

Melhoria da Qualidade do Fornecimento de Energia usando um Modelo de Programação Não Linear e Algoritmos Genético para Alocação de Dispositivos de Proteção

L. G. W. Silva – R. A. F. Pereira – J. R. S. Mantovani : DEE/FEIS/UNESP

E-mails: wesz@dee.feis.unesp.br rodrigof@dee.feis.unesp.br mant@dee.feis.unesp.br

Palavras-chave – Rede de Distribuição, Algoritmos Genético, Avaliação da Confiabilidade e Proteção.

Resumo - A alocação otimizada de dispositivos de proteção em pontos estratégicos dos circuitos de distribuição, melhora a qualidade do serviço de fornecimento de energia e os índices de confiabilidade do sistema. Neste trabalho apresenta-se um modelo de programação não linear inteiro misto (PNLIM), com variáveis reais e binárias, para o problema de alocação de dispositivos de proteção em setores estratégicos, visando melhorar o índice de confiabilidade e atender os consumidores com energia confiável e de baixo custo, aumentando o faturamento das concessionárias, e cumprindo com as exigências estabelecidas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). As restrições consideradas para o problema refletem limitações técnicas e econômicas, tais como problemas de coordenação de dispositivos de proteção em série, número de equipamentos disponíveis, importância do alimentador sob análise, topologia do circuito entre outras. Para a solução deste problema propõe-se o uso de algoritmo genético básico e uma versão referenciada como algoritmo genético intermediário, ambos adaptados com base nos estudos realizados no transcórre do desenvolvimento deste trabalho. Apresentam-se resultados obtidos para circuitos com 9 e 18 pontos para possíveis alocações de dispositivos e de um circuito real (134 barras) com 20 pontos pré-selecionados para alocação de dispositivos.

1. INTRODUÇÃO

Com a privatização do setor de distribuição de energia elétrica no país deve haver uma maior competitividade entre as empresas e a busca por soluções eficientes e seguras tanto do planejamento da expansão como da operação dos sistemas, são objetivos que devem ser perseguidos tanto pelas concessionárias como pelos pesquisadores da área de planejamento de sistemas elétricos. No contexto do planejamento com vistas à melhoria dos índices de confiabilidade da rede de distribuição destaca-se a alocação de dispositivos de proteção (religadores, seccionadores, fusíveis) em pontos estratégicos dos sistemas de distribuição.

A alocação de dispositivos de proteção em sistemas de distribuição podem dar ênfase ao aspecto da continuidade do suprimento, evitando que uma falta tenha

um envolvimento muito grande em termos de carga e/ou consumidores atingidos, além de procurar reduzir os tempos de localização dessa falta e da reposição do sistema em operação. Contudo, convém ressaltar que a alocação de vários dispositivos de proteção em série, como geralmente requer um esquema de boa confiabilidade, tende a tornar mais lenta a proteção dos alimentadores na subestação, o que pode acarretar, em alguns casos, danos a materiais e equipamentos, até em consequência de fadiga mecânica. Assim sendo, quando se procura atingir altos níveis de confiabilidade na operação dos sistemas de distribuição de energia elétrica, a preocupação com a proteção e segurança deve aumentar proporcionalmente.

O princípio básico de proteção é a técnica de selecionar, coordenar, ajustar e alocar os vários equipamentos e dispositivos protetores em um sistema elétrico, de forma a guardarem entre si uma determinada relação, tal que uma anormalidade no sistema possa ser isolada ou removida, sem que outras partes do mesmo sejam afetadas. Não há normas pré-estabelecidas para a alocação e coordenação dos equipamentos de proteção em Sistemas de Distribuição. Dessa forma, não há até o momento, um procedimento único para a utilização dos dispositivos de proteção em relação às empresas concessionárias de energia elétrica, isto é, os esquemas de proteção variam de empresa para empresa.

A alocação de dispositivos de proteção é um tema que tem sido abordado por alguns pesquisadores da área de Engenharia Elétrica, com alguns trabalhos publicados na literatura especializada. Em [3], a partir dos índices de confiabilidade definidos com base nos padrões das concessionárias americanas, propõe-se à melhoria desses índices através das ações preventivas oferecidas pelas respostas rápidas dos dispositivos de proteção, localizadores de faltas e sensores instalados nas redes. A função objetivo da forma que foi considerada nesse artigo, reflete os inconvenientes da alocação de dispositivos de proteção na confiabilidade e que deve portanto ser minimizada para melhoria dos índices de confiabilidade do alimentador sob análise. As restrições consideradas são referentes a problemas de coordenação, números de dispositivos de proteção disponíveis para alocação entre outras. Para solução do problema de otimização não linear resultante utilizam manipulações algébricas para tornar o problema linear e propõem para solução técnicas heurísticas baseadas no conhecimento do problema. Em [2], baseado na política de privatizações

das companhias de distribuição no Brasil e na necessidade de atender índices mínimos de confiabilidade, formulam um modelo para determinar os índices individuais de duração e frequência (*DIC*) e (*FIC*), para uma dada rede. O modelo de simulação é baseado sobre uma representação estatística da rede.

Neste trabalho apresenta-se uma formulação matemática para o problema de alocação ótima de dispositivos de proteção em circuitos de distribuição, visando melhorar o Índice de Confiabilidade da Rede (*ICR*) sujeita a restrições de natureza técnica e econômica, sendo assim atender os consumidores com uma energia confiável e de baixo custo, desta forma, aumentando o faturamento das concessionárias e procurando cumprir com as exigências estabelecidas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (*ANEEL*). O problema de alocação é formulado através de uma função objetivo não linear que busca representar matematicamente os benefícios e inconvenientes de se alocar dispositivos de proteção em pontos pré-selecionados dos circuitos de distribuição, considerando os índices de faltas permanentes e temporárias em cada seção do circuito, o número de consumidores ou a potência média instalada. As restrições que devem ser atendidas refletem limitações técnicas e econômicas, tais como problemas de coordenação de dispositivos de proteção em série, número de equipamentos disponíveis para alocação, importância do alimentador sob análise, topologia do circuito entre outras. O resultado que se obtém da aplicação desse tipo de análise é um problema de programação matemática com variáveis binárias composto por uma função objetivo não linear sujeita a um conjunto de restrições lineares. Para solução desse problema propõe-se o uso de Algoritmos Genético adaptado para solução desse tipo de problema. Utilizando a formulação e metodologia propostas foram analisados vários circuitos testes da literatura, obtendo-se em todos os testes soluções de boa qualidade.

