

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



**FEUP**

**Coordenação de Relés de Máximo de  
Intensidade Homopolares e Homopolares  
Direccionais utilizando o Algoritmo  
Evolucionário EPSO**

Paulo Jorge Freixo Quesado

VERSÃO FINAL

Dissertação realizada no âmbito do  
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores  
Major Energia

Orientador: Prof. Dr. Helder Filipe Duarte Leite  
Presidente do Júri: Professor Doutor Cláudio Monteiro  
Porto, Julho de 2008



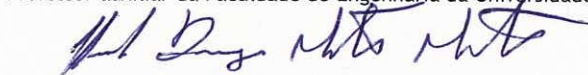
A Dissertação intitulada

**“COORDENAÇÃO DE RELÉS DE MÁXIMO DE INTENSIDADE HOMOPOLARES E  
HOMOPOLARES DIRECCIONAIS UTILIZANDO O ALGORITMO EVOLUCIONÁRIO  
EPSO”**

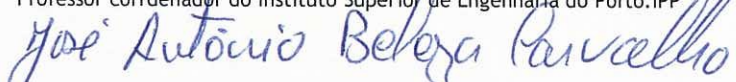
foi aprovada em provas realizadas em 15/Julho/2008

o júri

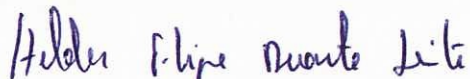
presidente Professor Doutor Claudio Domingos Martins Monteiro  
Professor auxiliar da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Professor Doutor José António Beleza de Carvalho  
Professor coordenador do Instituto Superior de Engenharia do Porto. IPP



Professor Doutor Helder Filipe Duarte Leite  
Professor auxiliar da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



O autor declara que a presente dissertação (ou relatório de projecto) é da sua exclusiva autoria e foi escrita sem qualquer apoio externo não explicitamente autorizado. Os resultados, ideias, parágrafos, ou outros extractos tomados de ou inspirados em trabalhos de outros autores, e demais referências bibliográficas usadas, são correctamente citados.

Autor - Paulo Jorge Freixo Quesado



Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



# Abstract

A fault in a network can damage any electrical equipment connected or damage the network itself, driving to invaluable losses. Therefore it is necessary to guaranty that the protection system act as quick and selective as possible. Relays of Maximum Zero Sequence Intensity (MZSI) are coordinated with each other in a time delay basis, one of the solutions used for further protection of the electricity system of distribution. So if the protection system is selective and reliable, the defect should be eliminated by the relay of MZSI closest, but if this fails another relay (called secondary protection) should act. In this process of secondary protection act only after the failure of the primary protection is called for coordination of protection relays. The objective of this work is to optimize this process of coordination using the evolutionary algorithm EPSO (Evolutionary Particle Swarm Optimization). The algorithm will coordinate the relays on a mesh network determining the time to act without any violations of coordination between different relays if possible.

In this work the algorithm is implemented in Matlab, using its great abilities to deal with matrix calculations, making fast and easy the calculations of the time delay setting and current setting of the relays witch lead to a coordinated performance.



# Resumo

Um curto-circuito numa rede eléctrica pode danificar quer equipamentos quer a própria rede eléctrica produzindo prejuízos inestimáveis. Portanto é necessário que o sistema de protecção actue quer de um modo rápido quer de um modo selectivo. Relés de Máximo Intensidade Homopolar (MIH) são coordenados entre si, sendo esta solução, uma das mais usadas para protecção da rede eléctrica de distribuição. Assim, para que o sistema seja selectivo e fiável, o defeito deverá ser eliminado pelo relé de MIH mais próximo, mas no caso de este falhar um outro relé (chamada de protecção secundária) deve actuar. A este processo da protecção secundária só actuar depois da falha da protecção primária é chamada coordenação de relés de protecção. O objectivo deste trabalho é otimizar este processo de coordenação utilizando o algoritmo evolucionário EPSO (Evolutionary Particle Swarm Optimization). O algoritmo irá coordenar os relés de uma rede emalhada determinando os tempos de actuação sem existir violações de coordenação entre os diferentes relés.

O algoritmo foi implementado em Matlab, a escolha deste software deve-se ao facto de este possuir grandes capacidades de cálculo matricial, tornando rápida a difícil tarefa de calcular os tempos de atraso e o ajuste dos relés.



# Agradecimentos

Agradeço ao Professor Helder Filipe Duarte Leite responsável pela orientação científica do trabalho desenvolvido, por todo o apoio e disponibilidade em ajudar-me a trabalhar de forma autónoma e independente, deixando-me assim muito bem preparado para a próxima fase da vida, o mercado do trabalho.

Quero agradecer a todos os meus colegas de curso pois o seu apoio foi crucial para que eu pudesse superar os momentos de maior dificuldade.

Agradeço aos meus pais, meus irmãos e à minha namorada por todos os sacrifícios que fizeram para que eu pudesse viver o sonho de um dia ser engenheiro electrotécnico.



# Índice

Abstract .....	v
Resumo .....	vii
Agradecimentos .....	ix
Índice .....	xi
Índice de Figuras .....	xv
Índice de Tabelas .....	xvii
Lista de acrónimos .....	xix
1 Introdução .....	1
1.1 Enquadramento .....	1
1.2 Motivações e objectivos .....	1
1.3 Estrutura da Tese .....	2
2 Sistemas de Protecção Máxima Intensidade .....	3
2.1 Introdução .....	3
2.2 Características das protecções .....	4
2.2.1 Zonas de protecção e redundâncias .....	4
2.2.2 Fiabilidade .....	5
2.2.3 Selectividade .....	5
2.2.4 Sensibilidade .....	6
2.2.5 Rapidez .....	6
2.2.6 Segurança .....	6
2.2.7 Simplicidade .....	7
2.2.8 Economia .....	7
2.2.9 Constituição básica de um sistema de protecção .....	7
2.2.10 Tipos de relés de protecção .....	8

2.3	Tipos de relés de protecção de Máxima Intensidade.....	9
2.3.1	Relé de protecção diferencial.....	9
2.3.2	Relé de distância.....	10
2.3.3	Relé de Máxima Intensidade instantânea.....	10
2.3.4	Relés de tempo inverso com a intensidade.....	11
2.3.5	Coordenação relés de Máxima Intensidade em rede emalhada.....	13
2.4	Curto-circuitos.....	14
2.4.1	Curto Circuito Trifásico simétrico.....	14
2.4.2	Matriz das impedâncias.....	17
2.5	Curto Circuitos assimétricos.....	18
2.5.1	Métodos das componentes simétricas.....	18
2.5.2	Curto circuito Fase Terra.....	20
2.5.3	Curto circuito fase fase.....	22
2.5.4	Curto-circuito fase fase terra.....	23
2.6	Aspectos construtivos de relés de protecção de máxima intensidade.....	24
2.6.1	Relés electromagnéticos.....	24
2.6.2	Relés de Indução.....	25
2.6.3	Relés electrónicos.....	25
2.6.4	Relés Digitais.....	26
2.7	Relés de protecção de máxima intensidade homopolar.....	27
2.8	Sumário.....	29
3	Optimização e algoritmos evolucionários.....	31
3.1	Introdução.....	31
3.2	Métodos clássicos e tradicionais de optimização.....	32
3.2.1	Método de Newton.....	33
3.2.2	Método do gradiente.....	33
3.2.3	Método de <i>Simulated annealing</i> .....	33
3.3	Algoritmos Genéticos.....	35
3.4	Estratégias de Evolução.....	37

3.5	Optimização por enxames de partículas .....	39
3.6	Optimização com Enxames de partículas Evolucionários (EPSO) .....	42
3.6.1	Recombinação no EPSO .....	42
3.6.2	Mecanismos auto-adaptativos de recombinação .....	42
3.7	Coordenação de relés de protecção de MIH .....	44
3.8	Sumário .....	45
4	Aplicação do algoritmo EPSO em coordenação de relés .....	47
4.1	Introdução .....	47
4.2	Programa desenvolvido .....	48
4.2.1	Introdução dos dados no programa .....	48
4.2.2	Cálculo das corrente de curto-circuito máximas .....	49
4.2.3	Função de execução do algoritmo EPSO .....	50
4.2.4	Função objectivo .....	52
4.3	Caso de estudo .....	53
4.3.1	Introdução dos dados no programa .....	54
4.3.2	Resultados obtidos .....	55
4.4	Sumário .....	56
5	Conclusões e perspectivas de desenvolvimentos futuros .....	57
5.1	Principais conclusões .....	57
5.2	Perspectivas futuras .....	58
	ANEXOS .....	59
	Referências Bibliográficas .....	61



# Índice de Figuras

Figura 2.1-Representação simplista das zonas de protecção típicas na rede eléctrica. ....	4
Figura 2.2- Diferentes zonas de actua de um relé. ....	5
Figura 2.3-Esquema simplista de um sistema de protecção de uma linha. ....	8
Figura 2.4-Exemplo da aplicação de um relé de protecção diferencial. ....	9
Figura 2.5-Exemplo de coordenação de relés de MI com atraso em rede radial. ....	11
Figura 2.6-Curvas de tempo de actuação para relés de característica inversa. ....	12
Figura 2.7-Exemplo da coordenação de relés de característica de tempo inverso. ....	12
Figura 2.8-Relés primários e secundários para uma falha em F, em rede emalhada. ....	13
Figura 2.9-Curto-circuito trifásico simétrico numa rede emalhada. ....	15
Figura 2.10- a)Circuito equivalente monofásico b) Representação do circuito estrela-triângulo para conversões. ....	16
Figura 2.11-Equivalente da rede para cálculo da corrente de curto-circuito. ....	16
Figura 2.12-Separação das três componentes do sistema trifásico. ....	19
Figura 2.13-Sistema unicamente com componente directa e inversa. ....	20
Figura 2.14-Curto-Circuito Fase Terra: A) e B) representação trifásica, C) representação das componentes simétricas. ....	21
Figura 2.15-Componentes simétricas no caso CCFT. e respectiva representação trifásica. ....	22
Figura 2.16- Curto-Circuito Fase Fase: A) e B) representação trifásica normal, C) representação das componentes simétricas. ....	22
Figura 2.17-Componentes assimétricas de FF e respectiva representação trifásica. ....	23
Figura 2.18- Curto-Circuito Fase Fase Terra: A) e B) representação trifásica normal, C) representação das componentes simétricas. ....	23
Figura 2.19- Componentes assimétricas de FFT e respectiva representação trifásica. ....	24
Figura 2.20-Exemplo de um relé electromagnético. ....	25
Figura 2.21-Exemplo de um relé de indução. ....	25
Figura 2.22-Exemplo de um relé electrónico. ....	26
Figura 2.23-Esquema de montagem de protecção MI e MIH, configuração de Holmgreen. ....	28
Figura 2.24-Esquema de montagem de um relé de MH com transformador toroidal. ....	28

Figura 3.1-Exemplo de função unidimensional com diversos máximos locais. ....	32
Figura 3.2-Diagrama de blocos representando o algoritmo <i>simulated annealing</i> .....	34
Figura 3.3-Representação de uma possível codificação de um gene. ....	35
Figura 3.4- Exemplo da sequência de alterações sofridas por 2 cromossomas. ....	36
Figura 3.5-Diagrama de blocos representando os passos de um algoritmo genético .....	37
Figura 3.6- Exemplo do movimento de uma partícula no PSO. ....	41
Figura 3.7-Exemplo do movimento de uma partícula no EPSO.....	44
Figura 4.1-Esquema global dos módulos que compõem o programa. ....	48
Figura 4.2-Matriz utilizada para armazenar as correntes de curto-circuito. ....	50
Figura 4.3-Composição de uma partícula utilizada no EPSO. ....	51
Figura 4.4-Diagrama de bloco da metodologia adoptada para a resolução do problema. .....	51
Figura 4.5-Esquema da rede de teste.....	53
Figura 4.6- Esquema eléctrico homopolar da rede de teste. ....	54
Figura 4.7-Evolução do valor da função objectivo com número de iterações. ....	56

## Índice de Tabelas

Tabela 2.1- Características $\alpha$ e $k$ segundo a norma IEC 60255-3. ....	11
Tabela 4.1- Características das linhas e transformadores da rede de teste. ....	54
Tabela 4.2- Características dos geradores ligados á rede .....	54
Tabela 4.3- Resultados obtidos com o EPSO .....	55



# Lista de acrónimos

CAD	<i>Computer Aided Design</i>
C.C.	Curto-Circuito
ES	Estratégias de Evolução
EPSO	Envolutionary Particle Swarm Optimization
GA	Algoritmos Genéticos
$I_{CC}$	Corrente de curto-circuito
$I_{PK}$	Corrente de disparo do Relé
MI	Máxima Intensidade
MIH	Máxima Intensidade homopolar
PSO	Particle Swarm Optimization
SEE	Sistema Eléctrico de Energia
TMS	<i>Time Multiplier setting</i> - atraso do relé



# Capitulo 1

## Introdução

### 1.1 Enquadramento

Os Sistemas Eléctricos de Energias têm permanecido na história como sendo dos sistemas mais estáveis, e ao mesmo tempo com crescimento significativo. Nos últimos anos este crescimento tem vindo a intensificar-se, sendo necessária a construção de mais centrais, o alargamento e reforço da Rede Eléctrica e o aumento das interligações entre os diversos países. Com o aumento da dimensão do Sistema Eléctrico de Energia, é necessário garantir elevados índices de continuidade de serviço e de fiabilidade.

