

---

# SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE SUPERAÇÃO DE DISJUNTORES PELA ALOCAÇÃO ÓTIMA DE DISPOSITIVOS LIMITADORES DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS

**Clarissa S. Ferreira\***  
clarissa@eletrobras.com

**Carmen L.T. Borges†**  
carmen@dee.ufrj.br

\*Eletrobrás - Centrais Elétricas Brasileiras S.A.  
Av. Mal Floriano, 14, Rio de Janeiro, RJ

†COPPE/UFRJ - Programa de Engenharia Elétrica  
Caixa Postal 68504 - CEP 21941-972 - Rio de Janeiro - RJ

---

## RESUMO

Este artigo apresenta uma metodologia para auxiliar nos estudos de limitação de correntes de curto-circuito em sistemas elétricos com problemas de superação de disjuntores, através da alocação ótima de dispositivos limitadores. O problema de otimização é solucionado aplicando-se Algoritmos Genéticos e levando em consideração os requisitos de custo mínimo, alocação de um número mínimo de dispositivos e a máxima redução da corrente de curto-circuito. A detecção da superação do disjuntor é feita pela análise tanto da corrente de curto-circuito que o disjuntor deve interromper como também da relação X/R do sistema. O modelo computacional desenvolvido utiliza de modo integrado o programa ANAFAS do CEPEL, mantendo a compatibilidade com as bases de dados utilizadas em estudos de curto-circuito no setor elétrico brasileiro. Os resultados obtidos com o sistema IEEE14 e com um sistema real brasileiro de grande porte comprovam a robustez do modelo, apresentando soluções que satisfazem às restrições com custo de investimento reduzido para todos os cenários analisados.

**PALAVRAS-CHAVE:** Dispositivos Limitadores de Corrente,

Curto-Circuito, Algoritmos Genéticos.

## ABSTRACT

This paper presents a methodology for helping in short-circuit limiting studies via the indication of the optimal allocation of fault current limiters in systems where the breaker interruption capability is exceeded. The methodology is modeled as an optimization problem using Genetic Algorithms, taking into consideration the objectives of minimum cost, minimum number of allocated fault current limiters and maximum reduction of the short-circuit level at the system buses. The computational tool developed uses the ANAFAS program to calculate the short-circuit current in order to keep the compatibility with the data base used in short-circuit studies in the Brazilian electricity sector. The methodology has been tested using the IEEE14 system and an actual Brazilian system. The results have confirmed the robustness of the methodology in finding solutions that satisfy the constraints with reduced investments cost for all the analyzed scenarios.

**KEYWORDS:** Fault Current Limiter, Short-circuit, Genetic Algorithm.

---

Artigo submetido em 11/08/2006  
1a. Revisão em 02/10/2006  
2a. Revisão em 31/05/2007  
Aceito sob recomendação do Editor Associado  
Prof. Denis Vinicius Coury

# 1 INTRODUÇÃO

A contínua expansão dos sistemas elétricos de potência, no sentido de atender ao crescimento da demanda, tem levado a um aumento significativo dos níveis de curto-circuito. As correntes de curto-circuito podem apresentar níveis superiores aos valores nominais e de operação dos equipamentos por onde circulam, podendo causar danos e comprometer a integridade do sistema ou reduzir a vida útil desses equipamentos. Uma solução utilizada para reduzir o risco desses danos é a utilização de dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito – DLC. Na ocorrência de curto-circuito, os DLCs atuam rapidamente limitando a corrente a níveis suportados pelos componentes elétricos do sistema, evitando assim a necessidade de substituição dos mesmos.

Nos tempos atuais, este tema tem despertado interesse crescente, visto que muitos equipamentos instalados no sistema elétrico brasileiro estão no limiar de superação, devido à expansão da rede. Em (Amon e Hartung, 2001) é relatado que a conexão de produtores independentes à rede básica contribui para o aumento da corrente de curto-circuito para níveis não previstos anteriormente em estudos de planejamento a longo prazo. São descritas diversas soluções para o problema, entre elas, a utilização de dispositivos limitadores de corrente de curto. Em (Amon, 2001) é apresentada a experiência de FURNAS na limitação das correntes de curto-circuito. São analisadas situações em que a prática de limitação das correntes de curto-circuito vem se tornando cada vez mais necessária para viabilizar novos empreendimentos de geração, com a conexão de produtores independentes à rede básica. Em (ONS, 2002) é estudada a aplicação de DLC em subestações da área Rio que sofrem com o aumento da corrente de curto devido à implantação de novas gerações térmicas na região. Em (Peres e Amon, 1997) é apresentada a recapitação procedida na subestação de Mogi das Cruzes 345/230 kV, com ênfase na análise para inclusão de limitadores de corrente de curto. Mostra que os limitadores foram eficientes na redução de custos de substituição de chaves e disjuntores, bem como de reforços nos barramentos e na malha de terra. Em (ONS, 2004/11) são apresentados os níveis de curto-circuito verificados e esperados no horizonte 2005-2007 nas barras do Sistema Interligado Nacional, com um diagnóstico daquelas que estão com possíveis problemas de superação da capacidade de interrupção dos disjuntores.

O problema de buscar a melhor alternativa para inserção de DLCs é bastante complexo, pois os mesmo podem estar em vários locais, ter diversos valores e serem de diferentes tecnologias. A solução deste problema sem o auxílio de uma ferramenta computacional específica é muito trabalhosa. Na prática, estudam-se diversas alternativas de alocação, avaliando seu desempenho e custo, e escolhe-se a melhor

delas. Ainda assim, só se pode garantir que a solução escolhida é a melhor entre as alternativas estudadas que, muitas vezes, não retratam todas as situações possíveis. Além disso, esta tarefa exige muito tempo entre criação das alternativas, realização dos estudos e análise comparativa dos resultados, o que requer uma equipe de profissionais com conhecimentos específicos. Na literatura nacional, os métodos propostos para inserir DLCs no sistema apresentam procedimentos práticos para a solução do problema, porém sem buscar a solução ótima (Freitas et alii, 2005; Peres e Amon, 1997; ONS, 2002; Arcon e Pinto, 2005). A solução ótima para este problema objetiva encontrar a melhor configuração possível, que resulte no menor custo e diminua a corrente de curto-circuito a níveis nos quais o sistema não tenha mais equipamentos superados.