2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

O problema da alocação ótima dos dispositivos de proteção em sistemas de distribuição de energia elétrica tem como objetivo melhorar os índices de confiabilidade das concessionárias e o aumento do faturamento. O número e os tipos de dispositivos de proteção a serem instalados em um alimentador em particular, dependerão da importância do sistema, magnitude e tipo de carga, da configuração do circuito e da exposição a riscos de diferentes naturezas, que podem levar o sistema a condições de faltas permanentes ou temporárias. A meta fundamental do serviço elétrico sempre foi servir seus clientes com um suprimento de energia segura e de baixo custo com um nível aceitável de confiabilidade.

Neste trabalho utilizando-se alguns conceitos apresentados e definidos na literatura [2-5] e a definição dos índices de confiabilidade para sistemas de distribuição de energia elétrica, a alocação ótima de dispositivos de proteção é abordada como um problema de programação não linear binária (0/1), considerando-se

uma função objetivo não linear e um conjunto de restrições lineares e para a solução deste problema propõe-se o uso de algoritmos evolutivos [6-8]. Como resultado da implementação desta técnica obtém-se os tipos e os locais onde deverão ser alocados os dispositivos de proteção em um alimentador de distribuição.

2.1. Modelagem Matemática Proposta para o Problema de Alocação de Dispositivo de Proteção

Na alocação de dispositivos de proteção deseja-se identificar, os tipos e a localização dos dispositivos de proteção no alimentador de distribuição, com vistas a melhorar os índices de confiabilidade. A possível localização baseia-se no número de clientes (N_{qi}) ou na carga que está conectada (L_{qi}), nas taxas de faltas permanentes (λ_{qi}) e temporárias (γ_{qi}) e na extensão do alimentador.

A técnica proposta considera o alimentador de distribuição dividido em seção principal e ramais laterais. Os ramais laterais são subdivididos em três categorias: Categoria 1 onde não é possível a instalação de nenhum dispositivo de proteção; Categoria 2 onde é possível apenas à instalação de fusíveis; Categoria 3 onde é possível a instalação de vários tipos de dispositivos de proteção.

As seguintes hipóteses devem ser consideradas na solução do problema:

- Dispositivos trifásicos minimizam o número de clientes afetados por faltas permanentes e restauram automaticamente a energia para faltas temporárias.
- Dispositivos monofásicos não têm capacidade de religamento e assim, faltas temporárias são tratadas como sendo faltas permanentes.

Em geral, o impacto sobre os clientes da alocação dos dispositivos no sistema, está relacionado à frequência e duração da interrupção. Sendo assim procura-se elaborar uma modelagem voltada a minimizar os índices de confiabilidade devido a faltas sobre os clientes.

Formulação da Função Objetivo

A modelagem matemática do Índice de Confiabilidade da Rede (*ICR*), proposta neste trabalho para um alimentador de distribuição é escrita como:

$$ICR = \frac{\sum \varphi_i * N_i}{N_T} \quad (1)$$

Em que:

φ_i : Taxas de faltas na seção *i*;

N_i : Número de cliente na seção *i*;

N_T : Número total de clientes no alimentador.

A equação (1) pode ser particionada nas contribuições da seção principal e dos ramais como:

$$\sum \varphi_i * N_i = \sum_{q=1}^{\alpha+\beta+1} A_q \quad (2)$$

$$A = \sum_{q=1}^{\alpha+\beta+1} A_q$$

Em que:

q : Número da seção (1 para seção principal, 2 – n para ramais)

α : Número de ramais pertencentes à categoria 3;

β : Número de ramais pertencentes à categoria 2;

A : Representa o número de clientes ou potência desligada do circuito de distribuição, considerando-se a contribuição da seção principal e dos ramais.

A função objetivo adotada neste trabalho para o problema de alocação ótima de dispositivos de proteção é obtida a partir do lado direito da equação (2), que representa o número de consumidores ou o montante de cargas desligadas devido a incidência de faltas temporárias (γ_{qi}) e permanentes (λ_{qi}) no alimentador sob estudo, no período de um ano, por exemplo. Deve-se trabalhar com o intuito de maximizar as vantagens da instalação dos dispositivos de proteção, e minimizar as desvantagens da instalação dos mesmos. As vantagens estão relacionadas com a redução do tempo de desligamento da rede ou setores de consumidores devido à incidência de faltas temporárias, e minimizar o número de consumidores afetados por estas faltas.

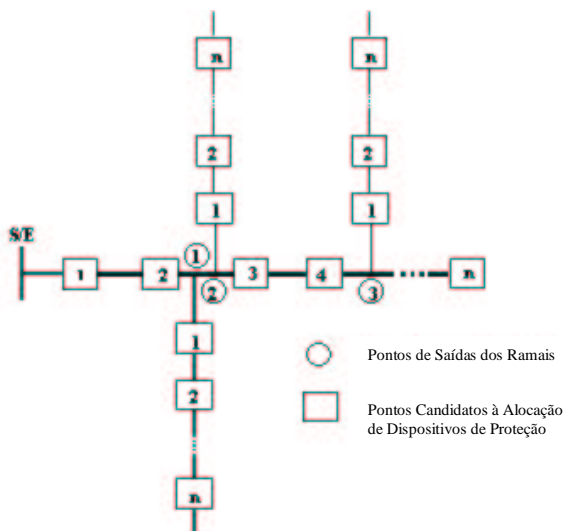


Figura 1. Circuito radial simples com várias ramificações.