O Sistema de Protecções desempenha um papel crucial no SEE, protegendo equipamentos e utilizadores. Cada vez mais é necessário melhoramento nos Sistemas de Protecção para que estes acompanhem as novas exigências, e aperfeiçoem as respostas às exigências mais antigas. Um dos mais importantes e preocupante dos problemas associados á rede eléctrica é a ocorrência de defeitos de sobreintensidade, os curto-circuitos, que se não forem isolados o mais rapidamente possível, podem conduzir a estragos grandiosos nos equipamentos devido à degradação dos isolantes e dos próprios equipamentos pelo aumento de temperatura.

Actualmente as regulações das protecções de Máximo de Intensidade são feitas de forma empírica, onde a experiência do responsável pela tarefa é extremamente importante para uma boa regulação das protecções. Neste trabalho pretende-se criar uma metodologia sistemática e automática para encontrar as regulações das protecções de Máxima Intensidade Homopolar, de forma garantir que cada uma destas protecções actue o mais rapidamente e correctamente possível.

### 1.2 Motivações e objectivos

As protecções contra sobreintensidades são cruciais, pois a circulação destas correntes pode pôr em causa equipamentos, que são muito dispendiosos, a inclusão de uma protecção contra sobreintensidades numa rede eléctrica tem poucos impactos em termos de custo, se se tiver em conta o dinheiro que se poupa em caso de defeito e sempre que a protecção actua

correctamente. No entanto, para a actuação correcta de uma protecção, não basta que o defeito seja isolado, é necessário que seja minimizada a quantidade utilizadores afectados devido à actuação das protecções.

Neste trabalho pretende-se dar resposta ao problema da coordenação de relés de Máxima Intensidade Homopolar de tempo inverso com a intensidade de corrente. Tal será efectuado com recurso a um método de pesquisa meta-heurístico, o algoritmo: ‘Evolutionary Particle Swarm Optimization’ desenvolvido em 2002 no Inesc-Porto.

### 1.3 Estrutura da Tese

Este documento encontra-se dividido em 5 capítulos, considerando o presente capítulo como primeiro. O segundo e terceiro capítulos expõem uma revisão da literatura existente sobre Sistemas de Protecção de Máxima Intensidade e Optimização com recurso a algoritmos evolucionários. No quarto é descrito o programa implementado e são apresentados os resultados deste programa aplicado a uma rede de testes. No quinto e último capítulo são apresentados as conclusões e perspectivas de trabalhos futuros.

No capítulo dois são abordados os sistemas de protecção de Máximo de Intensidade (MI), qual necessidade e importância destes. É feita uma revisão sobre o cálculo da magnitude dos diferentes tipos de curto-circuitos. São apresentados alguns aspectos construtivos dos relés de MI. Serão focadas as protecções de Máxima Intensidade Homopolar (MIH), devido à relevância que estas apresentam para o trabalho realizado.

No capítulo três é apresentado o problema da optimização, quais necessidades e métodos para optimizar, seja maximizar ou minimizar. É feita uma breve revisão sobre alguns métodos clássicos, quais as vantagens e desvantagens. Apresenta-se alguns métodos de optimização meta-heurísticos e evolucionários sendo apresentadas as principais vantagens e desvantagens. É ainda introduzido o problema da optimização da coordenação de relés de Máxima Intensidade Homopolar.

No quarto capítulo é realizada uma exposição do problema a resolver e qual a importância deste. Assim como também é apresentado o algoritmo desenvolvido para a resolução desse mesmo problema e a rede de teste utilizada para realizar coordenação dos relés de protecção de Máximo de Intensidade Homopolar.

No quinto capítulo são apresentadas as principais conclusões da Tese, perspectivas e desenvolvimentos futuros.

# Capítulo 2

## Sistemas de Protecção Máxima Intensidade

### 2.1 Introdução

Neste capítulo serão abordados os sistemas de protecção de Máximo de Intensidade (MI), qual a necessidade e a importância destes. Será feita uma revisão sobre cálculo dos diferentes tipos de curto-circuitos. Serão focadas as protecções de Máxima Intensidade Homopolar (MIH), devido à relevância que estas apresentam para o trabalho realizado.

Quando ocorre um defeito de sobreintensidade, é necessário que este seja eliminado ou isolado para garantir que o sistema tenha um funcionamento normal. Caso não exista actuação das protecções e as sobreintensidades permaneçam, existirá uma elevação da temperatura que conduz à degradação dos componentes, por fadiga térmica. Também os esforços electrodinâmicos causados pelas correntes elevadas podem ser prejudiciais, em especial para máquinas e barramentos, podendo conduzir a perda de estabilidade das máquinas rotativas. [1].

O aumento dos níveis de tensão, para minimizar as perdas e aumentar a energia transmitida com menores secções e menores perdas, conduziu a um aumento de vulnerabilidade devido às falhas de isolamento. A enorme extensão dos sistemas e a grande quantidade dos seus componentes, conjugados com limites económicos à qualidade desses isolamentos, acabam por determinar que os sistemas eléctricos sejam inevitável e casualmente sujeitos a defeitos de isolamento, os curto-circuitos.

O equipamento de protecção usualmente representa um investimento de cerca de 3 a 5% do investimento total, variando caso a caso com os níveis de Tensão, configuração da Rede (radial, anel, anel aberto, emalhada, etc.), o local onde esta se encontra. Por exemplo, nos locais rurais o investimento em protecções é muito menor que nos grandes centros de consumo, onde são necessários elevados níveis de continuidade do serviço. Actualmente os sistemas de

protecção encontram-se bastante desenvolvidos, permitindo um contínuo funcionamento do sistema para uma grande maioria das falhas e defeitos [2].

## 2.2 Características das protecções

### 2.2.1 Zonas de protecção e redundâncias

Existe a necessidade de definir diferentes zonas de protecção, para garantir uma melhor coordenação e actuação dos sistemas de protecção. As diferentes zonas devem estar protegidas para os diversos tipos de defeitos. É comum existir sobreposição entre as diversas zonas para melhor actuação. Na Figura 2.1 pode observar-se uma possível configuração das diferentes zonas de protecção que separam a geração do consumo, neste caso os equipamentos de protecção estão representados sob a forma de quadrados [3].

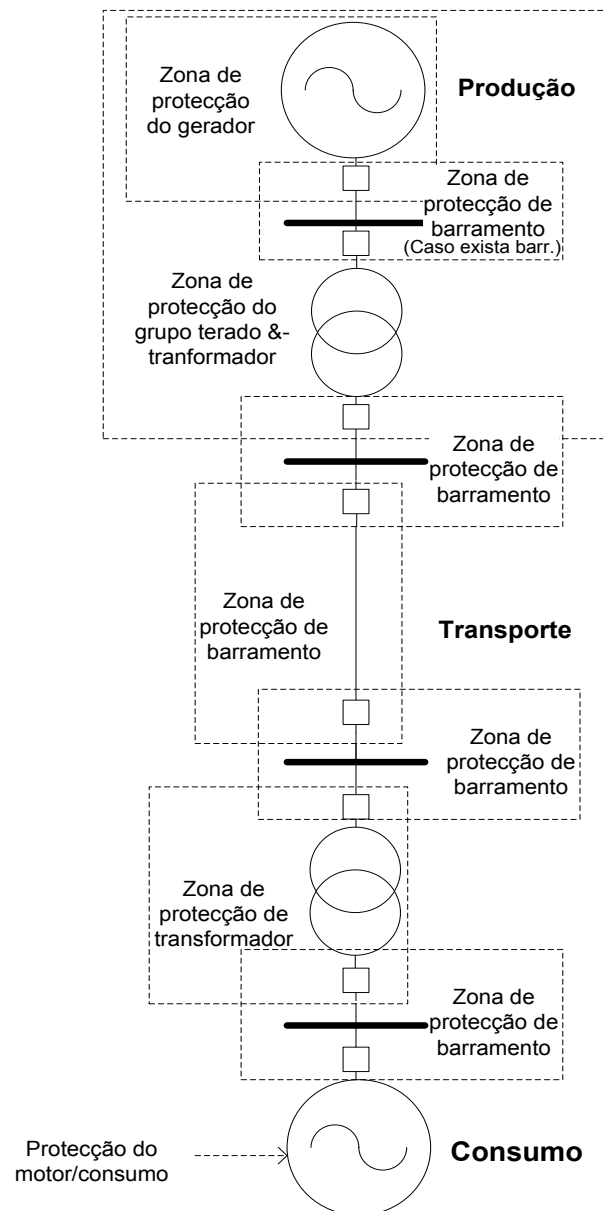


Figura 2.1-Representação simplista das zonas de protecção típicas na rede eléctrica.

Um equipamento de protecção deve cobrir diversas zonas, efectuando protecção primária na sua zona de protecção, isto é, na sua zona de protecção, esta deve actuar primeiro e o mais rapidamente possível. A protecção deve assistir também as zonas contíguas, efectuando neste caso uma protecção secundária, de *backup*, a qual deve actuar caso a primária falhe, a coordenação entre a protecção primária e secundária é tipicamente realizada através de um atraso na actuação da protecção de *backup*. O atraso deverá ser o mínimo possível, mas que permita a correcta actuação da protecção primária. Na Figura 2.2 [4] pode observar-se que o relé A, representado pelo quadrado, realiza protecção primária na zona 1, e de *backup* na zona 2 e 3.

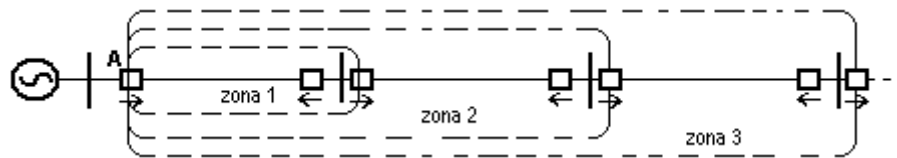


Figura 2.2- Diferentes zonas de actua de um relé.

### 2.2.2 Fiabilidade

Garantia de que a protecção actua correctamente, isto é, actua dentro do tempo correcto para os defeitos na sua zona de actuação. Este é um dos mais importantes aspectos na protecção, pois a protecção deve actuar rapidamente, mas com garantia de que a protecção não actua intempestivamente.

As protecções passam 99,9% do tempo em estado estacionário, havendo durante este tempo deterioração dos constituintes conduzindo a que esta possa não se encontrar em perfeito estado de conservação. Para tal devem ser efectuadas revisões e manutenções regulares, testando a capacidade de actuação dentro dos tempos indicados e a capacidade de identificação de defeitos correctamente [3]. A simplicidade das protecções aumenta a fiabilidade, isto é, quantos mais componentes constituírem o sistema de protecção, maior é a probabilidade de um falhar, comprometendo a actuação da protecção.

### 2.2.3 Selectividade

A selectividade total é o requisito que um sistema de protecções deve satisfazer, em quaisquer circunstâncias, de isolar apenas o equipamento defeituoso ou minimizar a perda de funcionalidade do sistema de Energia. Como foi visto na secção 2.2.1, existem zonas de protecção, que requerem uma coordenação entre as diversas protecções das zonas, para que esse conjunto de protecções e zonas interactuem como um sistema global de protecções.

