quanto à energia total não fornecida e o investimento em automação. São incluídas na função de avaliação as restrições da quantidade de chaves e orçamento por meio de penalizações.

A estrutura geral do programa do módulo Otimização é apresentado no pseudo código da Figura 5.

VI. TÉCNICA DE SOLUÇÃO

A técnica de Algoritmos Genéticos (GA) foi aplicada na solução do problema de automação de chaves telecomandadas (PACT).

Pseudocódigo: Módulo Otimização

1-Filtro()

O usuário filtra a SE e seus alimentadores.

2- Genético (numero gerações, Origem lambda tal (Gema ou Oper))

Após clicar em OK é disparada a procedure Genético.

2.1- BuscaParametros()

Lê os parâmetros configurados na tabela Config.

2.2- GeraPopulacaoInicial(Origem lambda tal)

Gera e avalia os indivíduos da primeira geração

2.3- Enquanto critério de parada não satisfeito faça

GuardaMelhorIndividuo(j)

Armazena os melhor indivíduo da atual geração

De i=2 a população (parâmetros) faça

GeraNovaPopulacao(Origem lambda tal, j)

Aplica os operadores de:

Seleção

Recombinação

Mutação

Avalia os indivíduos dessa geração

Fim i

Fim Enquanto

Figura 5: Pseudo-código do programa principal.

Inicialmente adotou-se o critério de parada por número de gerações. Esse critério mostrou-se ineficiente prejudicando o desempenho computacional do algoritmo genético. Motivado por essa observação foi implementado adicionalmente o critério de parada considerando “N” resultados sucessivos com diferença menor que 0,001 entre os valores das soluções. Esse conjunto de critérios apresentou ganhos significativos no tempo de processamento do algoritmo genético.

C. Implementação do Algoritmo Genético em Banco de Dados

A implementação do Algoritmo Genético utiliza-se de recursos e mecanismos de banco de dados, tais como *Stored Procedures & Functions*, tabelas temporárias e índices. Essa estratégia foi adotada para obter tempos de processamento reduzidos, dado que um banco de dados possui mecanismos otimizados de busca e de processamento de dados, além da utilização de recursos de memória e disco do servidor. A dúvida inicial era se o tempo de escrita em disco poderia ou não tornar-se um limitante para obter soluções dentro de padrões de tempo adequados ao planejamento. Essa implementação utilizou o banco de dados Oracle, mostrando-se bastante eficiente, com tempo de processamento da ordem de unidades de minutos, para redes com até aproximadamente 45 chaves candidatas à automação. Além disso, permitiu a recuperação de todo o histórico de gerações, o que proporcionou a análise de pós processamento dos resultados e a validação dos cálculos.

A implementação de GAs utilizando banco de dados foi também um aspecto inovador no desenvolvimento do projeto de P&D.

VII. ESTUDOS DE CASOS

Estudos de casos foram realizados para verificar o desempenho do GA do PACT, utilizando instâncias de redes reais do sistema de distribuição da CELG. Essas instâncias foram criadas a partir dos bancos de dados da CELG, assim foi necessária uma análise exploratória para identificar os atributos de interesse do algoritmo de otimização implementado.

D. Ajustes de Parâmetros

Inicialmente, foram adotados os seguintes parâmetros para o algoritmo genético:

- Tamanho da população: 50 indivíduos;
- Número de gerações: 100;
- Taxa de recombinação (taxa de renovação da população entre gerações): 50%
- Taxa de mutação: 10 %

Após a execução de várias rodadas utilizando cenários diversos, foi observado que o valor de 70% para a taxa de recombinação levou à uma convergência mais rápida do algoritmo genético, sem comprometer a solução obtida. Portanto, adotou-se esse valor pois reduziu significativamente o tempo de processamento.

Observou-se que para instâncias maiores o número de 100 gerações não foi suficiente para a convergência do algoritmo genético. Para essas instâncias foram adotados valores entre 150 e 300 para o número de gerações.

A alteração dos parâmetros Tamanho da População e Taxa de Mutação não apresentaram melhorias significativas no desempenho do algoritmo genético. Assim, foram mantidos em todos os estudos de caso.

E. Visualização Gráfica da Rede Reduzida

Para visualizar os resultados foi desenvolvida uma interface gráfica mostrando o diagrama da rede reduzida. Neste diagrama são apresentados os blocos, suas interligações, chaves existentes automatizadas ou não e chaves a serem automatizadas, aquelas propostas pelo algoritmo genético. A Figura 6 mostra um exemplo da rede reduzida.