Esse trabalho apresenta uma metodologia para auxiliar nos estudos de limitação de correntes de curto-circuito pela alocação ótima de DLCs em sistemas com problemas de superação de equipamentos. A detecção da superação é feita somente para disjuntores, através da análise tanto do módulo da corrente de curto-circuito como também da relação  $X/R$  do sistema. Os tipos de curto considerados são os trifásicos e os monofásicos. É estudada, neste trabalho, a inserção no sistema de um tipo de DLC denominado Reator Limitador de Curto-Circuito – RLC, pelo fato de este dispositivo ser de grande uso no Brasil. No entanto, a metodologia desenvolvida pode ser aplicada a diferentes tipos de DLC e por esta razão o termo DLC será mantido ao longo do texto, para caracterizar a generalidade da aplicação. A inserção de DLCs pode ser feita em série com circuitos e transformadores ou seccionando barramentos. Matematicamente, este é um problema de otimização complexo, de variáveis inteiras, difícil de ser solucionado por métodos tradicionais de otimização. Por isso, a metodologia desenvolvida é baseada em Algoritmos Genéticos (AG).

A ferramenta computacional desenvolvida utiliza de modo integrado o programa ANAFAS (Romero e Machado, 1993), desenvolvido pelo CEPTEL, mantendo a compatibilidade com as bases de dados utilizadas em estudos de curto-circuito no setor elétrico brasileiro. A cada solução encontrada pela metodologia, é feito o estudo de fluxo de potência para averiguar se o resultado proposto se comporta em regime permanente sem violar restrições operativas de tensão, carregamento e perdas.

## 2 SUPERAÇÃO DE DISJUNTORES POR CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO E ALOCAÇÃO DE DLC

Os disjuntores devem ser dimensionados para suportarem as ampliações que ocorrerem no sistema durante o período de tempo em que ficam em operação (D'Ajuz et alii, 1985). No caso de ser detectada alguma superação da característica nominal, devem ser estudadas medidas que evitem ou pelo menos adiem a substituição do disjuntor. A detecção da superação de disjuntores é feita levando-se em conta os critérios de superação por corrente de carga, por Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT) e por corrente de curto-circuito. Este trabalho analisa somente a corrente de curto-circuito para a identificação da superação.

### 2.1 Superação por Curto-Circuito

A superação por curto-circuito é caracterizada pela ocorrência de correntes de curto-circuito com magnitudes superiores àquelas definidas como nominais para os disjuntores em análise, em condições normais e de emergência (Kinderman, 2005).

A corrente de curto-circuito é constituída por uma componente periódica, geralmente referida como componente CA, e uma componente aperiódica, denominada componente unidirecional ou CC. Dessa forma, a corrente total de curto-circuito pode ser expressa pela equação (1):

$$I = I_{CA} + I_{CC} \quad (1)$$

A componente CC decai exponencialmente com o tempo, a partir de seu valor inicial  $I_{CC0}$  de acordo com (2):

$$I_{CC} = I_{CC0}e^{-t/\tau} \quad (2)$$

Onde a constante de tempo  $\tau$  vale:

$$\tau = \frac{X}{wR} \quad (3)$$

sendo:

$$w = 2\pi f$$

$X$ ,  $R$  – reatância e resistência equivalente de Thévenin vistas do ponto de falta.

A relação  $X/R$  pode influenciar diretamente na capacidade de interrupção de curto-circuito de um equipamento, pois

quanto maior for essa relação, mais lento é o decaimento da corrente.

Assim, para identificar a superação por curto-circuito é preciso avaliar se o valor máximo da corrente de curto é superior à corrente nominal suportada pelo disjuntor e se a relação  $X/R$  é muito elevada (ONS, 2004/11). Estas análises devem ser feitas considerando-se curtos-circuitos monofásicos e trifásicos.

### 2.2 Alocação de DLC

Quando é detectada a superação de disjuntores por corrente de curto-circuito, as medidas adotadas para limitação dessa corrente podem ser divididas em medidas operativas, modificação da configuração da rede, recapacitação da subestação com substituição dos equipamentos e utilização de dispositivos limitadores de curto-circuito. Este trabalho explora somente a última alternativa para eliminação da superação.

O DLC age interrompendo a corrente de curto ou apenas limitando-a para que o disjuntor faça a interrupção. No primeiro caso, a interrupção da corrente deve ser feita em tempos extremamente rápidos de tal forma que o máximo valor da corrente de curto-circuito fique bastante reduzido. No segundo caso, ocorre a inserção de uma impedância elevada no momento do curto, reduzindo a corrente de curto-circuito de forma que o disjuntor da subestação atue, interrompendo-a. Entre os DLCs que agem interrompendo a corrente de curto-circuito, destacam-se os dispositivos pirotécnicos e os disjuntores eletrônicos e, entre os que apenas limitam a corrente, estão os RLCs, os dispositivos FACTS, os transformadores especiais (IPC) e os dispositivos a supercondutores (ONS, 2004/07).

Em princípio, DLCs podem ser instalados seccionando barramentos, em série com os circuitos alimentadores ou em série com os circuitos de saída, conforme apresentado na Figura 1. As vantagens e desvantagens de cada tipo de instalação devem ser analisadas antes da escolha da melhor localização para estes dispositivos, dependendo do problema a ser solucionado (Schmitt et alii, 2004).

O DLC instalado seccionando barramentos na subestação limita a contribuição de um subsistema para a corrente de curto-circuito total do sistema. Neste caso, deve ser analisada a possibilidade das cargas, nas seções de cada barramento, serem equilibradas para se evitar uma corrente de valor elevado passando pelo equipamento que está seccionando os barramentos, provocando perdas no sistema.

O DLC instalado em série com os circuitos alimentadores, limita a contribuição do alimentador para um curto-circuito

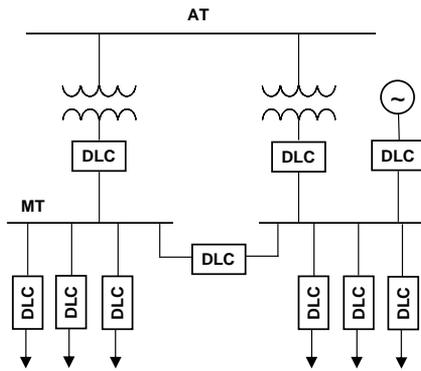


Figura 1: Locais de instalação de DLCs

no sistema, assim como também limita a contribuição do sistema para curtos no próprio alimentador. No caso do DLC instalado em série com os circuitos de saída, ocorre a redução da corrente de curto-circuito no circuito no qual está instalado o DLC, o que pode resultar em menores perdas e melhor regulação de tensão em relação ao caso anterior.