A selectividade tal como a segurança, que será mencionada mais adiante, são características fundamentais, pois a não actuação, ou a actuação indevida de uma protecção conduz a que o serviço seja interrompido desnecessariamente em certas zonas da rede [4]

### 2.2.4 Sensibilidade

Sensibilidade é o requisito que as protecções devem satisfazer, de operar fiavelmente nas condições mínimas de defeito na sua zona de actuação, e permanecerem estáveis em condições máximas de carga.

As protecções devem ser dimensionadas para actuar não só em defeitos francos (na sua zona de actuação primária) mas também no caso de defeitos impedantes, quaisquer que sejam as condições da rede, e sempre que as características do defeito caiam no seu campo de medida [5].

A regulação da protecção deve ser tal que, quando ocorre um curto-circuito impedante na parte final da sua zona de actuação, estando satisfeitas as condições da rede para que a corrente de curto-circuito seja mínima, a corrente obtida deverá ser a corrente de curto-circuito mínima a partir da qual a protecção actua. É usual definir o factor de sensibilidade,  $K_s$ , como sendo ( 2.1):

$$\text{onde:} \quad K_s = \frac{I_{ccmin}}{I_{pk}} \quad (2.1)$$

$I_{ccmin}$  é a corrente mínima de defeito,

$I_{pk}$  é a corrente mínima que provoca o disparo do relé.

### 2.2.5 Rapidez

A protecção deve ter o menor tempo de actuação possível, para limitar os problemas induzidos pelas condições de defeito. Um curto-circuito deve ser isolado tão rapidamente quanto possível, de modo a reduzir os estragos nos equipamentos percorridos pelas elevadas correntes, e reduzir assim os estragos ao mínimo.

Nos equipamentos de reengate automático, este deverá ser executado com a máxima rapidez, sem que haja reacendimento por isso. O tempo de actuação de um equipamento de protecção contabiliza-se desde a detecção do defeito até á abertura dos contactos do equipamento de corte e isolamento do defeito.

Quando são conferidos atrasos propositados para efeitos de coordenação e selectividade entre protecções, a actuação da protecção deve ser o mais rápido possível, logo que ultrapasse esse tempo de coordenação [6].

### 2.2.6 Segurança

A segurança de uma protecção é a capacidade que esta tem de operar fiavelmente no caso de defeito na sua zona de protecção, e de não actuar fora dessas condições.

De notar que a segurança é um requisito de cada protecção em particular e a selectividade é um requisito do sistema de protecções em global, da forma como as protecções se coordenam entre si. Por exemplo, uma protecção segura, deve não operar devido a um pico de corrente resultante da ligação de um motor.

A grande dificuldade no projecto dos sistemas de protecção reside no facto de conseguir satisfazer estes requisitos: selectividade, rapidez e segurança, que se tornam contraditórios [3].

### 2.2.7 Simplicidade

A simplicidade de um equipamento de protecção vem normalmente associada à fiabilidade e robustez de uma protecção. Uma protecção deverá ser construída com o máximo de simplicidade e integridade possível. A cada componente extra que é acrescentado a uma protecção está-se a aumentar a probabilidade deste falhar [4]. Este é um dos maiores argumentos apresentados para a não utilização de protecções digitais.

### 2.2.8 Economia

É fundamental conseguir a máxima protecção, mas também é necessário que o preço não seja elevado, nos dias de hoje, o factor preço é de extrema importância.

Historicamente, o preço das protecções era aproximadamente proporcional aos valores de tensão e corrente nominais do equipamento a proteger, e podendo até ser considerado alto quando considerado em individual, mas quando confrontado com o valor do equipamento a proteger, este é um valor baixo [4].

Actualmente com a introdução das protecções digitais, o valor das protecções tornou-se ainda mais baixo devido a uma maior diversidade de fabricantes e devido à introdução de protecções digitais que conseguem reunir num só equipamento protecções contra diversos tipos de defeitos [7].

### 2.2.9 Constituição básica de um sistema de protecção

Um sistema de protecção é constituído por uma parte de detecção e medida, e uma parte de actuação, ver Figura 2.3. A parte de detecção é constituída por um Transformador de Intensidade (TI) também designado por transformador de corrente, um Transformador de Tensão (TT), ou ambos, no caso de protecção de variação de impedância (p.e. relés de distância) ou protecção direccionada de potência. O transformador de intensidade tem a função baixar os níveis de intensidade de corrente para valores correspondentes com os relés utilizados. Os transformadores de tensão têm uma função idêntica para a tensão.

O relé é o dispositivo que detecta uma anomalia no sistema, uma sobreintensidade, sobretensão, etc. e tem a função de enviar ordem de abertura ao equipamento de corte, e no caso do dispositivo de actuação ser um disjuntor, tem a função de efectuar a abertura da linha em caso de defeito. Deverá ser dimensionado para suportar e conseguir cortar a corrente máxima de curto-circuito sem se danificar [6].

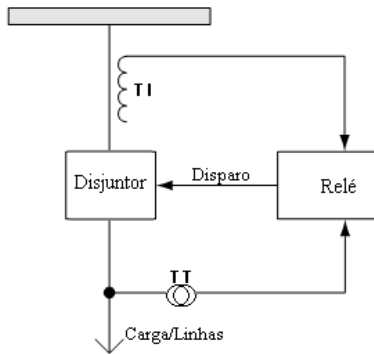


Figura 2.3-Esquema simplista de um sistema de protecção de uma linha.

### 2.2.10 Tipos de relés de protecção

Existem uma vasta gama de aparelhagem para garantir o bom funcionamento do sistema eléctrico e garantir uma correcta detecção e actuação dos defeitos. Foi definido um código numérico internacional para uma mais prática identificação. Podem ainda ser acrescentadas letras associadas á sua localização, por exemplo, G para gerador ou T para os transformadores.

Em sistemas de protecção, os relés sendo separados em função da grandeza física medida, podem ser classificados, de forma genérica, como:

- Relés de corrente: Actuam a partir de um determinado valor eficaz da intensidade de corrente eléctrica (ANSI:50;51).
- Relés de tensão: Actuam a partir de um valor eficaz da tensão, poderá ser protecção de máximo ou mínimo de tensão (ANSI:27;59);
- Relés direccionais de potência: São sensíveis ao valor do fluxo de potência na rede e seu sentido (ANSI:32);
- Relés de impedância: Actuam aquando de uma variação de impedância de uma linha ou transformador (ANSI:21);
- Relés diferenciais: Actuam mediante a diferencia escalar ou vectorial de duas quantidades, por exemplo tensão, corrente (ANSI:87);
- Relés de frequência: Sensíveis à variação de frequência na rede (ANSI: 81);
- Relés térmicos: Actuam em função da temperatura do equipamento a proteger (ANSI:49).

Existem ainda relés suplementares que se separam por:

- Relés temporizadores: relés que, recebendo sinais lógicos dos medidores, introduzem um determinado atraso na sua actuação (ANSI:2);
- Relés auxiliares - relés cuja função é excitar o circuito de disparo dos disjuntores. Estes relés têm que ter poder de fecho, o que não acontece nos restantes (tanto medidores como suplementares). Muitas vezes os relés

auxiliares destinam-se simplesmente à interligação dos elementos da protecção, não necessitando neste caso de exibir poder de fecho (ANSI:94).

- Relés de sinalização - sinalizam e registam a operação das protecções (ANSI:30).

No anexo A, pode-se consultar uma lista com a nomenclatura internacional dos diferentes tipos de relés e respectivo código ANSI dos relés mais frequentes [3].

## 2.3 Tipos de relés de protecção de Máxima Intensidade

### 2.3.1 Relé de protecção diferencial

Este é o tipo de protecção mais eficaz e em simultâneo mais antigo, foi dos primeiros princípios utilizados na identificação devido á facilidade de implementação. A protecção baseia-se na observação da corrente que circula na malha a proteger, devendo o relé actuar caso a diferença entre a corrente de entrada e saída, exceda um valor predefinido, desta forma, este tipo de relé só actua para defeitos dentro da sua própria zona de protecção (obvio). Este tipo de protecção é utilizado para proteger transformadores, motores, podendo também proteger linhas na versão longitudinal, etc. A principal aplicação é em transformadores pois permite a identificação defeitos entre os dois TIs, tanto internos como externos ao transformador, nomeadamente na detecção de defeitos entre espiras, esta protecção crucial.

Na Figura 2.4, vem representado o esquema de uma aplicação de um relé de protecção diferencial. O relé dará ordem de abertura, caso exista diferença significativa entre a corrente medida nos dois ramos antes e após o equipamento a proteger, esta é a representação de um enrolamento, o sistema de protecção será constituído por três circuitos, um por cada fase.

Estas protecções são aplicáveis em linhas, mas exigem a utilização de meios de comunicação entre as duas extremidades da linha a proteger, o que torna esta solução pouco atractiva.

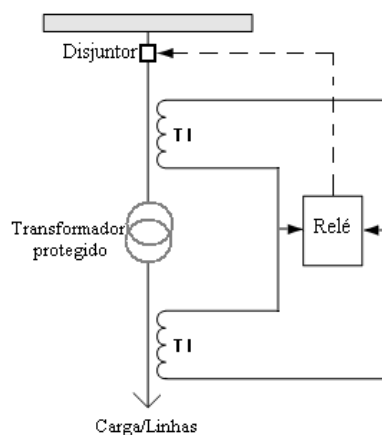


Figura 2.4-Exemplo da aplicação de um relé de protecção diferencial.

### 2.3.2 Relé de distância

As protecções de distância são provavelmente as mais importantes e mais utilizadas mundialmente na detecção de curto-circuitos entre fases e homopolares em redes de muito alta, alta e média tensão [4].

Esta protecção não só utiliza o tempo como critério de selectividade, mas também a distancia entre a protecção e o ponto de defeito, daí resulta o nome de protecção de distância. Quando utilizadas em redes emalhadas estas deverão de ser do tipo direccional para uma melhor selectividade entre protecções.

Os relés de distância avaliam a distância ao defeito através da medida da impedância da linha. Tal é conseguido com recurso a medidas de tensão e corrente na linha a proteger. Quando ocorre um curto-circuito, a corrente sobe e a tensão diminui, conduzindo a que o relé detecte uma diminuição de impedância. Os relés devem estar regulados para a distância igual ao comprimento da linha até ao próximo relé de protecção. Estes relés por vezes apresentam erros na medição da distância ao defeito devido á presença de linhas em paralelo e também á natureza do defeito [8].

A medida da impedância é realizada pela divisão da tensão aos terminais do relé pela corrente que circula na linha em questão:  $Z=U/I$ , devendo ser definida uma impedância  $Z_{arr}$  que define a impedância máxima de actuação da protecção, isto é, a protecção actua sempre que medir uma impedância menor que  $Z_{arr}$ .

### 2.3.3 Relé de Máxima Intensidade instantânea

Em redes radiais é frequente utilizar protecções de MI instantâneas, coordenadas através de atraso uniforme, isto é, a protecção detecta e dá indicação instantânea para abertura do aparelho de corte, mas para efeitos de coordenação são introduzidos atrasos propositados para permitir a actuação das protecções que tenham menor atraso definido.

Os atrasos aumentam com a proximidade da fonte, o que se torna um grande inconveniente pois as correntes de curto-circuito aumentam com a proximidade da fonte. Na Figura 2.5 é possível observar que o tempo de actuação será mais rápido para as linhas que se encontram mais longe da fonte (C), sendo que com a proximidade da fonte, os atrasos são superiores para as linhas mais próximas (A), o grande problema desta metodologia é que nos troços onde a corrente curto-circuito é superior, os atrasos são superiores, conduzindo a um maior desgaste do equipamento e *stress* induzido [5].

Estas protecções também são aplicáveis em redes emalhadas, quando munidas de dispositivos direccionais.