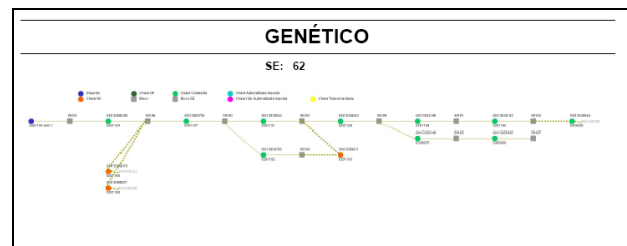


Figura 6: Exemplo da interface gráfica da rede reduzida.

F. Estudo de caso: SE Guapo e subestações interligadas

A subestação Guapó tem 2 alimentadores e 15 chaves. Ela está interligada com as subestações:

- Varjão: 2 alimentadores com 11 chaves;
- Aragoiânia: 2 alimentadores com 12 chaves;
- Posselândia: 2 alimentadores com 6 chaves.

Se for considerado todos os alimentadores 13,8 KV dessas subestações, chega-se ao total de 41 chaves.

Os parâmetros gerais considerados foram:

- Custo unitário da chave automatizada: R\$ 22.000,00
- Tempo de amortização da chave: 15 anos
- Taxa de juros ao ano: 12 % aa
- Custo kWh: R\$2,00
- Td: 2 horas
- Δt_d : 1 hora

- Δt_m : 0,7 hora
- Fator de carga: 1,0
- Fator de potência: 1,0

Os parâmetros do PACT para o genético foram:

- Tamanho da população inicial: 50 indivíduos
- Número de gerações: 100 (também critério de parada)
- Taxa de recombinação: 70% (taxa de renovação da população entre gerações)
- Taxa de mutação: 10%

O estudo de caso utilizou o algoritmo genético nos seguintes cenários:

- Cenário 1: cada subestação individualmente;
- Cenário 2: conjunto de subestações independentes;
- Cenário 3: conjunto de subestações com chaves comuns;
- Cenário 4: conjunto de todas as subestações.

O quadro a seguir mostra um resumo da topologia utilizado neste estudo de caso.

Tabela I: Resultados do estudo de caso SE Guapó e interligadas.

Cenário	SE	Genético (R\$)	Tempo (HH:MM:SS)
Cenário 1	Guapó (75)	155.616,76	00:01:30
Cenário 1	Varjão (332)	25.051,34	00:00:47
Cenário 1	Aragoiânia (350)	128.420,12	00:01:29
Cenário 1	Posselândia (466)	11.918,38	00:00:33
Cenário 2	(75) + (466)	167.535,14	00:02:15
Cenário 2	(350) + (466)	140.338,50	00:03:01
Cenário 3	(75) + (350)	283.655,42	00:03:23
Cenário 4	Todas	325.714,78	00:05:30

Nota-se na Tabela I que para as SEs independentes os resultados obtidos individualmente ou agrupados são equivalentes. Por exemplo, os resultados para Guapó e Posselândia individualmente são R\$ 155.616,76 e R\$ 11.918,38, respectivamente, totalizando R\$ 167.535,14, valor obtido quando executado de forma conjunta.

No caso das SEs dependentes, o resultado conjunto pode ser melhor que o resultado individual. Por exemplo, para as subestações de Guapó e Aragoiânia obtêm-se o valor de R\$ 283.655,42, quando executadas conjuntamente. Esse valor é menor que a soma dos valores individuais igual à R\$ 284.036,88.

Ao executar o conjunto de todas as subestações, obtemos o valor de R\$ 325.714,78. Esse valor é 1,5% maior que a soma dos valores individuais que se considera uma aproximação adequada ao problema. Isso mostra que o conjunto de todas as subestações tem uma dependência fraca.

Observa-se que esses resultados foram obtidos com valores dos parâmetros do GA diferentes daqueles apresentados no item D. Portanto é possível obter-se melhores valores do que os apresentados neste item.

G. Estudo de caso: SE Goiás

Neste estudo de caso consideramos a subestação Goiás (062) possuindo cinco alimentadores. Essa subestação pertence à RMG (Região Metropolitana de Goiânia) e

devido ao número de alimentadores e chaves representa um estudo de caso de complexidade de médio para alto. A SE Goiás totaliza 65 chaves, sendo 44 chaves NF e 21 chaves.

- Os parâmetros gerais considerados foram:
- Custo unitário da chave automatizada: R\$ 22.000,00
 - Tempo de amortização da chave: 15 anos
 - Taxa de juros ao ano: 12 % aa
 - Custo kWh: R\$2,00
 - Td: 2 horas
 - Δt_d : 1 hora
 - Δt_m : 0,7 hora
 - Fator de carga: 1,0
 - Fator de potência: 1,0

Os parâmetros do PACT para o genético foram:

- Tamanho da população inicial: 50 indivíduos
- Número de gerações: 100 (também critério de parada)
- Taxa de recombinação: 70% (taxa de renovação da população entre gerações)
- Taxa de mutação: 10%

O estudo de caso utilizou o algoritmo genético nos seguintes cenários:

- Cenário 1: cada alimentador individualmente;
- Cenário 2: conjunto de alimentadores independentes;
- Cenário 3: conjunto de alimentadores com chaves comuns;
- Cenário 4: conjunto de todos os alimentadores.