### 3 METODOLOGIA DESENVOLVIDA

A metodologia de alocação ótima de DLCs foi desenvolvida considerando as seguintes premissas:

- O sistema não pode ter nenhum disjuntor superado por corrente de curto-circuito;
- Deve ser feita a inserção de um número reduzido de DLCs no sistema;
- Quanto mais o nível de curto-circuito nas barras do sistema diminuir, melhor será esta solução perante às demais;
- A inserção de DLCs não pode causar prejuízo à operação do sistema em regime permanente, ou seja, tanto as perdas quanto a queda de tensão provocada pelos DLCs não devem atingir valores muito elevados.

#### 3.1 Modelagem Matemática

O modelo matemático do problema de otimização a ser solucionado pode ser descrito como:

$$\min_{\zeta} [C(\zeta) + k_1 nDLC + k_2 (I_{curto3f_i} - I_{curton_i}) + k_3 (I_{curto1f_i} - I_{curton_i})], \quad i = 1, \dots, Nb \quad (4)$$

s.a.

$$a(I_{curto3f_i}) \leq I_{curton_i} \quad (5)$$

$$a(I_{curto1f_i}) \leq I_{curton_i} \quad (6)$$

$$X/R3f_i \leq b \quad (7)$$

$$X/R1f_i \leq b \quad (8)$$

onde:

$\zeta$  - configuração de instalação de DLCs;

$C(\zeta)$  - custo de instalação de DLCs da configuração  $\zeta$ ;

$nDLC$  - número de DLCs inseridos no sistema;

$k_1, k_2, k_3$  - fatores de ponderação;

$I_{curto3f_i}$  - corrente de curto-circuito trifásico na barra  $i$ ;

$I_{curto1f_i}$  - corrente de curto-circuito monofásico na barra  $i$ ;

$I_{curton_i}$  - corrente de curto máxima suportada pela barra  $i$ ;

$Nb$  - número de barras do sistema;

$a$  - porcentagem da corrente de curto máxima suportada pela barra, de modo a garantir que não tenha problemas de disjuntores superados;

$X/R3f_i$  - relação  $X/R$  trifásica da barra  $i$ . É definida como sendo a relação  $X/R$  da rede equivalente de seqüência positiva no ponto de falta;

$X/R1f_i$  - relação  $X/R$  monofásica da barra  $i$ . É definida como sendo a relação  $X/R$  da rede equivalente de seqüência positiva, negativa e zero no ponto de falta.

$b$  - valor da relação  $X/R$  máxima de cada barra, para garantir que o sistema não tenha problemas de disjuntores superados.

Os valores de  $a$  e  $b$  podem ser obtidos das inequações (9) a (13), definidas de acordo com (ONS, 2004/11), para caracterizar as condições indicativas de ocorrência de superação:

$$X_i/R_i < 16,96 \text{ e } I_{curto_i} > 90\%I_{curton_i} \quad (9)$$

$$16,96 \leq X_i/R_i < 22,62 \text{ e } I_{curto_i} > 85\%I_{curton_i} \quad (10)$$

$$22,62 \leq X_i/R_i < 28,28 \text{ e } I_{curto_i} > 80\%I_{curton_i} \quad (11)$$

$$X_i/R_i \geq 28,28 \text{ e } I_{curto_i} > 70\%I_{curton_i} \quad (12)$$

$$X_i/R_i \geq 45,24 \quad (13)$$

A parcela  $C(\zeta)$  da função objetivo visa que a solução encontrada tenha custo mínimo e a parcela  $k_1 nDLC$  visa que seja inserido o número mínimo de DLCs no sistema. As parcelas  $k_2(I_{curto3f_i} - I_{curton_i})$  e  $k_3(I_{curto1f_i} - I_{curton_i})$  visam que as soluções que mais diminuem o nível de curto-circuito trifásico e monofásico, respectivamente, sejam beneficiadas perante as demais.

### 3.2 Solução por Algoritmos Genéticos

Este problema de otimização foi resolvido aplicando Algoritmos Genéticos (AG). Os Algoritmos Genéticos são métodos heurísticos de otimização baseados no processo de evolução natural das espécies. Para tanto, define-se uma população inicial que terá sua evolução definida por operadores genéticos. São três os operadores presentes na maioria dos AG: seleção, cruzamento e mutação. Cada indivíduo da população é caracterizado por um cromossoma, que representa uma possível solução para o problema. Detalhes sobre Algoritmos Genéticos podem ser encontrados em (Goldberg, 1989).

Com o objetivo de ampliar a região de busca da solução ótima, algumas opções foram implementadas no AG. O número de indivíduos da população inicial e o número máximo de gerações podem ser variados. Para a seleção, pode ser escolhido o método da roleta ou do torneio, sendo possível associar o elitismo ao processo evolutivo. O cruzamento pode ser de um ponto, de dois pontos ou uniforme e a taxa de cruzamento pode ser alterada. A mutação utilizada é a mutação por troca de bit e a taxa de mutação pode ser um valor previamente definido ou variar como uma exponencial decaindo ao longo do processo (Chipperfield et alii, 1994).

Na metodologia desenvolvida, a cada geração do processo evolutivo do AG, são simulados curtos-circuitos em todas as barras do sistema para todas as soluções de alocação geradas, usando o programa ANAFAS de modo integrado. Os resultados são comparados com o nível máximo admissível para cada barra. Se a corrente de curto de alguma barra for maior do que o valor máximo tolerado, o processo evolutivo de busca pela solução ótima continua, através da aplicação dos operadores genéticos característicos do AG.

Considerou-se o nível máximo de curto suportado por cada barra do sistema como sendo igual à capacidade do disjuntor conectado à barra, que possui a menor capacidade de interrupção de corrente de curto-circuito. Apesar de conservativo, este critério foi adotado em função da dificuldade de considerar apenas a contribuição da corrente de curto-circuito que passa pelo disjuntor para avaliação da superação da capacidade do mesmo, utilizando o relatório de saída do programa ANAFAS.