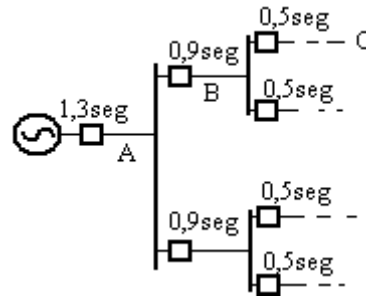


Figura 2.5-Exemplo de coordenação de relés de MI com atraso em rede radial.

### 2.3.4 Relés de tempo inverso com a intensidade

Este tipo de relés surgiu primeiramente com a introdução dos relés de indução, e veio solucionar os problemas inerentes aos anteriores (2.3.3), o tempo de actuação destes relés vem definido na norma IEC 60255-3 (1989-05) por:

$$T(seg) = \frac{k}{\left(\frac{I}{I_{PK}}\right)^{\alpha} - 1} \times TMS \quad (2.2)$$

onde:

T é o tempo de actuação em segundos,

k e  $\alpha$  são constantes fixas,

TMS é o *time multiplier setting* e

$I_{PK}$  é a corrente de disparo do relé, a corrente mínima que provoca o disparo.

Com este tipo de dispositivos, é garantido que a sua actuação é mais rápida para correntes mais elevadas. Os valores de  $\alpha$  e k vêm apresentados na Tabela 2.1 que representam os três tipos de curvas mais frequentes.

Tabela 2.1-Características  $\alpha$  e k segundo a norma IEC 60255-3.

Tipo de curva	$\alpha$	k
<i>Standard Inverse</i>	0,02	0,14
<i>Very Inverse</i>	1,0	13,5
<i>Extremely Inverse</i>	2,0	80,0

Na Figura 2.6 vêm representadas as diferentes curvas de actuação em função do valor da corrente, facilmente se observa que o de relé do tipo *Standar Inverse* é o que apresenta uma menor diminuição do tempo de actuação com o aumento da corrente. Do mesmo modo se pode observar que os relés de característica *Extremely Inverse* são mais rápidos que os de característica inversa normal. A figura foi adaptada de [8].

Este tipo de relé tem sido vastamente aplicado nas redes devido á versatilidade que permite, isto é, cada relé permite uma larga gama de configurações, tornam a coordenação entre as diversas protecções possível. A grande desvantagem reside na dificuldade que existe em encontrar os parâmetros ideais para uma correcta selectividade e segurança entre as diversas protecções. Actualmente têm sido desenvolvidos diversos trabalhos sobre a coordenação deste

tipo de relés, recorrendo a métodos de optimização meta-heuristicos, como se verá mais à frente.

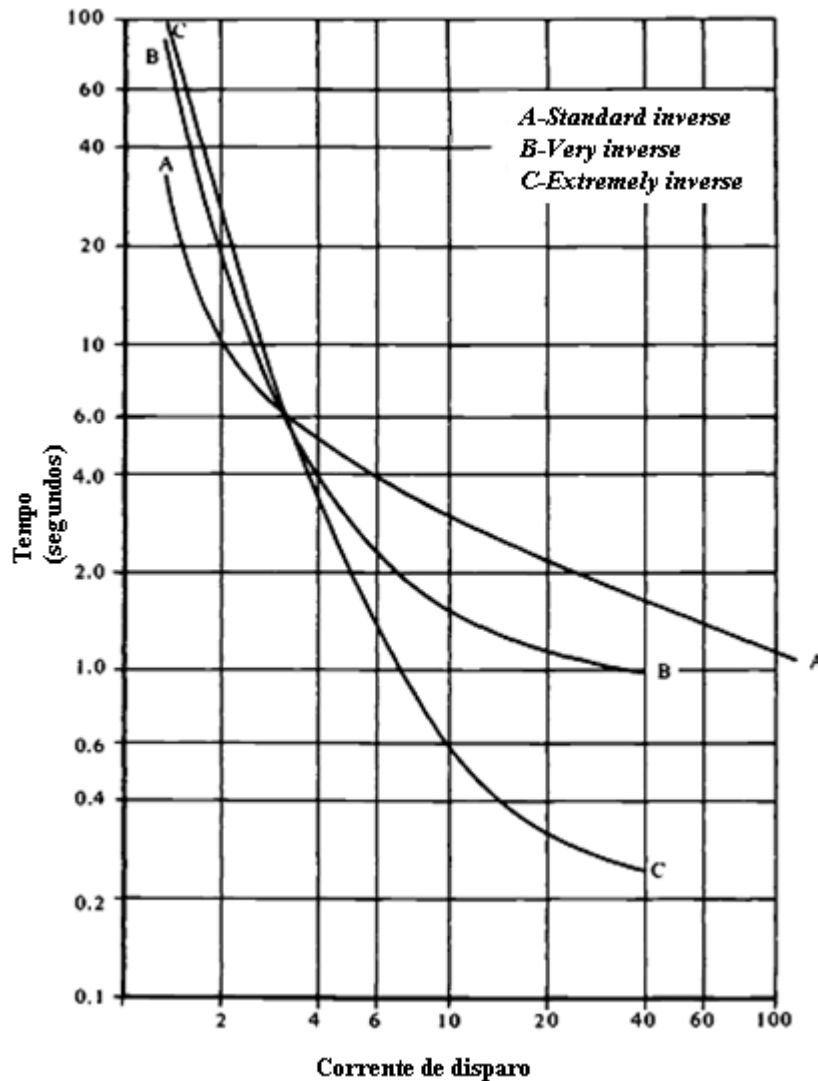


Figura 2.6-Curvas de tempo de actuação para relés de característica inversa.

Em baixo na Figura 2.7 pode observar-se um exemplo ilustrativo do efeito do tempo de actuação inverso com a corrente, pode observar-se que o relé A terá um tempo de actuação pequeno para defeitos na linha 1, e um tempo superior para defeitos na linha 2 (onde a corrente de curto-circuito será menor). Já o relé B, para defeitos na linha 2, terá um tempo de actuação menor do que A, convém focar que os índices  $I_{PK}$  e TMS de B dever ser diferentes de A [5].

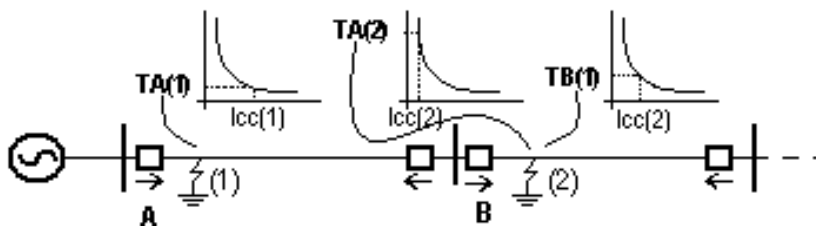


Figura 2.7-Exemplo da coordenação de relés de característica de tempo inverso.

### 2.3.5 Coordenação relés de Máxima Intensidade em rede emalhada

No caso das redes emalhadas, torna-se mais difícil dar resposta ao critério de selectividade e segurança das protecções pois a divisão das correntes pelos diversos barramentos e linhas torna complexo o problema devido à dificuldade dos relés terem sensibilidade para reconhecer quais os defeitos que ocorrem na sua zona de actuação primária e também garantir que os relés actuem para a zona de *backup* com um tempo de atraso superior ao tempo de actuação dos relés primários somado do tempo de actuação do disjuntor. Tipicamente considera-se o tempo de actuação do relé de *backup* 0,3segundos superior ao tempo de actuação do relé primário. Como se pode observar da Figura 2.8, para o defeito F, os relés primários vêm assinalados a preto e pelo número 1 e deverão actuar primeiro, e assinalados por 2 são os relés de *backup* e devem actuar após o tempo de actuação dos primários somado de uma margem de segurança, tipicamente 0,3seg. [5].

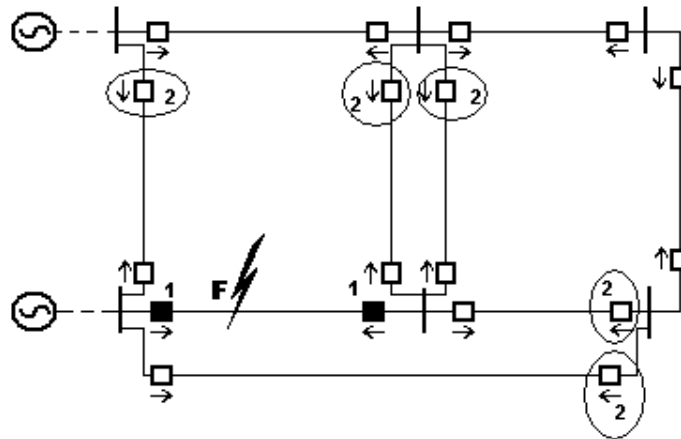


Figura 2.8-Relés primários e secundários para uma falha em F, em rede emalhada.

Neste caso a protecção diferencial actua sem problemas mas como já foi dito não é usual ser aplicada na protecção de linhas, devido á extensão destas, sendo esses dispositivos mais aplicáveis para equipamento cujas extremidades estejam próximas (por ex. transformadores e motores). Embora seja possível utilizar os cabos de guarda como forma de comunicação entre as extremidades da linha (é comum utilizar cabos de guarda com fibra óptica incorporada para comunicações, p. e. entre protecções digitais) [9].

O recurso a metodologias de atraso simples, não é muito aplicável pois vem condicionada pela existência de diversos pontos de injeção. Uma solução passa por utilizar percentagens de correntes de disparo elevadas (proporcionais á corrente nominal) e atraso com a aproximação aos pontos injectores, aproveitando o facto de a corrente ser máxima na linha de defeito e ser bastante menor nas diferentes linhas, existindo contribuição por todas as linhas em paralelo. Outra opção já mais interessante é a utilização de relés atraso simples munidos de equipamento de detecção do sentido da corrente eléctrica.

Os relés direccionais de distância providenciam uma boa solução pois permitem identificar com bastante precisão os defeitos que ocorrem na linha que este deve proteger. Caso não seja direccional, já não é boa solução pois pode produzir actuações intempestivas.

No âmbito deste trabalho foi estudada a coordenação através de relés de tempo de actuação inverso com a corrente. Como já foi dito anteriormente, este tipo de relés tem a vantagem de actuar rapidamente para elevados valores de corrente, ou seja, quando o defeito ocorre perto dos seus terminais, na linha que este protege, ele ‘vê’ a parte da corrente que circula através dele para a linha em defeito, actuando rapidamente [10].

Para defeitos em linhas diferentes ou distantes, caso a corrente ultrapasse o valor pré-definido, o relé actuará, mas dado que o tempo varia inversamente com a corrente, o tempo de actuação será longo, dando hipótese a relés mais próximos para actuar primeiro.

## 2.4 Curto-circuitos

Os curto-circuitos são os defeitos que mais frequentemente ocorrem na rede eléctrica, e também os que mais danos podem causar. Estes defeitos podem ter origem devido a contactos de animais, ou árvores que empurrem os condutores para junto do apoio. Como também podem resultar de sobretensões atmosféricas, que provoquem o contornamento dos isoladores e devido à ionização do ar, o arco se mantenha mesmo na ausência de sobretensão.

Os curto-circuitos mais frequentes são os defeitos Fase-Terra (mais frequentes e de menor magnitude) representando cerca de 70 a 85% das falhas ou contactos entre duas fases, sendo este tipo de curto-circuito já mais grave menos frequente, cerca de 8 a 15%. O curto-circuito entre duas fases e a terra, é o mais grave dos curto-circuitos assimétricos e também de rara ocorrência aproximadamente 4 a 10% dos casos. O curto-circuito trifásico simétrico franco é a ligação directa entre as três fases. É de baixa taxa de ocorrência, só cerca de 3 a 5% dos curto-circuito são desta natureza, no entanto, os defeitos assimétricos têm tendências a degenerar em defeitos simétricos, daí a necessidade de um Sistema de Protecções bem dimensionado [11], e também devido à sua magnitude representar o pior caso e ser de facilidade de cálculo, esta corrente é tida em conta diversas vezes durante o dimensionamento das infra-estruturas.