Tabela II: Resultados do estudo de caso SE Goiás.

Cenário	Alimentador	Genético (R\$)	Tempo (HH:MM:SS)
Cenário 1	1	274.266,18	00:01:39
Cenário 1	2	416.498,50	00:01:16
Cenário 1	3	262.670,33	00:00:58
Cenário 1	4	158.468,00	00:01:59
Cenário 1	5	312.124,75	00:04:17
Cenário 2	2 e 3	679.168,83	00:02:52
Cenário 3	1 e 3	536.936,51	00:03:43
Cenário 4	Todos	1.485.330,62	00:10:30

Como observado no estudo de caso de Guapó, para alimentadores independentes os resultados obtidos individualmente ou agrupados são equivalentes. Por exemplo, os resultados para os alimentadores 2 e 3 individualmente são R\$ 416.498,50 e R\$ 262.670,33, respectivamente, totalizando R\$ 679.168,83, valor obtido quando executado de forma conjunta.

No caso dos alimentadores dependentes, o resultado conjunto pode ser melhor que o resultado individual. Neste estudo de caso não se observou nenhuma melhoria. Por exemplo, para os alimentadores 1 e 3 obtêm-se o valor de R\$ 536.936,51, igual à soma dos valores individuais.

Ao executar o conjunto de todos os alimentadores, obtivemos o valor de R\$ 1.485.330,62. Esse valor é 4,3% superior à soma dos valores individuais. Isso mostra os parâmetros do algoritmo genético não estavam adequadamente ajustados para este estudo de caso.

Os parâmetros do algoritmo genético foram ajustados e obteve-se uma diferença de 0,3% entre a soma dos valores individuais e o valor da execução conjunta. Pode-se considerar esse resultado uma aproximação adequada ao

problema, mostrando que o conjunto de todos os alimentadores possui uma dependência fraca.

VIII. CONCLUSÃO

Este artigo apresentou a aplicação da técnica Algoritmos Genéticos na solução do problema para alocação de chaves telecomandadas em redes de distribuição de energia elétrica. Esse problema foi formulado como um problema de otimização combinatório, definindo as posições para alocação das chaves telecomandadas que minimize a soma do investimento em automação e a energia não fornecida devido à falhas do sistema.

A técnica utilizada para a solução do problema formulado, algoritmos genéticos, foi concebida utilizando um cromossomo binário de duas seções, uma associada às localizações das chaves seccionadoras (chaves normalmente fechadas) e outra associadas às chaves de manobras (chaves normalmente abertas). A função de avaliação usada no algoritmo genético do problema de alocação de chaves telecomanda guarda uma relação estrita com a função objetivo do modelo de otimização.

A utilização da técnica de algoritmos genéticos implica num ajuste dos parâmetros internos da técnica, lembrando:

- Tamanho da população
- Número de gerações
- Taxa de recombinação (taxa de renovação da população entre gerações)
- Taxa de mutação

Cada implementação é um caso e necessita de ajuste nos parâmetros. Esse ajuste foi um dos aspectos mais sensível e importante no desenvolvimento desta pesquisa.

Ao longo da execução dos vários testes do PACT, alguns aspectos foram observados:

Aspecto 1 - Precisão da solução e o tempo de processamento.

Parâmetros do genético que afetam esses aspectos:

- Tamanho da população
- Número de gerações
- Número de rodadas

O número de chaves, ou seja, o tamanho do cromossomo, também é um fator que importante na qualidade da solução e tempo de processamento.

Existe uma relação direta entre precisão e tempo de processamento: quanto mais precisa a solução, mais tempo de processamento será requerido. Porém existe um limite de custo versus benefício que deve ser avaliado, limite esse que para obter um pequeno ganho na precisão da solução exige um tempo alto de processamento.

Aspecto 2 - Grande diversidade da população na última geração.

A diversidade da população na última geração pode indicar a necessidade de aumentar o número de gerações para gerar resultados melhores.

Aspecto 3 - Manter o indivíduo melhor adaptado na nova geração.

Observou-se que o indivíduo melhor adaptado obtido durante as gerações nem sempre estava presente na última geração, considerada a população melhor adaptada. Assim

optou-se por manter na população da geração seguinte, o indivíduo melhor adaptado em uma geração atual.

Aspecto 4 - Taxa de recombinação a 0,85 (85%).