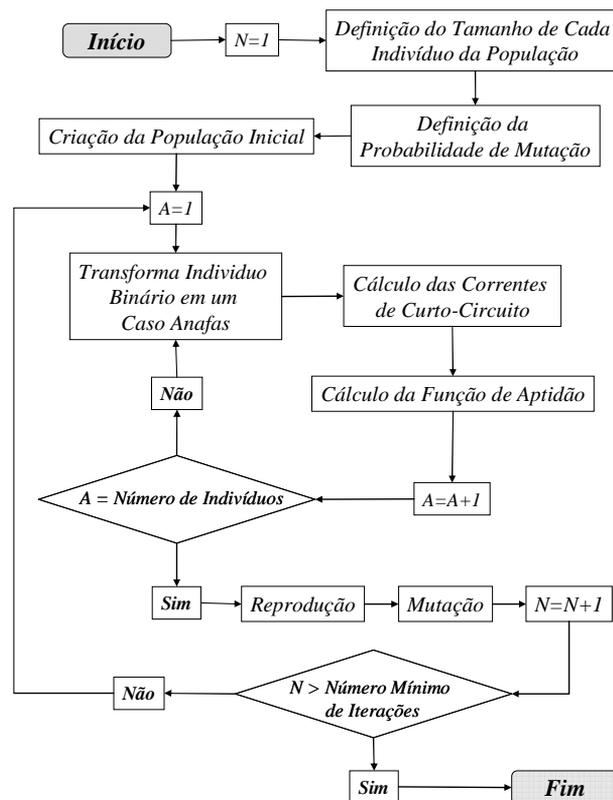


Figura 2: Fluxograma do modelo computacional

Para saber se a corrente de curto-circuito que passa por determinado disjuntor supera ou não a capacidade do mesmo, esta corrente foi suposta como sendo a corrente calculada simulando curto-circuito na barra na qual se liga a linha onde está localizado o disjuntor. Esta aproximação foi feita para simplificar o processo de comparação dos níveis de curto-circuito. Vale lembrar, no entanto, que nos estudos finais de superação deve-se analisar com mais detalhes o local de ocorrência do curto, simulando as condições de curto na barra, curto na linha e a condição de *line-out* para definir qual a maior corrente de curto que pode passar pelo disjuntor (D'Ajuz et alii, 1985; Amon et alii, 2005).

O fluxograma do modelo computacional desenvolvido está mostrado na Figura 2, explicitando a integração com o programa ANAFAS.

A análise do sistema em regime permanente é feita separadamente. Depois que o processo de busca estiver encerrado, simula-se em regime permanente o resultado ótimo encontrado pelo processo, para averiguar se a configuração resultante se comporta de forma adequada, sem violar os níveis de tensão do sistema, sem que exceda o carregamento dos circuitos e sem que as perdas atinjam valores muito elevados.

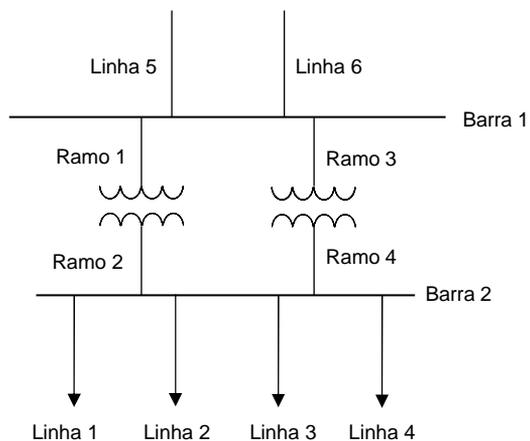


Figura 3: Sistema exemplo

Caso a solução encontrada viole as condições de operação em regime, esta configuração é descartada da lista de possíveis soluções e uma nova busca da solução ótima deve ser realizada. Em geral, a nova solução não deverá diferir em muito da anterior, o que faz com que a convergência do novo processo de otimização seja mais rápido.

### 3.3 Estrutura do Cromossomo

A fim de exemplificar a estrutura do cromossomo utilizado, considere o exemplo mostrado na Figura 3. Para cada solução candidata do problema, é criado um cromossomo, cujos bits são definidos da forma descrita a seguir.

Para cada linha ou ramo existente são reservados 4 bits do cromossomo, conforme Figura 4. O primeiro bit dá a informação se a linha ou o ramo terá ou não DLC inserido em série, e os três últimos bits informarão o valor do DLC a ser inserido, conforme Tabela 1, baseada nos valores típicos de RLC. Se o primeiro bit for 0, significa que não será inserido DLC e assim, os demais bits não terão influência na solução.

Para o caso do seccionamento de barras, a estrutura do cromossomo está mostrada na Figura 5, onde observa-se que o número de bits do cromossomo reservado para cada barra depende de quantos circuitos estão ligados a ela. A barra original será seccionada dando origem a duas seções de barras separadas por um DLC, onde para os bits iguais a 0, os circuitos associados serão agrupados em uma seção e os circuitos correspondentes aos bits iguais a 1 serão agrupados na outra seção. Esta forma de representar os DLCs nas barras tem a vantagem de não permitir que a mesma barra seja seccionada mais de uma vez, caso este que seria inviável na prática.

De forma similar ao caso das linhas, os DLCs inseridos seccionando as barras também podem ter 8 valores

Tabela 1: Valores de RLC utilizados

Seq. Bits	000	001	010	011	100	101	110	111
DLC ( $\Omega$ )	5	10	12	15	18	20	25	30

diferentes, não necessariamente iguais aos valores para os circuitos. Para o exemplo da Figura 3, a parte do cromossomo responsável por seccionamento de barras poderia ficar como mostrado na Figura 6. Neste caso, a barra 1 tem 4 bits representando os 4 circuitos conectados a ela mais 3 bits para o valor do DLC, totalizando 7 bits. Já para a barra 2 são reservados 9 bits, onde 6 deles representam os circuitos conectados e 3 são reservados para o valor do DLC. Se os bits que indicam os circuitos que estão conectados à barra forem todos 1 ou todos 0, a barra não será seccionada, como ocorre com a barra 1 do exemplo.

O cromossomo completo é montado combinando-se os dados dos circuitos com os das barras. O cromossomo do exemplo terá então a estrutura mostrada na Figura 7. Para este caso, os DLCs estariam inseridos conforme mostrado na Figura 8.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Sistemas Testes

Os testes foram feitos utilizando dois sistemas distintos: o sistema IEEE14 e um sistema real de uma concessionária brasileira. O diagrama unifilar do sistema IEEE14 está mostrado na Figura 9.

A base de dados de curto-circuito e de fluxo de potência do caso real foi extraída de (ELETROBRÁS, 2003), tendo sido feito um equivalente para manter apenas a parte da do sistema com disjuntores superados. O sistema equivalente tem 41 linhas, 21 transformadores e 58 barras, sendo 37 barras reais e 21 barras fictícias (para representar o ponto central de cada transformador).