Considere o alimentador de distribuição genérico da Figura 1 com possibilidades de se alocar dispositivos de proteção em qualquer um dos pontos (1, 2, ..., n). Para cada uma das seções definidas por esses pontos tem-se

disponível os dados referentes ao número de consumidores (N_{qi}) e aos índices de falhas permanentes e temporárias (λ_{qi} , γ_{qi}). Para este alimentador genérico, será estabelecida toda a base conceitual e filosófica que permite obter a formulação matemática da função objetivo para o problema de alocação de dispositivos de proteção, que deve refletir que o menor número possível de consumidores sejam desligados devido à incidência de faltas temporárias na seção principal do alimentador e nos ramais com a instalação de dispositivos de proteção. Na incidência de faltas no alimentador, caso não haja nenhum dispositivo de proteção instalado ocorrerá a atuação do disjuntor equipado com relé na subestação, caso esse seja o único equipamento de proteção existente no circuito.

Considere o arranjo da Figura 2 (a) elaborado com base no circuito da Figura 1; em que $r1$, $r2$ e $r3$ representam possíveis pontos para alocação de religadores nos ramais, N_{qri} o número de consumidores do ramal i ; N_{qj} o número de consumidores do ponto j da seção principal. Na incidência de uma falta temporária entre os pontos j e n sejam na seção principal ou nos ramais do alimentador, Figura 2 (b), com a alocação de um religador no ponto i todos os consumidores a sua jusante estarão protegidos para esta falta. Existindo mais de um religador no alimentador principal utiliza-se o conceito de dispositivo protetor e protegido, ou seja o religador instalado no ponto i será protegido principal para faltas temporárias até o ponto onde existe um outro religador instalado em série com ele. Devido essa condição de coordenação ocorre uma diminuição do número de clientes que serão afetados por esta falta. Nas Figuras 3 (a) e 4 (a), ilustra-se a mesma condição anterior para a incidência de faltas permanente na seção principal e ramais, respectivamente. Na Figura 3 (b) ilustra-se a atuação de um religador alocado nos pontos i e j da seção principal. Na Figura 4 (b) ilustra-se a atuação de um religador alocado nos pontos i e $r2$.

Na Figura 5 (a), com a incidência de uma falta permanente no ramal $r3$ e com a alocação de um religador no ponto l , todos os consumidores da seção principal e dos ramais à montante do ramal considerado serão desligados devido à incidência desta falta. Na Figura 5 (b), com a incidência de uma falta permanente no ramal $r3$ e com a alocação de um religador no ponto l e no ponto $r3$, apenas os consumidores dos ramais à jusante do ponto $r3$ serão desligados devido à incidência desta falta. Com as considerações e análises realizadas anteriormente, verifica-se que pode representar adequadamente sob o aspecto técnico de confiabilidade a função objetivo para cada circuito, com vistas a solucionar o problema de alocação ótima de dispositivos de proteção em Circuitos de Distribuição, levando-se em consideração o número de clientes (N_{qi}) e/ou a carga média instalada nos trechos do alimentador (L_{qi}).

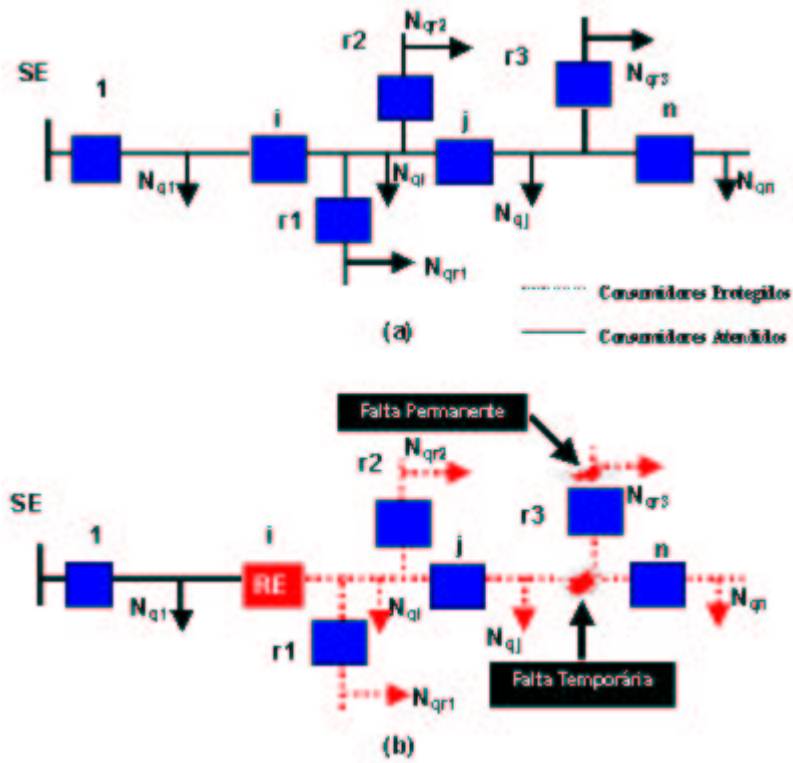


Figura 2. Circuito Ilustrativo para Interpretação da Instalação de Religadores na Seção Principal