### 2.4.1 Curto Circuito Trifásico simétrico

Como já foi mencionado anteriormente, em 2.4, este defeito é de baixa taxa de ocorrência, principalmente em linhas aéreas, pois é naturalmente difícil atingir os 3 condutores em simultâneo, embora possa ocorrer devido à queda de árvores durante tempestades, e mesmo nesse caso é raro pois é comum existir uma faixa de segurança em torno da linha onde só existe vegetação de pequeno porte. Já em cabos subterrâneos pode ser mais frequente, devido à possibilidade de durante escavações por motivo de obras, devido a desrespeito pelas diversas

faixas sinalizadoras, ser perfurado o próprio cabo. A Figura 2.9 apresenta uma rede muito simplificada onde ocorre um defeito, com impedância de defeito,  $Z_d$ .

Dado que este tipo de defeito pode ocorrer, e sendo o mais gravoso, é necessário garantir que sistema está preparado para o suportar e que as protecções actuam antes que as temperaturas induzidas provoquem degradação dos isolamentos dos condutores.

Para o cálculo da corrente de curto-circuito, utiliza-se o teorema da sobreposição, aplicando-se uma fonte tensão no local de defeito, com a polaridade invertida, com a tensão pré defeito, para levar a tensão a 0V no ponto de defeito. A corrente de curto-circuito é calculada substituindo os restantes geradores pelas suas impedâncias internas. Aplica-se então o teorema de Thévenin para calcular a corrente de defeito. [1]

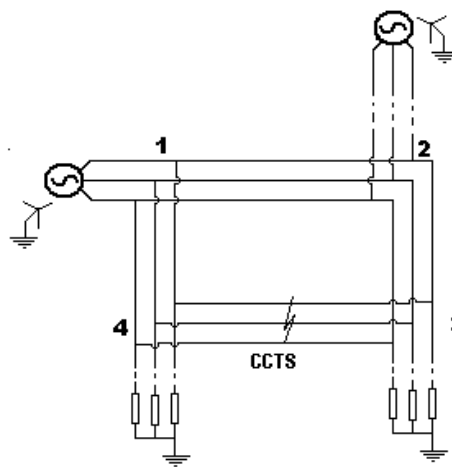


Figura 2.9-Curto-circuito trifásico simétrico numa rede emalhada

Sendo um curto-circuito simétrico, as correntes serão iguais em todas as fases, estando apenas desfasadas entre si em  $120^\circ$ . Deste modo é possível proceder a uma análise por fase, a Figura 2.10 apresenta o esquema monofásico da rede apresentada na Figura 2.9 Devendo posteriormente calcular-se a impedância equivalente da rede a montante, simplificando-a através de transformações estrela-triângulo, simplificações de paralelos e séries, para calcular a corrente de curto-circuito máxima.

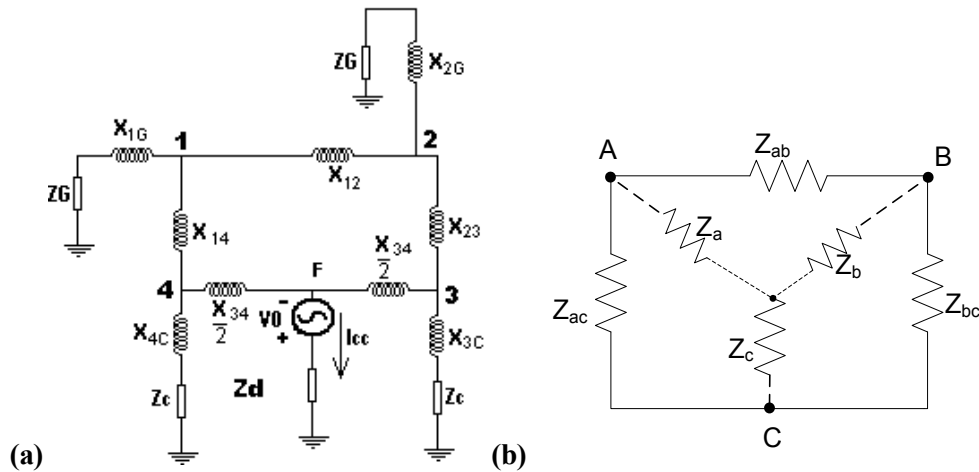


Figura 2.10- a) Circuito equivalente monofásico b) Representação do circuito estrela-triângulo para conversões.

Para a conversão de impedâncias estrela-triângulo recorre-se à ( 2.3) cujo esquema das impedâncias vem apresentado na Figura 2.10 para a conversão inversa, triângulo-estrela, utiliza-se as expressões apresentadas em ( 2.4).

$$\begin{aligned} Z_{ab} &= \frac{Z_a Z_b + Z_a Z_c + Z_c Z_b}{Z_c} \\ Z_{bc} &= \frac{Z_a Z_b + Z_a Z_c + Z_c Z_b}{Z_a} \\ Z_{ac} &= \frac{Z_a Z_b + Z_a Z_c + Z_c Z_b}{Z_b} \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} Z_a &= \frac{Z_{ab} Z_{ac}}{Z_a + Z_b + Z_c} \\ Z_b &= \frac{Z_{ab} Z_{bc}}{Z_a + Z_b + Z_c} \\ Z_c &= \frac{Z_{bc} Z_{ac}}{Z_a + Z_b + Z_c} \end{aligned} \quad (2.4)$$

A corrente de c.c. é calculada pela lei de ohm:  $I_{cc} = V_0 / Z_{eq}$ , onde  $V_0$  é a tensão pré defeito e  $Z_{eq}$  é a impedância da rede a montante, calculada através de sucessivas conversões estrela-triângulo até se simplificar a rede ficando igual ao representado na Figura 2.11, posteriormente calcula-se a corrente nas diferentes linhas como sendo divisores de tensão e/ou corrente [1].

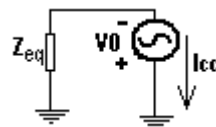


Figura 2.11-Equivalente da rede para cálculo da corrente de curto-circuito

A rede apresentada tem apenas dois geradores e algumas cargas e no entanto já é possível observar a dificuldade de calcular impedância equivalente aos terminais do defeito. Caso exista ligação á rede, a rede a montante deve ser representada como sendo um gerador

com impedância equivalente, calculada através da potência de curto-circuito da rede nesse ponto,  $Z_{cc}=(S_{cc})^{-1}$  em p.u.:

Como se pôde observar, o cálculo de correntes de c.c torna-se uma tarefa demasiadamente complexa para as grandes redes devendo recorrer-se outros métodos sistemáticos.

### 2.4.2 Matriz das impedâncias

A matriz das impedâncias fornece a impedância entre os diversos barramentos e na diagonal principal fornece as impedâncias relativas á terra. [1] Esta matriz é a inversa da matriz das admitâncias a qual é de construção directa, seguindo as seguintes regras:

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \vdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \vdots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \vdots & Y_{nn} \end{bmatrix}, \quad (2.5)$$

Onde:

- $Y$  é a matriz das admitâncias;

$$Y_{ik} = -y_{ik}, i \neq k, \quad (2.6)$$

$$Y_{ii} = \sum_{k \neq i} y_{ik} + y_{shi}, \quad (2.7)$$

$$y_{ik} = \frac{1}{R_{ik} + jX_{ik}} = \frac{R_{ik}}{R_{ik}^2 + X_{ik}^2} - j * \frac{X_{ik}}{R_{ik}^2 + X_{ik}^2}. \quad (2.8)$$

Com  $R_{ik}$  a representar a resistência da linha  $i-k$ ,  $X_{ik}$  representa a reactância da linha  $i-k$  e  $y_{shi}$  representa a admitância shunt do barramento  $i$ , é metade da soma das admitâncias á terra de todas as linhas que chegam ao barramento. Devido ao facto de os barramentos terem poucas linhas ligadas a matriz das impedâncias tem bastantes zeros, é esparsa.

A matriz  $Z$ , devido ao facto da matriz  $Y$  ser tipicamente esparsa, torna o cálculo da inversa bastante fácil. No entanto para grandes sistemas já o cálculo da matriz inversa se torna complexo pelo que se recorre a técnicas de construção directa da matriz  $Z$  [12]. Os cálculos de correntes de curto-circuito, com recurso á matriz  $Z$ , tornam-se quase directos pois esta matriz contém a informação de qual a impedância equivalente da rede a montante, vulgo,  $Z_{ii}$  representa o impedância de Thévenin entre o barramento  $i$  e a terra. O Valor de  $Z_{ij}$ , para  $i \neq j$  representa a impedância total entre o barramento  $i$  e  $j$ . Ficando assim o cálculo da corrente de defeito franco reduzido a  $I_{cc} = \frac{V_0^-}{Z_{ii}}$  (p.u.), sendo  $V_0^-$  a tensão pré defeito. Caso exista impedância de defeito  $Z_d$ , esta deve ser somada a  $Z_{ii}$ :

$$I_{cc} = \frac{V_0^-}{Z_{ii} + Z_d}, \quad (2.9)$$

Com  $Z_d$  a representar a impedância de defeito e  $V_0^-$  a representar a tensão pré defeito.

## 2.5 Curto Circuitos assimétricos

O defeito simétrico representa o pior caso em termos de magnitude da corrente de curto-circuito, no entanto os defeitos de fase-terra são bastante mais frequentes e devido a contactos fortuitos. Neste caso o sistema deixa de estar equilibrado e deixa de ser possível efectuar uma análise por fase convencional. Devido a se encontrar em desequilíbrio para além das elevadas correntes de curto-circuito existe o perigo de haver sobre-elevação da tensão nas fases sãs podendo conduzir a contornamentos dos isoladores (principalmente quando os isoladores têm pó e humidade), evoluindo assim para uma situação de defeito fase-fase ou fase-fase-terra, sendo este ultimo tipo de defeito, o pior dos assimétricos de elevada magnitude. Outro problema associado aos curto-circuito assimétricos é o facto de poder elevar a tensão no condutor de neutro o que pode constituir uma situação de perigo.

Para facilitar os cálculos das correntes nas diferentes fases, é necessário proceder a uma separação do sistema trifásico em sistemas monofásicos.

### 2.5.1 Métodos das componentes simétricas

Em 1918 Charles Fortescue apresentou um modelo capaz de separar qualquer sistema trifásico em três monofásicos independentes entre si e equilibrados, permitindo deste modo uma análise de três esquemas monofásicos, vindo facilitar a análise de sistemas desequilibrados. Estes três sistemas são separados em: uma componente directa, uma componente inversa e uma componente homopolar [11], estes três esquemas podem ser tratados independentemente, e o resultado final do sistema trifásico só depende das ligações entre as componentes simétricas, daí também ser conhecido por método das conexões.

A componente directa,  $I_+$ , vem associada á circulação de correntes no sentido directo dos enrolamentos do motor. Vem representada por três vectores de igual comprimento e desfasados entre si de  $120^\circ$ , quando o sistema se encontra equilibrado, só existe esta componente. A impedância directa é tipicamente igual á impedância da linha.

A componente inversa,  $I_-$ , vem modelizar a circulação de correntes inversas nos enrolamentos dos geradores e/transformadores. É representada por 3 vectores de igual comprimento e desfasados de  $120^\circ$ , no entanto com duas fases trocadas (ou com sentido de rotação contrário). Esta componente só é diferente de zero quando as correntes não são equilibradas nos enrolamentos, e como não é possível essas correntes escoarem através do neutro, implica que haja enrolamentos a ser percorridos no sentido inverso. Normalmente a impedância inversa é igual á impedância directa.

A componente homopolar,  $I_0$ , encontra-se associada á circulação de correntes para a terra, só é diferente de zero quando existem ligações à terra, através da estrela ligadas à terra dos transformadores e/ou geradores e também devido às admitâncias à terra das linhas. Esta

componente tem como objectivo modelizar os desequilíbrios iguais entre fases, ou seja circulação de correntes através do neutro e conseqüente elevação da tensão do neutro.

A impedância homopolar depende do tipo de ligação que existe nos transformadores, por exemplo num transformador com ligação Ynd não existirá circulação de componente homopolar entre os seus terminais, no entanto, a componente directa e inversa circulam normalmente, permanecendo as correntes do lado em triângulo assimétricas [11]. Os valores da impedância homopolar são diferentes da impedância directa e inversa, têm que ser fornecidos, dependendo da configuração da rede e existência de linhas em paralelo.