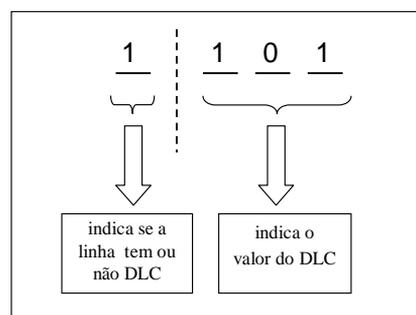


Figura 4: Bits do cromossomo para cada linha

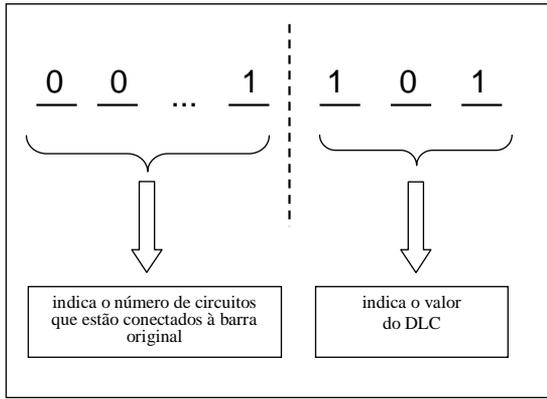


Figura 5: Bits do cromossomo para as barras do sistema

Os custos adotados dos RLCs estão indicados na Tabela 2, baseados nos custos de alguns reatores existentes em (ELETROBRÁS, 2004).

Para cada sistema, foram realizados dois testes, a saber:

Teste 1: Atendimento aos requisitos de mínimo custo e mínimo número de DLCs inseridos no sistema. Para tanto, os valores de  $k_2$  e  $k_3$  são feitos iguais a zero.

Teste 2: Atendimento aos requisitos de mínimo custo, mínimo número de DLCs inseridos no sistema e máxima redução da corrente de curto.

Tabela 2: Custos dos RLCs - Unidades Monetárias (UM)

RLC ( $\Omega$ )	230kV	138kV	69kV
5	16,8	12,0	10,0
10	20,2	14,4	12,0
12	21,5	15,4	12,8
15	23,5	16,8	14,0
18	25,5	18,2	15,2
20	26,9	19,2	16,0
25	30,2	21,6	18,0
30	33,6	24,0	20,0

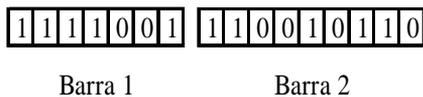


Figura 6: Parte do cromossomo relativa às barras

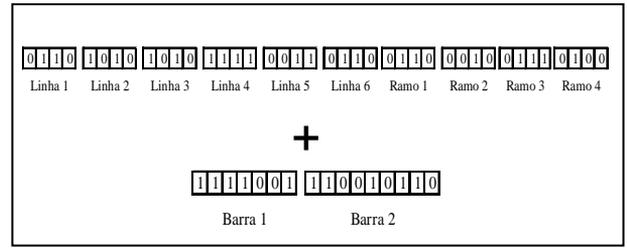


Figura 7: Representação completa do cromossomo

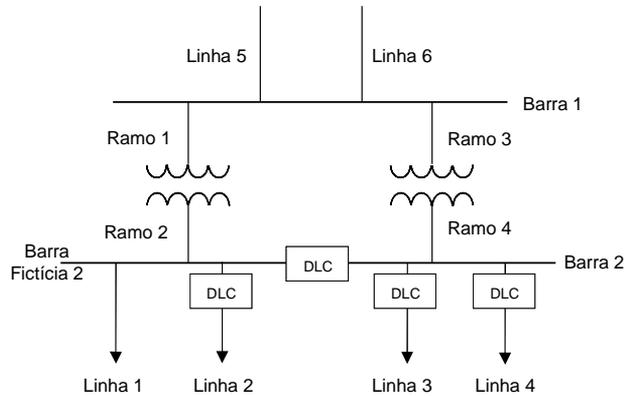


Figura 8: DLCs inseridos para o cromossomo da Fig. 7

## 4.2 Resultados do IEEE14

O caso base do sistema IEEE14 possui os valores de corrente de curto (kA) e relação X/R listados na Tabela 3. Os valores de curto-circuito máximo suportado pelas barras foram arbitrados a fim de validar a metodologia, tendo em vista que estas informações não estão disponíveis para o sistema IEEE14. A corrente de curto-circuito trifásico na barra 8 vale 89% de  $I_{curton}$  e, portanto, a barra está superada pela relação  $X/R$ , visto que o valor do curto-circuito está entre 85% e 90% de  $I_{curton}$  e a relação  $X/R$  está entre 16,96 e 22,62. As barras 5, 6 e 9 estão superadas por corrente de curto-circuito máxima, uma vez que a corrente de curto-circuito trifásico é maior que 90% de  $I_{curton}$ . As perdas totais no caso base correspondem a 4,49% da capacidade instalada.

### 4.2.1 Teste 1

Os parâmetros do AG e constantes utilizadas foram:

- Tamanho da população: 200;
- Número máximo de gerações: 200;
- Taxa de cruzamento: 0,7;
- Operador de cruzamento: dois pontos;

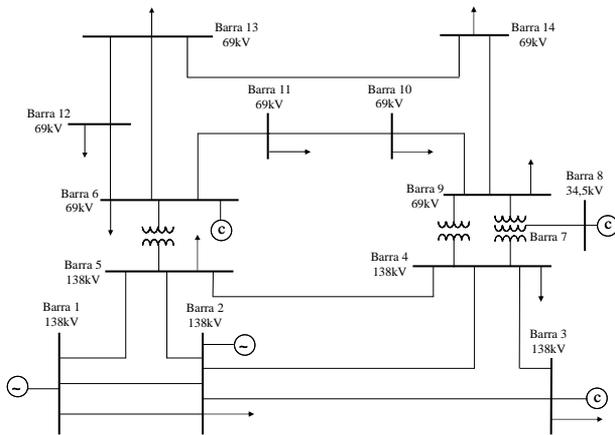


Figura 9: Diagrama unifilar do sistema IEEE14

Tabela 3: Valores de curto do caso base do IEEE14

Barra	Icurto3f	X/R3f	Icurto1f	X/R1f	Icurton
1	8,35	12,45	3,10	3,88	12,0
2	8,24	9,10	3,50	3,64	12,0
3	3,78	3,62	2,21	2,03	5,2
4	4,98	4,01	4,27	4,33	5,6
5	4,96	4,56	4,13	5,20	5,4
6	5,54	6,29	2,14	2,01	6,0
8	8,33	19,10	7,40	21,80	9,4
9	4,98	4,76	4,72	5,30	5,4
10	3,94	3,66	3,00	3,25	5,5
11	3,49	3,24	2,03	2,38	5,0
12	2,78	2,36	1,38	1,63	4,0
13	3,74	3,04	1,85	1,84	6,0
14	2,80	2,57	1,85	2,08	4,0

- Operador de seleção: roleta;
- Taxa de mutação: 0,005;
- $k_1$  (série) = 0,1 e  $k_1$  (seccionamento) = 0,15;
- $k_2 = k_3 = 0$ .