O aumento da taxa de recombinação de 0,5 (50%) para 0,7 (70%) resultou numa convergência mais rápida e apresentou resultados equivalentes, o que poderia reduzir o número de gerações. Posteriormente, essa taxa foi aumentada para 0,85 (85%) apresentando um resultado ainda melhor.

A alteração nesse parâmetro não afeta o tempo de processamento, a não ser de forma indireta, ou seja, reduzindo o número de gerações.

IX. AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem ao grupo de Software da FITec, Arthur Jose Pierozzi e Jailson Alves, que contribuíram na construção da ferramenta computacional.

A equipe desta pesquisa agradece ao Centro de Operação da Distribuição e ao Setor de Planejamento de Distribuição da Celg D, pelas discussões técnicas que contribuíram para o desenvolvimento do projeto.

X. REFERÊNCIAS

- [1] Papadimitriou, C. H. e Steiglitz, K. (1998). *Combinatorial optimization: Algorithms and Complexity*, Dover publications, Inc., New York.
- [2] Garey, M. R. e Johnson, D. S. (1979). *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP – Completeness*, W. H. Freeman and Company, New York.
- [3] Task Group of IEEE, (1984). Bibliography on distribution automation 1969 – 1982. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-103(6):1176-1182.
- [4] P. Gomes e M. Th. Schilling, (1997). Custo de interrupção: conceituação, metodologia de avaliação, valores existentes e aplicações. Anais do XIV SNPTTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Belém (PA).
- [5] M. J. Sullivan, T. Vardell e M. Johnson, (1996). Power interruption costs to industrial and commercial consumers of electricity, IEEE Transactions on Industry Applications, 33(6):1448-1458.
- [6] C. C. B. Camargo, (1996). Gerenciamento pelo Lado da Demanda: Metodologia para Identificação do Potencial de Conservação de Energia Elétrica de Consumidores Residenciais. Tese de Doutorado em Engenharia de Produção apresentada à Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.
- [7] G. Levitin, S. Mazal-Tov e D. Elmakis, (1995). Genetic algorithm for optimal sectionalizing in radial distribution system with alternative supply, Electric Power Systems Research, n. 35, pp. 145-155.
- [8] Golberg, D. E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley.
- [9] G. Levitin, S. Mazal-Tov e D. Elmakis, (1996). Reliability indices of a radial distribution system with sectionalizing as a function of network structure parameters, Electric Power Systems Research, n. 36, pp. 73-80.
- [10] Billinton, R. N. e Jonnavithula, S. (1996). Optimal sectionalizer allocation in electric distribution systems, IEEE Transaction on Power Delivery, 11(3): 1646-1651.
- [11] Wacker, G. e Billinton, R. (1989). Customer Cost of Electric Service Interruptions, Electrical Power & Energy Systems, 77(6): 919-930.
- [12] Haghifam, M. R. (1994). Optimal allocation of tie points in radial distribution system using a genetic algorithm, European Transactions on Electrical Power, 14: 85-96.
- [13] G. Celli e F. Pilo, (1999). Optimal sectionalizing switches allocation in distribution networks, IEEE Transactions on Power Delivery, 14(3):1167-1172.
- [14] R. E. Bellman, (1957). *Dynamic Programming*, Princeton, N. J.: Princeton University.
- [15] Wenyu, Y.; Jian, L.; Jianmin, Y.; Haipeng, D. e Meng, S. (2004). Optimal Allocation of Switches in Distribution Networks, Proceedings of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation, China, pp. 5155-5159.

- [16] Allan, R. N. e Billinton, R. (1991). A reliability test system for educational purposes basic distribution system data and results, IEEE Transactions on Power System, 6: 813-820.
- [17] Spears, W. M. (1995). Adapting Crossover in Evolutionary Algorithms. Proceedings of the Evolutionary Programming Conference, 367-384.
- [18] P. M. S. Carvalho, L. A. Ferreira e A. J. Cerejo da Silva, (2005). Decomposition approach to optimal remote controlled switch allocation in distribution system, IEEE Transactions on Power Delivery, 20(2): 1031-1036.
- [19] Sperandio, M.; Aranha Neto, E. A. C.; Sica, E. T.; Trevisan, F.; Coelho, J. e Ramos, R. (2007). Automata: Software para alocação de chaves automáticas em redes de distribuição, VIISIMPASI – Simpósio de Automação de Sistemas Elétricos, Salvador, BA.
- [20] R. K. Ahuja, T. L. Magnanti e J. B. Orlin, (1993). *NETWORK FLOWS. Theory, Algorithms and Applications*, Prentice Hall.
- [21] J. H. Holland (1992). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, MIT Press, Massachusetts.