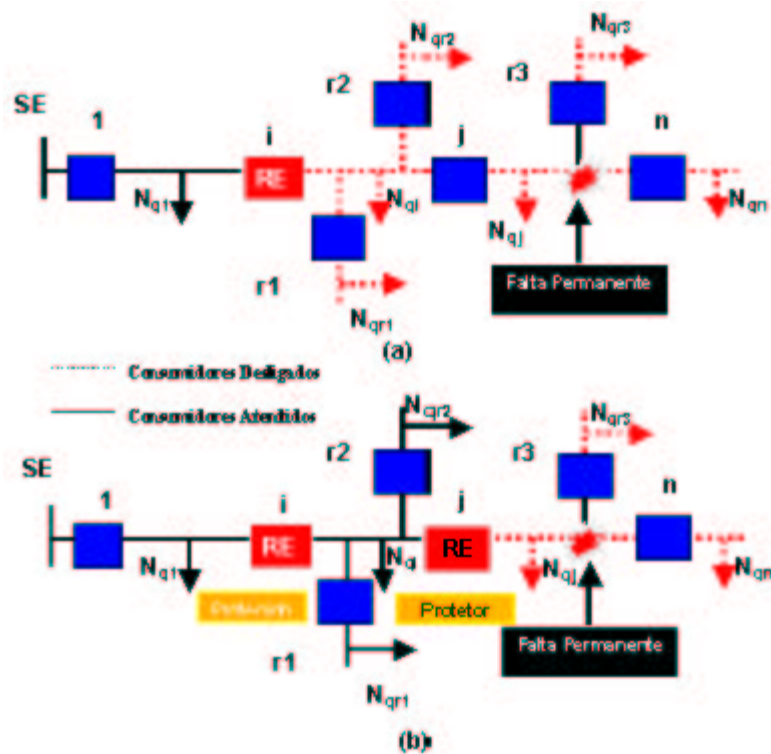


Figura 3. Efeito de Atuação do Dispositivo de Proteção Instalados na Seção Principal para Falta Permanentes na Seção Principal sobre os Consumidores da Seção Principal e dos Ramais

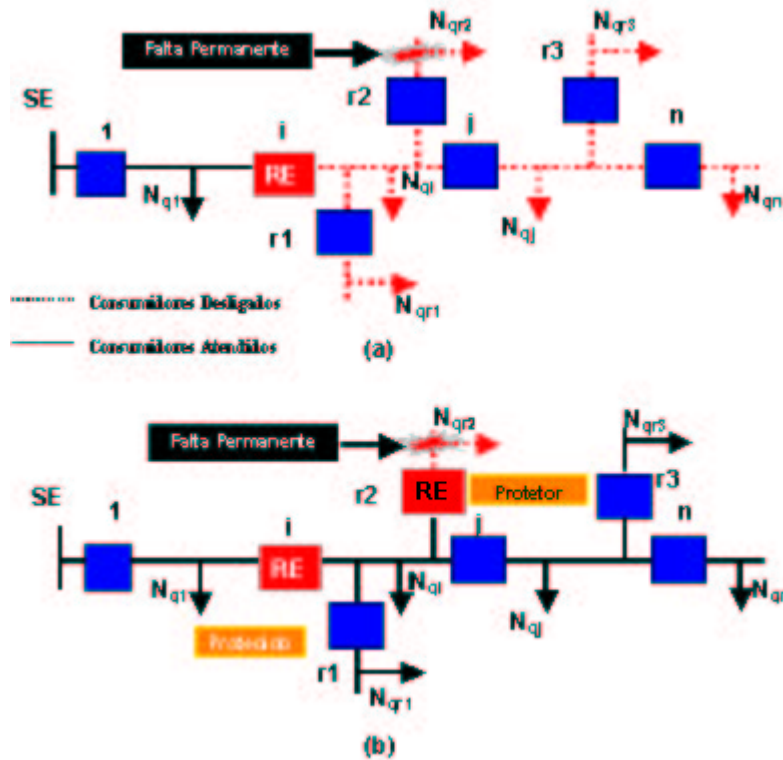


Figura 4. Efeito de Atuação do Dispositivo de Proteção Instalados nos Ramais ou na Seção Principal para Falta Permanentes nos Ramais sobre os Consumidores a Jusante do Ramal (Ramais e da Seção Principal).

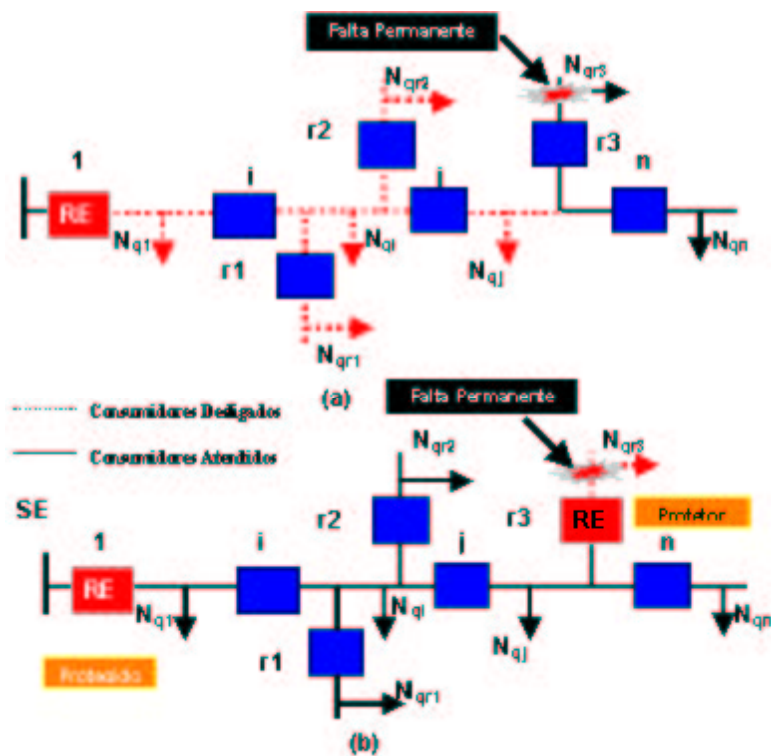


Figura 5. Efeito de Atuação do Dispositivo de Proteção Instalados nos Ramais ou na Seção Principal para Falta Permanentes nos Ramais sobre os Consumidores a Montante do Ramal (Seção Principal).