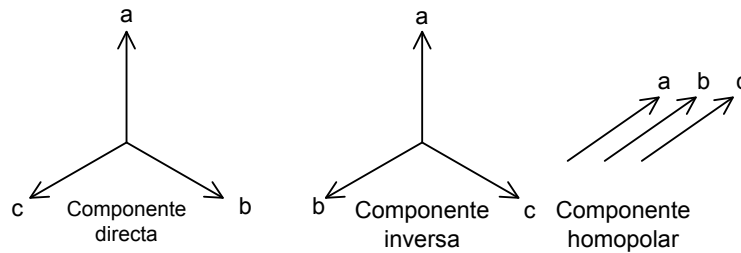


Figura 2.12-Separação das três componentes do sistema trifásico.

Através destas três componentes, cada fase fica representada em função de três componentes distintas e relacionam-se da forma:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}, \quad (2.10)$$

$\mathbf{A}$

$$I_a = I_a^0 + I_a^1 + I_a^2, \quad (2.11)$$

Sabendo que:  $I_b^1 = \alpha^2 I_a^1$  e  $I_b^2 = \alpha I_a^2$   
 $I_c^1 = \alpha I_a^1$  e  $I_c^2 = \alpha^2 I_a^2$

Conduz a:  $I_b = I_b^0 + I_b^1 + I_b^2 = I_a^0 + \alpha^2 I_a^1 + \alpha I_a^2,$  (2.12)

$I_c = I_c^0 + I_c^1 + I_c^2 = I_a^0 + \alpha I_a^1 + \alpha^2 I_a^2,$  (2.13)

Com  $\alpha = 1 * e^{j120^\circ}$ , logo  $1 + \alpha + \alpha^2 = 0$ .

$\mathbf{A}$  representa a transformada de Fortescue, como se pode observar é uma matriz complexa, e a segunda e terceira linhas indicam apenas uma rotação das componentes, onde se torna claro que a componente inversa roda em sentido contrário ao da directa e que a componente homopolar é igual para as três fases [8].

Para sistemas equilibrados, só pode existir componente directa, e facilmente se observa que a resolução do sistema (2.10), com  $I_0 = I_2 = 0$ , conduz á conhecida solução  $I_a = I_1$ ;  $I_b = \alpha^2 I_1$ ;  $I_c = \alpha I_1$ , que representa o sistema trifásico equilibrado, com um desfasamento de  $120^\circ$  entre fases. Também é frequente representar as componentes simétricas da forma  $I_h$ ,  $I_d$ ,  $I_i$ . A Figura 2.13 apresenta um exemplo onde só existe

componente directa e inversa de igual valor, podendo observar que o desfasamento entre 'b' e 'c' anulam-se, resultando um único vector da soma destas duas componentes.

De igual forma  $V_{abc}$  podem ser descritas através de equações semelhantes para  $V^{012}$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \underset{\mathbf{A}}{\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix}} * \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

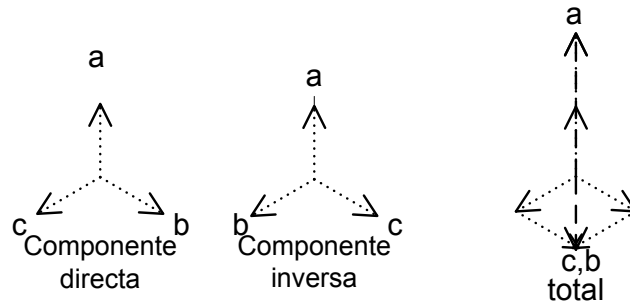


Figura 2.13-Sistema unicamente com componente directa e inversa.

Caso se conheça as grandezas por fase e se pretenda calcular as respectivas componentes basta recorrer á transformada inversa, ou seja, utilizar a matriz da transformada inversa,  $\mathbf{A}^{-1}$  [12].

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \underset{\mathbf{A}^{-1}}{\frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix}} * \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \underset{\mathbf{A}^{-1}}{\frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix}} * \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}, \quad (2.15)$$

$$I_0 = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) \quad V_0 = \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) \quad (2.16)$$

$$I_1 = \frac{1}{3}(I_a + \alpha I_b + \alpha^2 I_c) \quad V_1 = \frac{1}{3}(V_a + \alpha V_b + \alpha^2 V_c) \quad (2.17)$$

$$I_2 = \frac{1}{3}(I_a + \alpha^2 I_b + \alpha I_c) \quad V_2 = \frac{1}{3}(V_a + \alpha^2 V_b + \alpha V_c) \quad (2.18)$$

Tornando-se assim fácil a conversão do sistema em componentes directa, inversa e homopolar, para posterior análise por fase.

## 2.5.2 Curto circuito Fase Terra

Como já foi referido anteriormente, este tipo de defeito é o que apresenta menores correntes de curto-circuito pode-se verificar na Figura 2.14 onde se pode observar que só existe corrente na fase de defeito.

A representação em componentes simétricas é a associação dos três circuitos em série, ver Figura 2.15c. Após manipulação do sistema de equações ( 2.19), ou directamente através da transformada inversa ( 2.20), rapidamente se chega á conclusão que as três componentes assimétricas terão que ser de igual valor absoluto, para que unicamente a fase de defeito tenha corrente de defeito. A Figura 2.15 demonstra graficamente que a soma das componentes

simétricas para as fases saudáveis é nula. E para a fase em defeito é a soma dos valores absolutos destas [1].

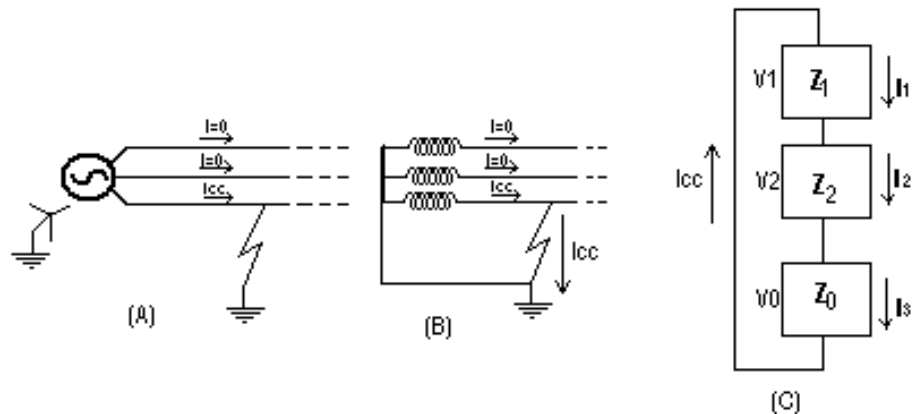


Figura 2.14-Curto-Circuito Fase Terra: A) e B) representação trifásica, C) representação das componentes simétricas.

Substituindo as correntes nas fases saudáveis ( $I_b$  e  $I_c$ ) por zero o sistema de equações fica da forma ( 2.19):

$$\begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (2.20)$$

$$I_0=I_1=I_2= \frac{1}{3} I_{cc} \quad (2.21)$$

Neste tipo de curto-circuito, através da análise da Figura 2.14 facilmente se conclui que a corrente de defeito pode ser calculada, e caso exista impedância de defeito, esta vem adicionada:

$$I_{cc} = \frac{3V_0^-}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3Z_d'} \quad (2.22)$$

Onde:

$V_0^-$  representa a tensão fase-neutro, pré defeito, na linha onde ocorre o defeito;

$Z_0, Z_1, Z_2$  representam as impedâncias directa, inversa e homopolar;

$Z_d$  representa a impedância de defeito.

Também pode ser calculado de forma matricial, recorrendo neste caso às matrizes de impedâncias directa, inversa e homopolar:

$$I_{cc} = \frac{3V_0^-}{Z_{ii}^0 + Z_{ii}^1 + Z_{ii}^2 + 3Z_d'} \quad (2.23)$$

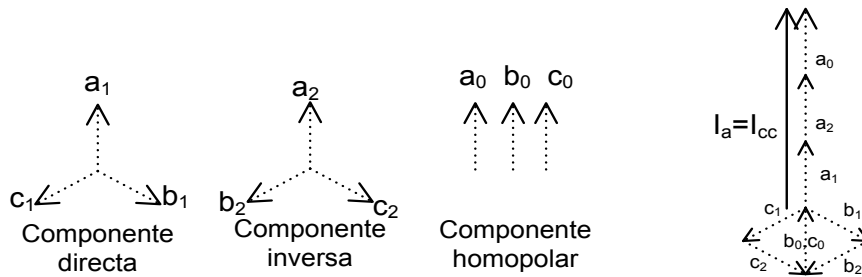


Figura 2.15-Componentes simétricas no caso CCFT. e respectiva representação trifásica.

### 2.5.3 Curto circuito fase fase

Este defeito resulta usualmente do contacto de animais ou objectos (por ex. ramos de arvores) entre dois condutores de fases distintas. Devido á inexistência de contactos á terra, neste caso não haverá circulação de componente homopolar. Na fase saudável não circula corrente, o que implica que a componente directa seja igual á componente inversa. Existe corrente c.c nas fases de defeito, circulando de uma fase para a outra, só existe componente directa e inversa, sendo estas componentes iguais de sentidos contrários. Na Figura 2.16 pode observar-se a representação de um defeito fase-fase e a respectiva representação das componentes simétricas e suas conexões, notar que no esquema que representa as conexões, vem explicito os sentidos contrários da componente directa e inversa [12].

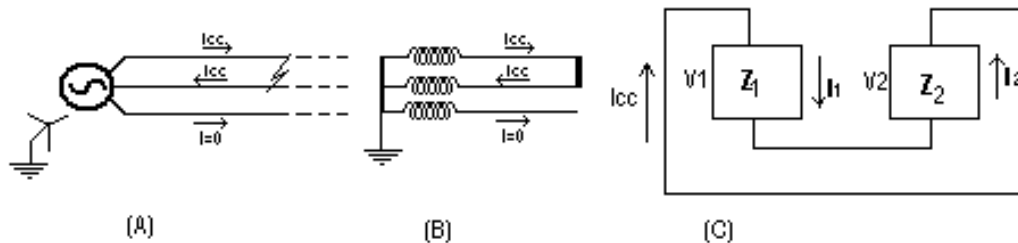


Figura 2.16- Curto-Circuito Fase Fase: A) e B) representação trifásica normal, C) representação das componentes simétricas.

As equações que relacionam as componentes simétricas com as componentes fasoriais vêm então:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ I_b \\ -I_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}; \tag{2.24}$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\ I_b \\ -I_b \end{bmatrix}; \tag{2.25}$$

$$I_0 = 0, \tag{2.26}$$

$$I_1 = -I_2 = \frac{1}{3} (\alpha - \alpha^2) I_b, \tag{2.27}$$

As componentes directa e inversa obtêm-se como:

$$I_1 = -I_2 = \frac{V_0^-}{Z_1 + Z_2 + Z_d}, \tag{2.28}$$

A corrente de defeito vem:

$$I_b = -I_c = -j\sqrt{3} \frac{V_0^-}{Z_1 + Z_2 + Z_d}, \tag{2.29}$$

Através da análise das expressões ( 2.28) e ( 2.29) facilmente se observa que esta corrente será superior á corrente de CCFT pois não existe a atenuação causada pela impedância homopolar em série. Na Figura 2.17 pode observar-se claramente que a soma das componentes simétricas na fase saudável é nula, e nas restantes fases, a soma destas componentes produz 2 vectores ( $I_b$  e  $I_c$ ) com o mesmo valor absoluto e sentidos opostos, isto é, existem  $180^\circ$  de defasamento entre a fase b e c, vindo assim confirmar que  $I_b = -I_c$ .

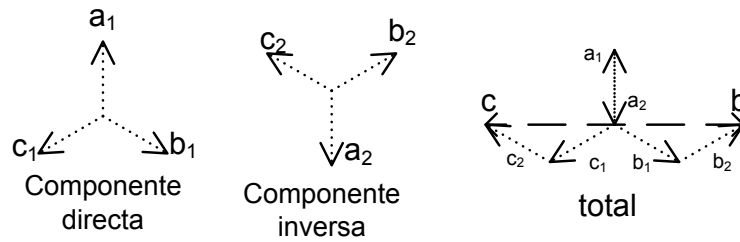


Figura 2.17-Componentes assimétricas de FF e respectiva representação trifásica.