A solução encontrada foi inserir um RLC de  $10\Omega$  seccionando a barra 4, onde os circuitos 2-4, 3-4 e 4-5 estão em uma seção e os circuitos 4-7 e 4-9 estão na outra seção da barra, e um RLC de  $5\Omega$  seccionando a barra 6, onde os circuitos 6-12 e 6-13 estão em uma seção e os circuitos 6-5 e 6-11 estão na outra seção da barra. O custo total da solução foi 24,4 UM. Com este resultado, os valores de curto ficaram

Tabela 4: Valores calculados após a inserção de RLC

Barra	Icurto3f	X/R 3f	Icurto1f	X/R 1f
5	4,86	4,61	3,98	5,32
6 sec1	4,74	6,95	2,02	2,10
6 sec2	4,93	7,04	2,05	2,17
8	8,06	16,9	7,24	20,12
9	4,68	4,49	4,53	5,08

dentro do aceitável, conforme mostrado na Tabela 4 para as barras que apresentavam valores superados.

Simulou-se o comportamento do sistema em regime permanente e verificou-se que o mesmo se encontra dentro dos limites operativos, com as perdas totais permanecendo inferiores a 5% e todas as tensões entre 0,95 e 1,05 p.u.. O gráfico de convergência do AG para este teste está mostrado na Figura 10.

#### 4.2.2 Teste 2

Os parâmetros do AG e constantes utilizadas foram os mesmos do Teste 1, a menos de:

- Tamanho da população: 150;
- Taxa de mutação: decaimento por exponencial;
- $k_1$  (série) = 2,9 e  $k_1$  (seccionamento) = 3,3;
- $k_2 = k_3 = 0,15$ .

A solução encontrada foi semelhante a do Teste 1, a menos do valor do RLC inserido na barra 4, que passou a ser de  $12\Omega$ .

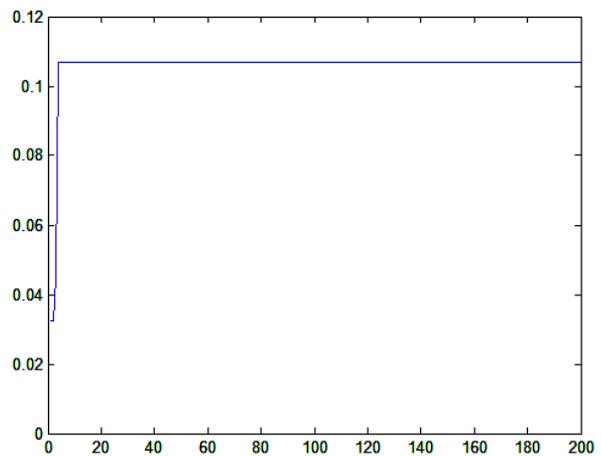


Figura 10: Gráfico de Convergência do AG – Teste 1

Tabela 5: Valores calculados após a inserção de RLC

Barra	Icurto3f	X/R 3f	Icurto1f	X/R 1f
5	4,85	4,63	3,96	5,35
6 sec1	4,73	6,95	2,02	2,10
6 sec2	4,92	7,04	2,05	2,17
8	8,01	16,53	7,21	19,81
9	4,64	4,45	4,50	5,03

Com isso, o custo total da solução foi 25,4 UM, superior ao do Teste 1. No entanto, os valores de curto ficaram inferiores ao do Teste 1, com maior margem em relação aos valores suportados pelas barras, conforme mostrado na Tabela 5.

O comportamento do sistema em regime permanente encontra-se dentro dos limites operativos estabelecidos. O gráfico de convergência do AG para este teste está mostrado na Figura 11.

O tempo de execução em um computador Pentium III 4 MHz foi de 1h17min e 2h, respectivamente, para os Testes 1 e 2.

### 4.3 Resultados do Sistema Real

O caso base do sistema real apresenta as barras com equipamentos superados listadas na Tabela 6, o que corresponde a aproximadamente 16% do total de barras reais do sistema. A capacidade nominal dos disjuntores (*Icurton*) foi extraída de (ONS, 2004/11). As perdas totais no caso base correspondem a 5,31% da capacidade instalada.

Para estes testes, foi permitida a inserção de RLCs nas barras superadas e em todas as barras e circuitos de 230kV do sistema equivalente, totalizando 14 barras e 16 circuitos.

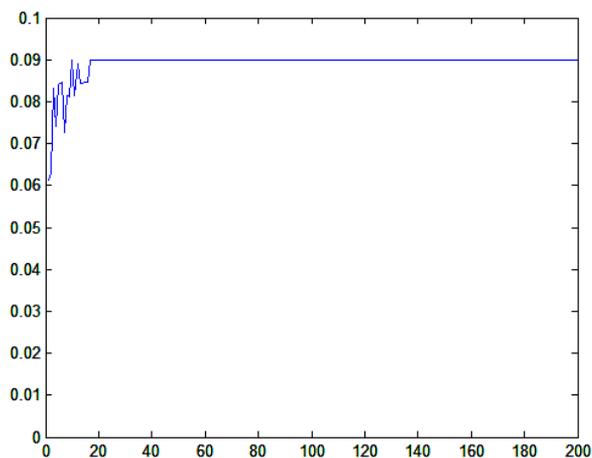


Figura 11: Gráfico de Convergência do AG – Teste 2

Tabela 6: Valores de curto das barras com disjs. superados

Barra	Icurto3f	X/R3f	Icurto1f	X/R1f	Icurton
6142	14,2	8,41	17,9	8,69	14,4
6526	15,6	18,68	19,8	17,26	20,0
7735	21,4	8,66	24,0	8,96	19,9
7795	14,2	6,29	15,3	6,59	14,4
7800	13,7	12,19	16,4	12,09	14,4
7803	12,4	8,90	13,7	9,88	14,4

#### 4.3.1 Teste 1

Os parâmetros do AG e constantes utilizadas foram:

- Tamanho da população: 300;
- Número máximo de gerações: 500;
- Taxa de cruzamento: 0,7;
- Operador de cruzamento: uniforme;
- Operador de seleção: roleta;
- Taxa de mutação: decaimento por exponencial;
- $k_1$  (série) = 2,0 e  $k_1$  (seccionamento) = 2,4;
- $k_2 = k_3 = 0$ .

A solução encontrada consistiu na inserção de 3 RLCs seccionado barras e 1 RLC em circuito, conforme mostrado nas Tabelas 7 e 8, respectivamente.

O custo total da solução é 89,48 UM. A Tabela 9 apresenta os valores de curto após a alocação para as barras que tinham disjuntores superados e para as barras que foram seccionadas, comprovando a ausência de superação no sistema.

As perdas do sistema ficaram em 5,40% da capacidade instalada e a queda de tensão em regime ficou dentro dos limites operativos estabelecidos. O gráfico de convergência do AG para este teste está mostrado na Figura 12.