Restrições do Problema

As restrições que devem ser incorporadas ao problema de alocação ótima de dispositivos de proteção são de natureza técnica e econômica. As restrições de natureza técnica estão relacionadas com a coordenação dos dispositivos de proteção e a topologia do sistema. As restrições de natureza econômica estão relacionadas com o custo de instalação e operação dos dispositivos, natureza e importância da carga.

As relações matemáticas que definem as restrições referentes aos custos de manutenção e instalação dos dispositivos de proteção, neste trabalho são definidas de maneira bastante simplificada através da limitação do número máximo de dispositivos de proteção disponíveis para a alocação no alimentador. Os religadores e seccionadores apesar de pertencerem a uma classe de equipamentos que trazem inúmeros benefícios para o sistema são de custos relativamente elevados e a possibilidade da alocação desses equipamentos está relacionada com a importância da carga alimentada, necessidade de redução de índices de confiabilidade para evitar pagamento de multas e a instalação de desses equipamentos deve ser acompanhada de uma análise criteriosa da relação custo/benefício.

3. TÉCNICA DE SOLUÇÃO

As técnicas de soluções utilizadas para o problema de alocação de dispositivos de proteção, visando obter soluções de alta qualidade foram um Algoritmo Genético Básico [8], e uma versão adaptada que utiliza os conceitos do Algoritmo Genético Básico e do Algoritmo Genético Construtivo [6], referenciada neste trabalho como Algoritmo Genético Intermediário. As particularidades da versão do algoritmo genético dedicado à solução ótima do problema de alocação de dispositivos de proteção estão detalhadas a seguir e o diagrama de blocos apresentado na Figura 7.

Codificação dos Cromossomos

Cada cromossomo que é um indivíduo da população do algoritmo genético, representa uma proposta de alocação para equipamentos de proteção para o alimentador sob estudo. O sistema de codificação utilizado foi o binário e cada indivíduo foi representado segundo a estrutura básica da Figura 6, em que cada elemento do cromossomo representa:

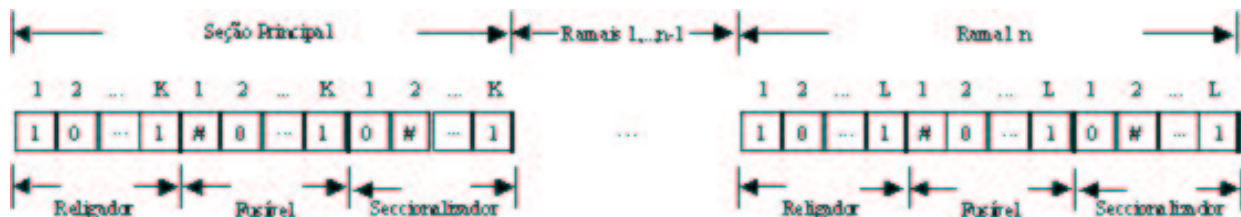


Figura 6. Esquema de codificação do cromossomo – Alocação ótima da proteção

$X_{ijk}=1$: Alocar dispositivo de proteção no alimentador ou ramal i , no ponto j e do tipo k ;

$X_{ijk}=0$: Idem, não alocar;

Para o algoritmo genético do tipo intermediário, adotou-se que uma parcela das posições de cada indivíduo fique indeterminada, ou seja:

$X_{ijk} = \#$: Não está definida a situação quanto alocar ou não o dispositivo de proteção no alimentador ou ramal i , no ponto j e do tipo k .

Função Adaptação

A função de adaptação utilizada é composta da função objetivo do problema de alocação ótima e de termos que representam as penalizações da configuração sob análise devido à violação de restrições do problema. Dessa forma a função adaptação utilizada neste trabalho é representada pela seguinte equação:

$$F_{adaptacao} = FO + \sum_{i=1}^M \mu_i |b_i|$$

Em que:

FO : Função objetivo do problema de alocação ótima de dispositivos de proteção;

μ_i : Termo de penalidade da restrição i ;

$|b_i|$: Especifica o quanto a restrição i está violada;

M : Número total de restrições do problema.

Esquema de Seleção

Na solução do problema de alocação ótima, utilizou-se o esquema de seleção por torneio tanto para o algoritmo genético básico como para o intermediário.

Recombinação e Mutação

A recombinação utilizada foi de um único ponto e o tipo de mutação simples.

Critério de Convergência

O critério de convergência adotado foi o número máximo de iterações permitido.