### 2.5.4 Curto-circuito fase fase terra

Este é o mais grave dos curto-circuitos assimétricos produzindo correntes bastante próximas da corrente de defeito simétrico. Neste tipo de falha, a corrente resultante nas duas fases de defeito vem composta pelas três componentes, directa, inversa e homopolar. A Figura 2.18 representa o esquema deste tipo de falhas, onde se pode observar que a componente directa é igual á soma das outras duas componentes, tal deve-se ao facto de não circular corrente na fase saudável, o que implica que a soma das três componentes simétricas tem que ser nula [5].

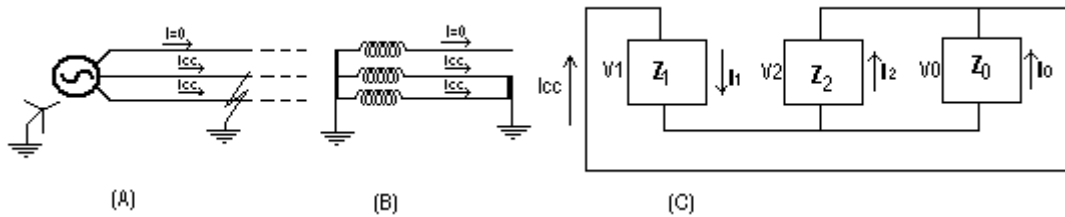


Figura 2.18- Curto-Circuito Fase Fase Terra: A) e B) representação trifásica normal, C) representação das componentes simétricas.

Substituindo a corrente na fase saudável por zero e manipulando o sistema de equações chega-se às correntes de s nas fases de defeito:  $I_b$  ( 2.36) e  $I_c$  ( 2.37)

$$\begin{bmatrix} 0 \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}; \tag{ 2.30}$$

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}; \tag{ 2.31}$$

$$I_0 = - \frac{V_0 - Z_1 I_1}{Z_0 + 3Z_f}, \tag{ 2.32}$$

Onde as componentes simétricas são:

$$I_1 = -\frac{V_0}{Z_1 + Z_2 // (Z_0 + 3Z_d)}, \quad (2.33)$$

$$I_2 = -\frac{V_0 - Z_1 I_1}{Z_2}, \quad (2.34)$$

$$I_a = 0, \quad (2.35)$$

Obtendo-se as seguintes correntes por fase:

$$I_b = \frac{-j\sqrt{3}(Z_0 - \alpha Z_2)V_0}{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_0 + Z_0 Z_2}, \quad (2.36)$$

$$I_c = \frac{j\sqrt{3}(Z_0 - \alpha^2 Z_2)V_0}{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_0 + Z_0 Z_2}, \quad (2.37)$$

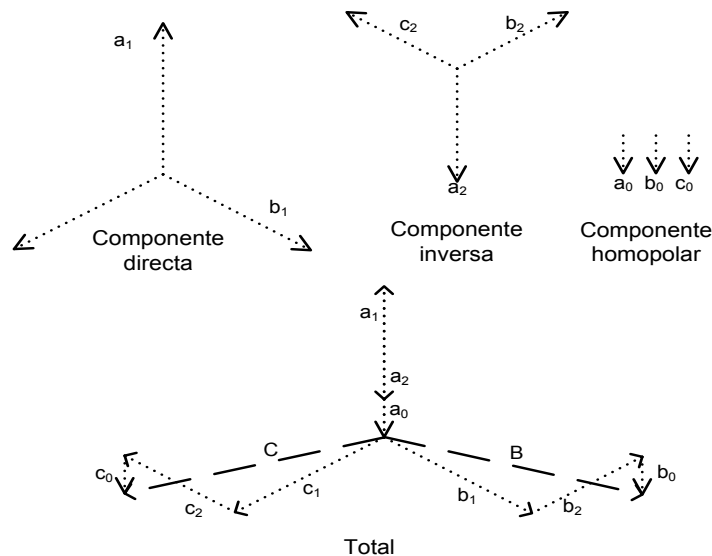


Figura 2.19- Componentes assimétricas de FFT e respectiva representação trifásica.

## 2.6 Aspectos construtivos de relés de protecção de máxima intensidade

Existem diversos tipos de dispositivos de protecção contra curto-circuitos. Os relés podem ser de diferentes tipos de funcionamento: electromagnéticos, de indução, térmicos, electrónicos (também chamados de estáticos) e digitais.

### 2.6.1 Relés electromagnéticos

Os relés electromagnéticos cujo princípio de activação baseia-se no facto de que o campo magnético criado pela corrente que circula através deles, produz uma força atractiva capaz de fechar os contactos do circuito operativo (circuito que ordena a abertura do disjuntor ou interruptor). Na Figura 2.20 pode observar-se um exemplo de um relé electromagnético.

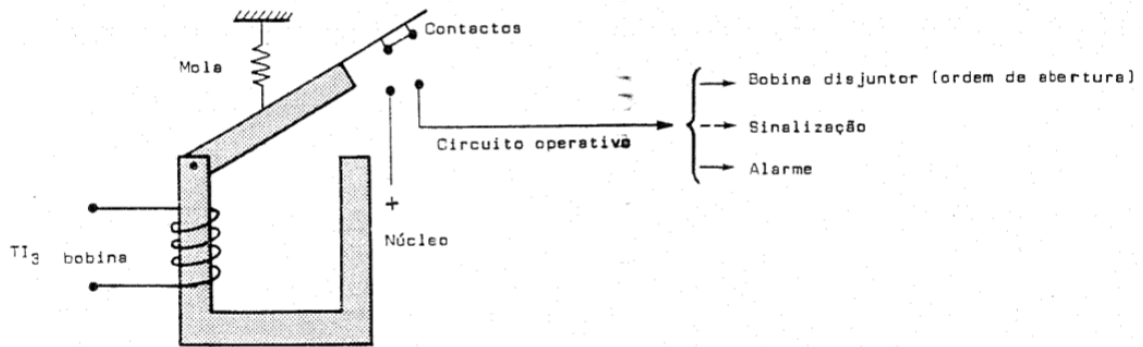


Figura 2.20-Exemplo de um relé electromagnético.

### 2.6.2 Relés de Indução

Os relés de indução, também têm o princípio de actuação baseado em electromecânica, neste caso, os relés utilizam um disco metálico que gira entre os núcleos de dois electroímãs que excitados por correntes alternadas produzem dois fluxos magnéticos. Cada fluxo induz no disco forças electromotrizas e conseqüentemente correntes eléctricas que interactuam com os fluxos magnéticos que as criaram, originando forças electromagnéticas que forçam o disco a rodar. Ver um exemplo na Figura 2.21.

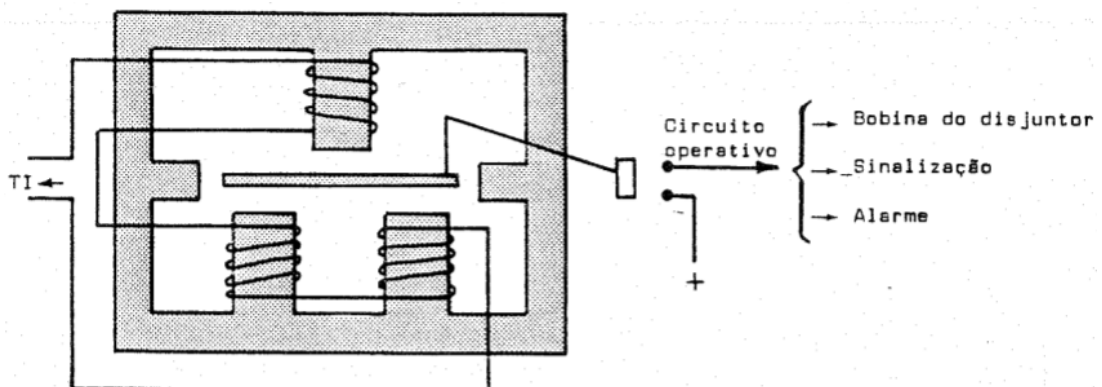


Figura 2.21-Exemplo de um relé de indução.

### 2.6.3 Relés electrónicos

Os relés electrónicos foram desenvolvidos bastante mais recentemente (face aos electromagnéticos e de indução) e devido á sua natureza de funcionamento, também se designam como relés estáticos, o princípio de funcionamento baseia-se na rectificação do sinal obtido do transformador de intensidade e posterior comparação com um valor de referência. Esta comparação é feita com recurso a transístores, na Figura 2.22 pode observar-se claramente que o sinal é primeiramente rectificado e estabilizado, e posteriormente é aplicado na base do transístor. Quando esse sinal ultrapassa o nível de polarização produzido pela fonte A, o transístor entra em condução, levando à actuação de B.

As protecções estáticas apresentam alguns problemas devido a interferência electrostáticas e electromagnéticas, as variações de temperatura também induzem problemas no correcto funcionamento deste tipo de relés, pois altera o ganho dos transístores, modificando assim os valores de disparo.

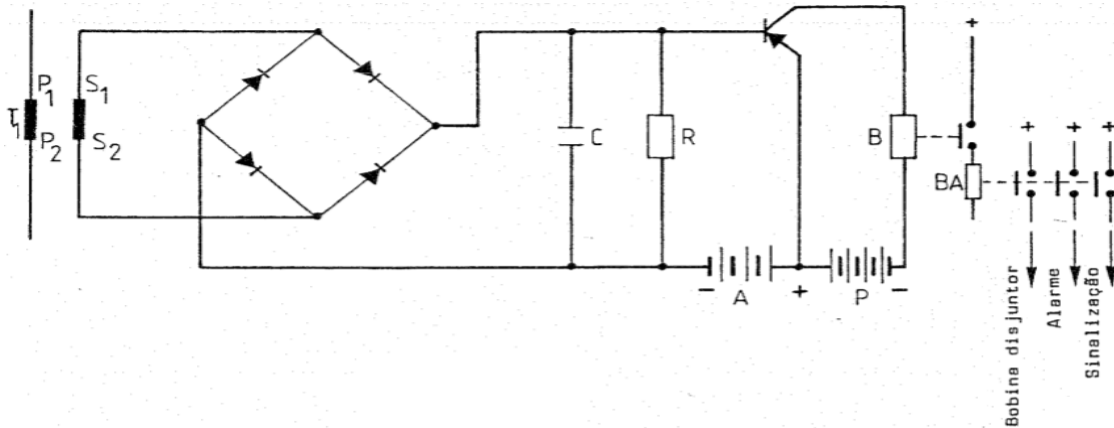


Figura 2.22-Exemplo de um relé electrónico.

#### 2.6.4 Relés Digitais

Actualmente, a investigação no campo das protecções é maioritariamente em sistemas de protecções digitais, baseadas em microprocessadores, sendo constituídas por um *hardware* bastante sofisticado e um *software* complexo e facilmente actualizável. Este tipo de dispositivos veio introduzir algumas vantagens nos sistemas de protecção de entre as quais se destacam [7]:

- Capacidade de num só equipamento realizar protecção para um conjunto de defeitos.
- Permitir uma melhor comunicação com outros equipamentos de protecção similares.
- A capacidade de gravar todos os acontecimentos em tempo real facilitando assim a reconstituição de eventos em caso de falhas e/ou actuações intempestivas.
- Monitorização e auto-deteção de defeitos internos permitindo assim a detecção de aparelhos que necessitem de manutenção ou de ser substituídos.
- Capacidade de realizar milhões de cálculos por segundo.
- Possibilidade de alteração dos *settings* remotamente e/ou telecomandado.

No entanto a sua natureza torna-os ainda pouco competitivos face aos electromagnéticos, devido a problemas de [7]:

- Interferências electrostáticas e electromagnéticas, de notar que este tipo de equipamentos encontra-se sempre perto de zonas com elevados campos magnéticos.
- Devido à complexidade dos sistemas e à quantidade de componentes, tornam-se mais susceptíveis a sofrer falhas internas, baixando assim a sua fiabilidade
- Actualmente a maioria dos relés instalados são de princípios de actuação mecânica, não permitindo a utilização de grande parte das vantagens dos relés digitais.

- Perigo de transmissão de picos de tensão para os circuitos electrónicos, podendo danificar ou eliminar a programação actual do mesmo.

Os relés digitais são certamente o futuro dos sistemas de protecção, embora ainda haja muito a evoluir no campo dessas protecções.