#### 4.3.2 Teste 2

Os parâmetros do AG e constantes utilizadas foram os mesmos do Teste 1, a menos de:

- Número máximo de gerações: 200;
- $k_2 = k_3 = 0,01$ .

Tabela 7: RLCs inseridos em barras

Barra	RLC ( $\Omega$ )	Custo (UM)	Sec 1	Sec 2
7734	18	25,54	7734-7733 tr1 7734-7733 tr2 7734-7733 tr3 7734-7740 c1 7734-7808 c1	7734-7731 c1 7734-7731 c2 7734-7735 tr1 7734-7735 tr2 7734-7735 tr3 7734-7735 tr4 7734-7794 c1 7734-7794 c2
7794	10	20,16	7794-6142 tr1 7794-7795 tr1 7794-7795 tr2 7794-7795 tr3	7794-6190 c1 7794-6190 c2 7794-7734 c1 7794-7734 c2 7794-7739 c1 7794-7739 c2 7794-7795 tr4
7795	18	18,24	7795-6105 c1 7795-6160 c1 7795-6160 c2 7795-6142 tr1 7795-6142 tr2 7795-6142 tr3	7795-6110 c1 7795-6137 c1 7795-6180 c1 7795-6235 c1 7795-7794 tr1 7795-7794 tr2 7795-7794 tr3 7795-7794 tr4

Tabela 8: RLCs inseridos em circuitos

De	Para	RLC ( $\Omega$ )	Custo (UM)
7800	7802	18	25,54

A solução encontrada consistiu na inserção de 4 RLCs seccionado barras, mostrado na Tabela 10, e o mesmo RLC em circuito do Teste 1, mostrado na Tabela 8. O custo total da solução é 102,82 UM, 14,3% superior ao do Teste 1.

A Tabela 11 apresenta os valores de curto após a alocação para as barras com problemas e para as barras que foram seccionadas, mostrando a redução do nível de curto-circuito em relação ao Teste 1. As perdas do sistema ficaram em 5,41% da capacidade instalada e a queda de tensão em regime também ficou dentro dos limites estabelecidos. O gráfico de convergência do AG para este teste está mostrado na Figura 13.

O tempo de execução foi de aproximadamente 6h20min nos 2 testes realizados para o sistema real.

## 5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos nos testes foram encorajadores e mostraram que este problema pode ser adequadamente

Tabela 9: Valores calculados após a inserção de RLC

Barra	Icurto3f	X/R3f	Icurto1f	X/R1f
6142	9,71	10,63	12,80	10,77
6526	13,10	19,08	16,97	17,75
7735	15,38	8,23	17,74	8,46
7800	7,87	17,64	9,47	17,99
7803	10,89	8,78	12,28	9,77
7734 sec1	11,03	10,60	12,51	10,23
7794 sec1	9,06	7,17	10,41	5,50
7795 sec1	10,65	7,08	11,46	6,94
7734 sec2	19,71	13,86	21,39	13,85
7794 sec2	6,71	8,64	7,48	8,76
7795 sec2	5,18	9,24	6,22	10,03

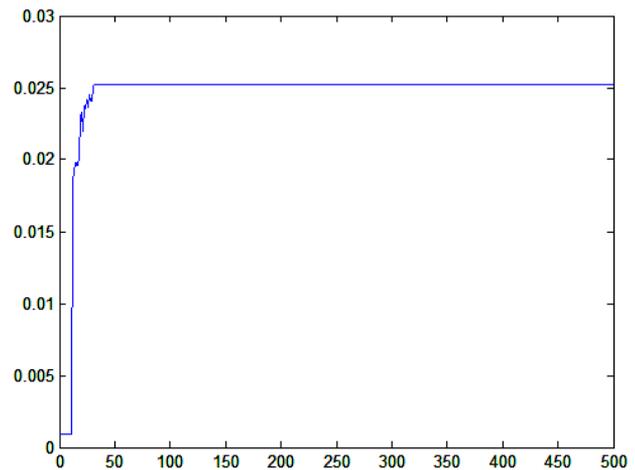


Figura 12: Gráfico de Convergência do AG – Teste 1

resolvido por AG, visto que o algoritmo implementado apresentou robustez ao obter soluções exequíveis para todos os cenários testados.

A utilização do programa ANAFAS para cálculo de curto-circuito possibilita o uso imediato da ferramenta desenvolvida pelos especialistas do setor, tendo em vista a utilização da mesma base de dados utilizada pelo ANAFAS nos estudos de curto-circuito no setor elétrico brasileiro.

O elevado tempo computacional é o preço pago para manter a compatibilidade com o ANAFAS, pois a maior parte do tempo de simulação é devido a escrita/leitura de arquivos para realizar a integração automática com o programa ANAFAS. Quanto maior é o número de barras, circuitos e transformadores do sistema, maior é o tempo de execução do programa.

Tabela 10: RLCs inseridos em barras

Num	RLC ( $\Omega$ )	Custo (UM)	Sec 1	Sec 2
7734	18	25,54	7734-7733 tr1 7734-7733 tr2 7734-7733 tr3 7734-7740 c1 7734-7808 c1	7734-7731 c1 7734-7731 c2 7734-7735 tr1 7734-7735 tr2 7734-7735 tr3 7734-7735 tr4 7734-7794 c1 7734-7794 c2
7794	12	21,50	7794-6142 tr1 7794-7795 tr1 7794-7795 tr2 7794-7795 tr3	7794-6190 c1 7794-6190 c2 7794-7734 c1 7794-7734 c2 7794-7739 c1 7794-7739 c2 7794-7795 tr4
7795	18	18,24	7795-6105 c1 7795-6160 c1 7795-6160 c2 7795-6142 tr1 7795-6142 tr2 7795-6142 tr3	7795-6110 c1 7795-6137 c1 7795-6180 c1 7795-6235 c1 7795-7794 tr1 7795-7794 tr2 7795-7794 tr3 7795-7794 tr4
7803	5	12,00	7803-7800 tr1 7803-7800 tr2 7803-6526 tr1 7803-6526 tr2 7803-6518 c1 7803-6533 c1	7803-7809 c1 7803-6566 c1

Os testes feitos revelaram que não existe apenas uma resposta ótima para o problema, mas sim várias soluções que satisfazem aos objetivos especificados de forma otimizada. Os valores dos parâmetros genéticos e dos fatores de ponderação dos objetivos incluídos na função objetivo devem ser ajustados de forma que se tenha um resultado mais próximo da solução ótima global. Durante os testes, comprovou-se que o AG, para apresentar resultados mais adequados, precisa de um ajuste correto nos parâmetros genéticos. Para os testes realizados, tais parâmetros foram ajustados por tentativas a partir da verificação dos resultados obtidos.