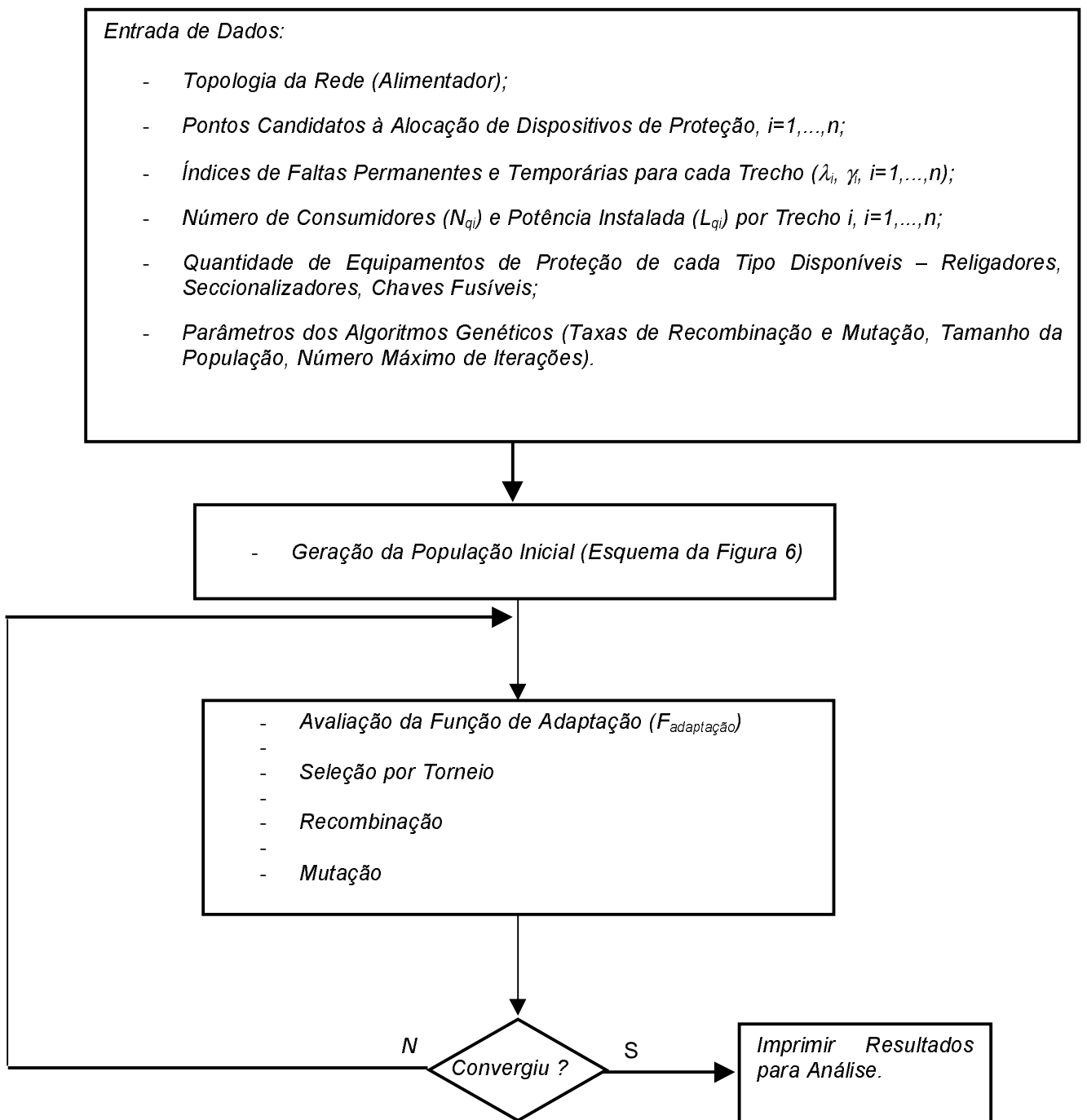


Figura – 7: Estrutura Geral do Algoritmo Implementado

4 RESULTADOS

Com o programa computacional implementado em linguagem *FORTTRAN*, foram simulados dois alimentadores com 9, 18 e 20 pontos possíveis para alocação ótima de equipamentos de proteção. Utilizou-se uma taxa de recombinação (*TR*) igual a 0,75, uma taxa de mutação (*TM*) igual a 0,05. Os testes foram realizados através do uso dos Algoritmos Genético Básico e Intermediário. Para fins de análise

consideram-se boas soluções aquelas que apresentam menores índices de confiabilidade da rede (*ICR*).

4.1 – Circuito com 9 pontos possíveis para alocação

Seja o circuito aéreo radial simples (circuito –1) mostrado na Figura 8 com nove possibilidades de alocação de dispositivo de proteção [5] e as taxas de faltas na Tabela 1.

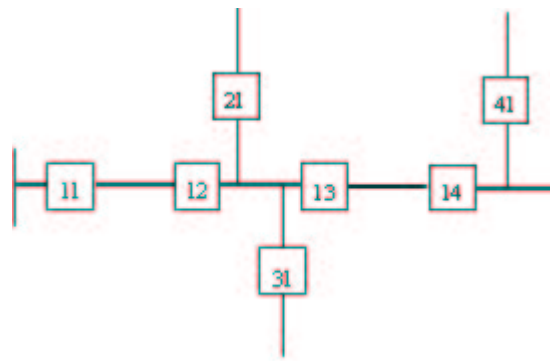


Figura 8. Circuito Radial com 9 Pontos.

TABELA 1. TAXAS DE FALTAS PERMANENTE E TEMPORÁRIA, NÚMERO DE CLIENTE E CARGA MÉDIA DE CADA SEÇÃO PARA O CIRCUITO – 1.

Seção	λ_{qi}	γ_{qi}	N_{qi}	L_{qi} (kVa)
11	0.80	1.20	1600	4100
12	0.80	1.40	1600	1000
13	0.90	1.60	1000	1600
14	0.70	1.00	800	800
21	0.90	2.00	500	2250
31	0.80	2.80	400	300
41	1.00	3.20	200	1000
51	0.50	0.70	200	450
22	0.70	1.70	300	350

As restrições para este alimentador foram:

- Há somente três religadores disponíveis;
- Não há nenhuma limitação no número de fusíveis que podem ser alocados;
- Coordenação adequada entre religadores nos locais 12 e 13 não é possível;
- Fusíveis não podem ser instalados no alimentador principal;

- Número máximo de religadores em série é igual a dois (2);

- Um fusível ou um religador deve ser alocado em todos os ramais;

- Haverá um disjuntor no local 11;

- Todos os ramais são de categoria 3.

Os resultados obtidos nestes testes são apresentados a seguir.

TABELA 2. SOLUÇÕES EM RELAÇÃO AOS NÚMEROS DE CLIENTES. CIRCUITO-1.

Resultados	Religadores	Fusíveis	F.O.	ICR
1*	12/14/21	22/31/41/51	18780,00	2,84
2	12/14/31	21/22/41/51	19420,00	2,94
3	12/14/41	21/22/31/51	19500,00	2,95

TABELA 3. SOLUÇÕES EM RELAÇÃO À CARGA MÉDIA INSTALADA. CIRCUITO-1.

Resultados	Religadores	Fusíveis	F.O.	ICR
1*	12/14/21	22/31/41/51	21440,00	1,80
2	12/21/41	22/31/51	22870,00	1,93
3	12/14/41	21/22/31/51	23500,00	1,98

4.2 – Circuito com 18 pontos possíveis para alocação

Seja o circuito aéreo radial simples (circuito – 2) mostrado na Figura 9 com dezoito possibilidades de

alocação de dispositivo de proteção [4] e demais dados na Tabela 4.

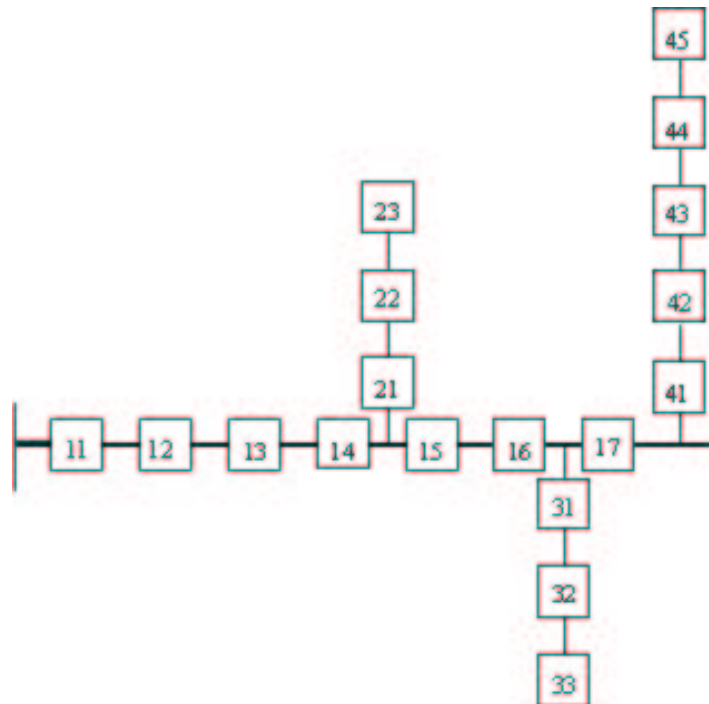


Figura 9. Circuito Radial Simples com 18 Pontos.

TABELA 4. TAXAS DE FALTAS PERMANENTE E TEMPORÁRIA, NÚMERO DE CLIENTE E CARGA MÉDIA DE CADA SEÇÃO PARA O CIRCUITO – 2.

Seção	λ_{qi}	γ_{qi}	N_{qi}	L_{qi} (kVa)
11	0.365	1.460	544	1743
12	0.440	1.758	506	1129
13	0.083	0.330	25	650
14	0.037	0.149	157	5883
15	0.275	1.101	138	114
16	0.123	0.491	527	1683
17	0.256	1.024	662	800
21	0.195	0.780	0	0
22	0.183	0.732	0	0
23	0.003	0.013	2	5782
31	0.151	0.607	101	60
32	0.113	0.454	130	105
33	0.084	0.337	146	113
41	0.236	0.943	26	174
42	0.190	0.761	34	54
43	0.215	0.858	26	98
44	0.236	0.944	7	2
45	0.153	0.612	87	306

As restrições para este alimentador foram:

- Há somente quatro religadores disponíveis;
- Não há nenhuma limitação no número de fusíveis que podem ser alocados;
- Número máximo de religadores em série é igual a dois (2);
- Coordenação adequada entre religadores nos locais 12 e 13, 13 e 14, 15 e 16 não é possível;

- Fusíveis não podem ser instalados no alimentador principal;
- Fusíveis não podem ser instalados a jusante dos religadores;
- Haverá um disjuntor no local 11;
- Os ramos cujos os nós iniciais são 21, 31 e 41 são de categoria 3.

TABELA 5. SOLUÇÕES EM RELAÇÃO AOS NÚMEROS DE CLIENTES. CIRCUITO-2.

Resultados	Religadores	Fusíveis	<i>F.O.</i>	<i>ICR</i>
1*	12/21/31/41	23/45	11511,5	3,69
2	12/31/41	21/23/33	11771,7	3,77
3	15/21/31/41	32/44/45	13446,2	4,31

TABELA 6. SOLUÇÕES EM RELAÇÃO À CARGA MÉDIA INSTALADA. CIRCUITO-2.

Resultados	Religadores	Fusíveis	<i>F.O.</i>	<i>ICR</i>
1*	12/15/21	22/23/31/33/4	52221,5	2,79
2	12/31/41	21/23/33	53222,9	2,85
3	12/21/31/41	22/23/32/42	55958,5	3,00

4.2 – Circuito Real com 20 pontos possíveis para alocação

Seja o circuito aéreo radial simples (circuito – 3) mostrado na Figura 10 com vinte possibilidades de

alocação de dispositivo de proteção e demais dados na Tabela 7.

TABELA 7. TAXAS DE FALTAS PERMANENTE E TEMPORÁRIA, NÚMERO DE CLIENTE E CARGA MÉDIA DE CADA SEÇÃO PARA O CIRCUITO – 3.

Seção	λ_{qi}	γ_{qi}	N_{qi}	L_{qi} (kVa)
1	0,315	1,55	185	195
7	0,520	1,20	136	112,5
9	0,072	0,96	54	232,5
37	0,063	1,10	36	132,5
47	0,410	1,80	36	127,5
62	0,050	0,89	31	132,5
77	0,220	0,77	1	20
89	0,410	0,33	122	232,5
92	0,640	0,64	160	532,5
103	0,095	0,55	156	727,5
10	0,164	0,65	335	750
23	0,09	0,73	295	810
40	0,215	0,44	100	382,5
48	0,320	0,69	160	370
49	0,510	0,75	164	300
63	0,080	0,95	155	760
78	0,815	0,86	17	75
79	0,900	0,81	159	845
90	0,055	0,63	39	637,5
97	0,955	0,98	52	282,5