A variação dos valores dos fatores de ponderação pode influenciar no resultado final encontrado, permitindo que se calibre o peso atribuído a cada parcela da função objetivo na solução procurada. Por outro lado, como os valores das parcelas incluídas na função objetivo podem apresentar ordens de grandeza distintas, a calibração desses ponderadores pode ser simplificada aplicando-se a normalização dos valores destas parcelas em relação a algum valor definido (máximo, média, etc).

Tabela 11: Valores calculados após a inserção de RLC

Barra	Icurto3f	X/R3f	Icurto1f	X/R1f
6142	9,59	10,58	12,67	10,72
6526	13,05	19,60	16,91	18,14
7735	15,37	8,24	17,74	8,47
7800	7,83	18,13	9,43	18,40
7803	10,70	9,29	12,12	10,25
7734 sec1	11,03	10,60	12,50	10,23
7794 sec1	9,04	7,19	10,40	5,51
7795 sec1	10,46	7,07	11,32	6,92
7734 sec2	19,71	13,87	21,39	13,86
7794 sec2	6,45	8,74	7,21	8,92
7795 sec2	5,12	9,20	6,17	9,98

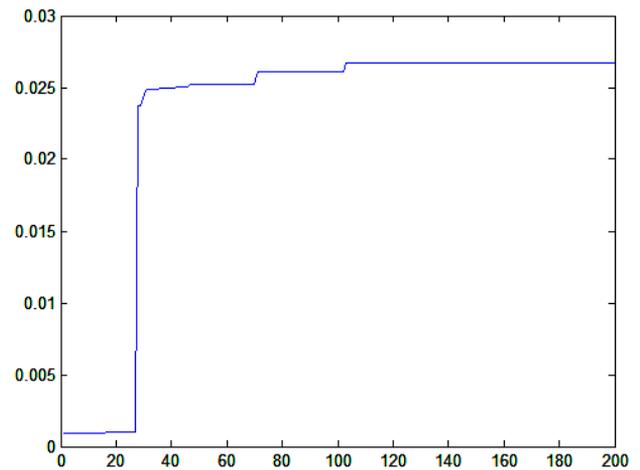


Figura 13: Gráfico de Convergência do AG – Teste 2

A análise do sistema em regime permanente se mostrou necessária para averiguar se a queda de tensão e as perdas no sistema provocadas pelo RLC invalidariam ou não a solução encontrada nas simulações.

É importante ressaltar que nenhuma consideração foi feita sobre a possibilidade de alocar os RLCs nas posições indicadas. Para que as soluções encontradas sejam realmente aplicáveis, é fundamental a identificação em campo de todas as barras e circuitos onde a inserção do reator é permitida.

Além disso, antes da decisão de instalar um RLC, vários outros aspectos devem ser estudados para garantir a viabilidade do projeto, tais como: a análise do desempenho do sistema em regime transitório, a definição das dimensões físicas para o RLC e as especificações das características elétricas. Também é preciso avaliar

o custo das perdas provocadas pelo RLC ao longo dos anos na operação em regime permanente e fazer a análise custo vs. benefício, comparando-se os lucros econômicos decorrentes da limitação de nível de curto-circuito com os custos da substituição dos equipamentos sobrecarregados ou do reforço das instalações.

## REFERÊNCIAS

- Amon, J. F., Hartung, K. H. (2001). “Aplicação de Novas Técnicas de Limitação de Curto-Circuito Face à Conexão de Produtores Independentes à Rede Básica sob o Novo Ambiente Desregulamentado do Setor Elétrico Brasileiro”, *Anais do XVI SNPTEE*, Campinas.
- Amon, J. F. (2001). “Limitação de Curto-Circuito: Novas Tecnologias Já Existentes e em Desenvolvimento”, *Anais do IX ERLAC*, Foz do Iguaçu.
- ONS (2002), *Estudo da Redução de Correntes de Curto-Circuito em Subestações da Área Rio Através da Aplicação de Dispositivos Limitadores*. Relatório Janeiro de 2002.
- Peres, L. P., Amon, J. F. (1997). “Recapacitação da Subestação de Mogi 345/230 kV e Adaptação aos Novos Níveis de Curto-Circuito da Rede”, *Anais XIV SNPTEE*, Belém.
- Roméro, S. P., Machado, P. A. (1993). “ANAFAS – Programa de Análise de Falhas Simultâneas”, *Anais do IV STPC*, Fortaleza.
- ONS (2004/11), *Estudos de Curto-circuito período 2004-2007*, Relatório Novembro de 2004.
- Freitas, R. C., et alii. (2005). “Projeto e Aplicação de Limitadores de Corrente Elétrica – Supercondutores Resistivos”, *Anais do XVIII SNPTEE*, Curitiba.
- Arcon, A. B., Pinto, L. C. (2005). “Limitação dos Níveis de Curto-Circuito em uma Usina de Cogeração Utilizando o Equipamento IS-Limiter – Estudo de Caso”, *Anais do XVIII SNPTEE*, Curitiba.
- D’Ajuz, A., et alii. (1985). *Equipamentos Elétricos - Especificação e Aplicação em Subestações de Alta Tensão*, Ed. UFF - FURNAS.
- Roméro, S. P., Machado, P. A. (1993 ). “ANAFAS – Programa de Análise de Falhas Simultâneas”, *Anais do IV STPC*, Fortaleza.
- Kinderman, G. (2005). *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*, Volume 1, 2a Edição.
- ONS (2004/07), *Dispositivos Limitadores de Corrente de Curto-Circuito – Estado da Arte*, Relatório Julho de 2004.
- Schmitt, H., et alii. (2004). “Fault Current Limiters”, *Report on Activities of CIGRE Working Group A3.10*, CIGRE.
- Goldberg, D. E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley.
- Chipperfield, A., Fleming, P., et alii. (1994). *Genetic Algorithm Toolbox for Use with MATLAB*, Version 1.2, University of Sheffield.
- Amon, J. F., et alii. (2005), “Análise da Superação das Características Nominais de Equipamentos: Métodos para a Identificação da Possibilidade de Ocorrência e Estudo de Soluções de Mitigação Face as Regras do Atual modelo do Setor Elétrico”, *Anais do XVIII SNPTEE*, Curitiba.
- ELETRORÁS (2003), *Plano Indicativo de Transmissão da Região Sul, período 2004/2013*. Relatório.
- ELETRORÁS (2004), *Documento de Referência de Custos de LTs e SEs de AT e EAT, base de junho de 2004*. Relatório.