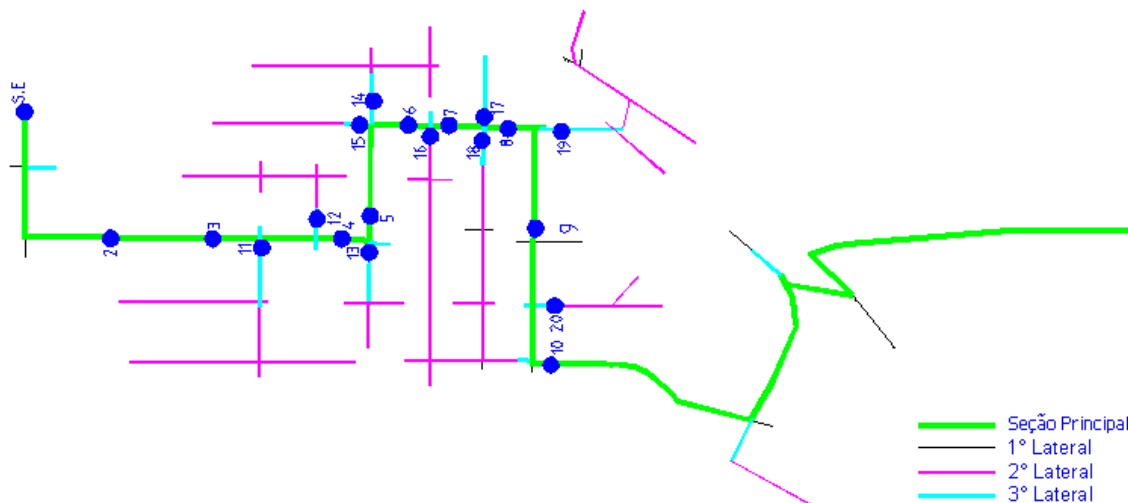


Figura 10 Circuito Radial com 20 Pontos

As restrições impostas para este alimentador foram:

- Há somente quatro religadores disponíveis;
- Não há nenhuma limitação no número de fusíveis que podem ser alocados;

- Número máximo de religadores em série é igual a dois (2);
- Fusíveis não podem ser instalados no alimentador principal;
- Haverá um disjuntor no local 1;
- Todos os ramais são de categoria 3.

TABELA 8. SOLUÇÕES EM RELAÇÃO AOS NÚMEROS DE CLIENTES. CIRCUITO-3.

Resultados	Religadores	Fusíveis	<i>F.O.</i>	<i>ICR</i>
1*	5/7/11/12	13/14/15/16/17/18/19/20	6770,86	2,829
2	2/7/14/15	11/12/13/16/17/18/19/20	6900,35	2,883
3	2/7/15/16	11/12/13/14/17/18/19/20	7080,81	2,958

TABELA 9. SOLUÇÕES EM RELAÇÃO À CARGA MÉDIA INSTALADA. CIRCUITO-3.

Resultados	Religadores	Fusíveis	<i>F.O.</i>	<i>ICR</i>
1*	5/9/12/17	11/13/14/15/16/18/19/20	20741,49	2,708
2	5/9/11/17	12/13/14/15/16/18/19/20	20790,16	2,715
3	5/12/17/20	11/13/14/15/16/17/18/19	21599,77	2,820

Nos testes realizados com os sistemas analisados, a metodologia proposta encontrou soluções de boa qualidade que atendem as restrições impostas. Para cada simulação obtém-se um conjunto de propostas de soluções de boa qualidade, que permitem aos engenheiros e técnicos das empresas, interferirem no processo de decisão e adotar aquela que julgar mais adequada sob os aspectos de operação e manutenção da rede.

As soluções obtidas considerando o número de clientes e a carga média instalada são diferentes, mostrando que dependendo das características das cargas do alimentador sob estudo – residencial, comercial, industrial, deve-se levar em consideração um desses parâmetros.

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi proposta uma formulação que considera a influência dos dispositivos de proteção nos indicadores dos índices de confiabilidade dos alimentadores de distribuição.

As técnicas de solução proposta para resolver este problema de alocação ótima de dispositivo de proteção, que é um problema de programação não-linear inteiro do tipo binário (0/1), foram através de algoritmos evolutivos do tipo genético. A metodologia proposta é flexível sendo aplicada para análise e estudos de alimentadores reais, e fornece como resultado um conjunto de soluções alternativas juntamente com a melhor solução para o problema.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as empresas do Grupo Rede, Companhia Nacional de Energia Elétrica (Catanduva – SP) e Empresa de Eletricidade Vale Parapanema S/A (Assis – SP), pelo financiamento deste projeto de pesquisa.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Comitê de Distribuição da Eletrobrás (1982). "Proteção de Sistemas Aéreos de Distribuição" Centrais Elétricas Brasileiras – Eletrobrás – Rio de Janeiro, Campus Eletrobrás.
- [2] Kagan et al. (1997). Otimização da Qualidade de Fornecimento pela Localização de Dispositivos de Proteção e Seccionamento em Redes de Distribuição, Anais do II Seminário Brasileiro Sobre Qualidade de Energia Elétrica (Digital -CD), São Lourenço – MG.
- [3] Soudi F. e Tomsovic K. (1998). Optimized Distribution Protection Using Binary Programming, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 1, pp 218-224.
- [4] Soudi F. e Tomsovic K. (1999). Optimal Distribution Protection Design: Quality of Solution

and Computational Analysis, International Journal on Electric Power and Energy Systems, Vol. 21, pp.327-335.

- [5] Soudi F. e Tomsovic K. (2001). Optimal Trade-Offs in Distribution Protection Design, IEEE Transactions on Power Delivery, pp 292-296
- [6] Furtado, J. C. (1998). Algoritmo Genético Construtivo na Otimização de Problemas Combinatoriais de Agrupamento, Tese de Doutorado, apresentada ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- [7] Michalewicz, Z. (1994). Genetic Algorithm + Data Structures = Evolution Programs, 2nd ed., New York: Springer-Verlag.
- [8] Srinivas, M. e Patnaik, L. M. (1994). Genetic Algorithms: a Survey, Computer, Vol. 26, No. 6, pp. 28-43.