## 2.7 Relés de protecção de máxima intensidade homopolar

Não existem dispositivos capazes de detectar directamente a corrente homopolar pelo que é necessário recorrer a processos que através da soma vectorial das correntes nas três fases, obtêm o valor da componente homopolar.

Uma solução para detecção da componente homopolar pode ser obtida através da ligação em estrela de três relés de máxima intensidade, como se pode observar na Figura 2.23, a configuração de Holmgreen permite com recurso a três relés realizar simultaneamente a protecção de MI e MH. A existência de correntes homopolares, resulta da soma das correntes das fases ser diferente de zero. Ou seja, o ponto neutro da estrela deixa de estar a potencial zero, o significa que o condutor de neutro está a ser percorrido por uma corrente que será tanto maior, quanto maior o desequilíbrio entre as fases. No entanto esta solução apresenta baixa sensibilidade para pequenos desequilíbrios [4].

Outra solução possível e muito presente no sistema eléctrico, é a montagem de um transformador toroidal, esta montagem apresenta muito mais sensibilidade e precisão, pois a medida é mais directa. Caso as correntes estejam igualmente distribuídas pelas três fases, a soma vectorial das correntes é nula pelo que não irá induzir correntes no secundário do transformador. Caso esteja a ocorrer um curto-circuito do tipo FT ou FFT, serão induzidas correntes no secundário que conduzem ao disparo do relé MH. Na Figura 2.24 vem apresentado o esquema de montagem de um relé de MH, com recurso a um transformador toroidal. O princípio de funcionamento destes dispositivos é em tudo semelhante aos Interruptores Diferenciais, diferindo essencialmente na calibração.

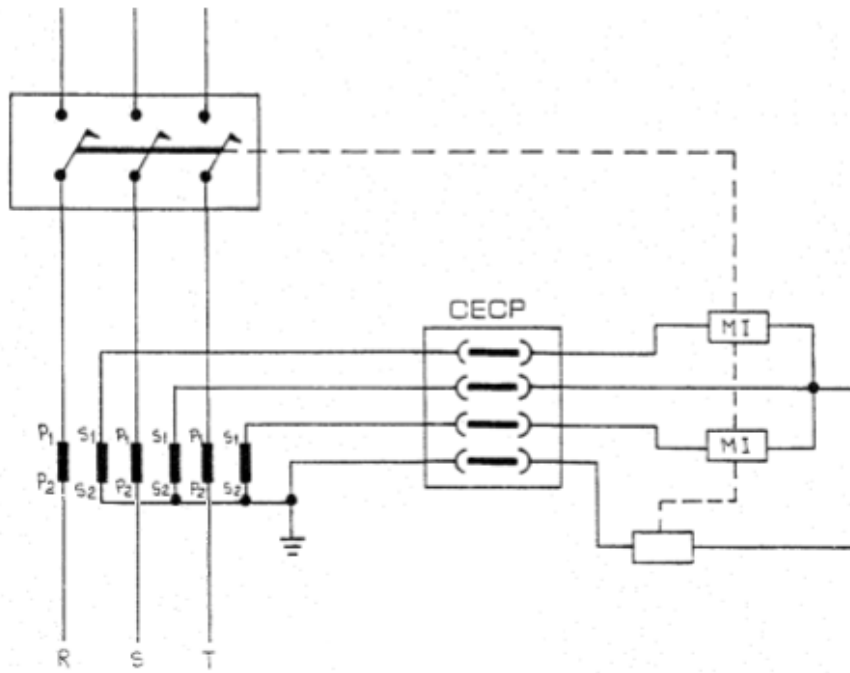


Figura 2.23-Esquema de montagem de protecção MI e MIH, configuração de Holmgreen.

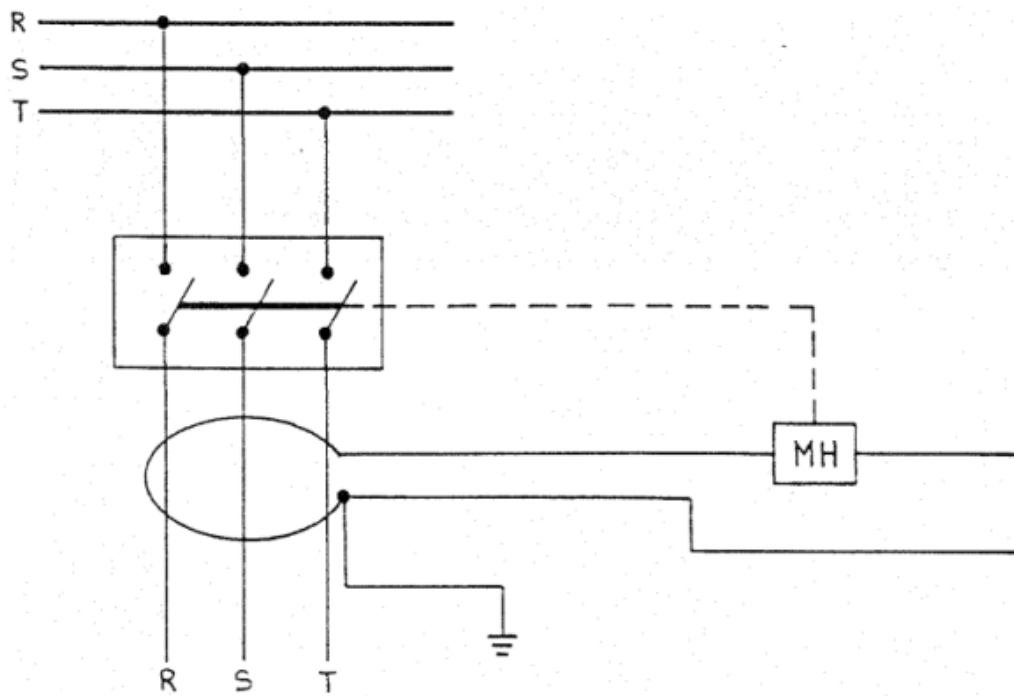


Figura 2.24-Esquema de montagem de um relé de MH com transformador toroidal.

## 2.8 Sumário

Neste capítulo foi feita uma breve revisão sobre sistemas de protecção e sua importância para que o sistema preserve o bom funcionamento. Foram apresentados os tipos de defeitos que ocorrem mais regularmente na rede, e quais os malefícios que estes trazem para o sistema. Foram revistos os tipos de relés capazes de identificar e isolar os diferentes tipos de defeitos.

No que diz respeito às falhas devido a curto circuitos, foi feita a revisão dos diferentes tipos de falhas e cálculo da respectiva magnitude, tanto para defeitos simétricos como assimétricos.

Foi ainda apresentado o princípio de funcionamento dos relés tradicionais de máxima intensidade e máxima intensidade homopolar. Tendo sido realizada uma breve revisão sobre os tipos de relés de protecção mais relevantes.



## Capítulo 3

# Optimização e algoritmos evolucionários

### 3.1 Introdução

Neste capítulo será apresentado o problema da optimização, quais necessidades e métodos para optimizar, seja maximizar ou minimizar. Será feita uma breve revisão sobre alguns métodos clássicos, quais as vantagens e desvantagens. Serão apresentados alguns métodos de optimização meta-heurísticos e evolucionários quais as vantagens e desvantagens.

Irá ser apresentado os conceitos básicos sobre algoritmos genéticos e evolucionários, os quais são inspirados na teoria da evolução de Darwin. De entre os quais se aprofundará os algoritmos de optimização por enxames de partículas e algoritmos evolucionários de optimização por enxames de partículas, devido à relevância que apresentam para este projecto.

A optimização é um processo de localização do óptimo de uma dada função que caracteriza um dado problema. Esse óptimo é sempre um ponto de máximo no caso de uma maximização, ou mínimo no de se proceder a uma minimização. Os pontos de máximo e mínimo das funções gozam da propriedade de a derivada da função em questão ser nula. Podendo então a pesquisa do óptimo basear-se em métodos iterativos de detecção de zero.

Existem dois tipos de metodologias no que diz respeito à pesquisa de pontos óptimos: as clássicas e as meta-heurísticas. Os métodos clássicos implicam um conhecimento intrínseco do problema, de forma a poder caracteriza-lo completamente por uma função matemática de modo a poder calcular-se a derivada dessa função e assim calcular os zeros e encontrar o ponto óptimo.

Os problemas de planeamento, nomeadamente em sistemas de energia apresentam em geral funções objectivo não lineares, as limitações de diversa natureza existentes, estabelecidas devido a requisitos legais ou técnicos, apresentam-se igualmente com características não lineares em grande parte dos casos. A linearização dos objectivos e das restrições, conduz a soluções aproximadas que embora não sejam exactas, têm a vantagem de ser obtidas em tempo

eficiente. Tais aproximações devem sempre ser utilizadas com precaução pois poderão conduzir a erros excessivos face à precisão requisitada pelo sistema.

### 3.2 Métodos clássicos e tradicionais de optimização

Os métodos clássicos podem ser directos, caso seja possível resolver directamente a equação  $F(x)=0$ , ou no caso de a função não ter inversa ou essa função resultar da combinação diversas funções e resulte na existência de diversos zeros, é necessário separar a função por ramos, onde esta seja injectiva e encontrar o zero nos diversos ramos.

Alternativamente poderá recorrer-se a métodos iterativos, os quais não fornecem as soluções exactas, mas sim soluções aproximadas com grande precisão. Estes métodos têm a vantagem de encontrar o ponto máximo para a função pretendida, partindo de uma posição inicial. No entanto neste tipo de métodos não há garantias de que o ponto encontrado seja efectivamente o máximo, isto é, o máximo global de toda a função no intervalo definido. Para tal seria necessário correr o algoritmo para pesquisar o mínimo partindo do ponto máximo obtido e depois voltar a pesquisar o máximo, restringindo a zona onde foi encontrado o máximo actual, podendo este processo tornar-se bastante moroso. Outros algoritmos permitem a degradação da solução óptima ou introduzem um termo de inércia conduzindo a que o processo ultrapasse o máximo local. Este tipo de conceito é utilizado por alguns algoritmos meta-heurísticos, como por exemplo o *simulated annealing*, como será visto mais há frente. Na Figura 3.1 pode observar-se uma função com diversos máximos, que caso se iniciar um processo de pesquisa de máximo no lado esquerdo, será muito provável que o resultado final seja o primeiro máximo sem nunca se descobrir o máximo global à direita.

Existem diversos processos iterativos para a resolução de equações  $F(x)=0$ , como por exemplo o método das bissecções sucessivas, o método de Euler, o método iterativo simples, o método de Newton, multiplicadores de Lagrange, etc.

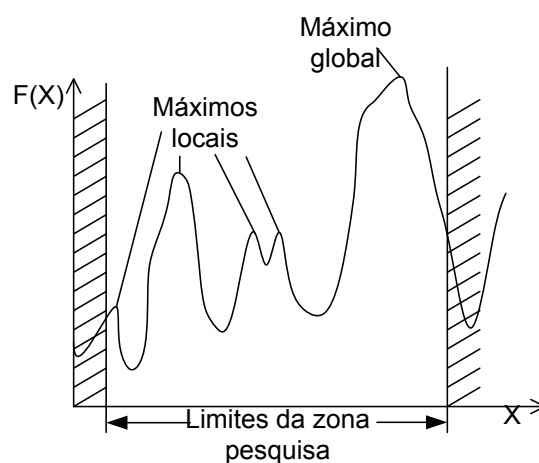


Figura 3.1-Exemplo de função unidimensional com diversos máximos locais.

### 3.2.1 Método de Newton

O método de Newton é um dos mais poderosos métodos de resolução de problemas do tipo  $F(x)=0$ . Este método parte de um ponto inicial e com base na derivada nesse ponto e no valor da função nesse ponto, encontra o próximo ponto de pesquisa [13].

$$\text{onde:} \quad x_{n+1} = x_n - \frac{F(x_n)}{F'(x_n)}, \quad (3.1)$$

F é a derivada da função a maximizar,  
F' a segunda derivada da função.

Este método apresenta uma convergência bastante rápida, mas como é obvio implica o recurso a cálculos que por vezes são demasiado complexos. Nunca existe garantia de ser um ponto máximo global ou local.

### 3.2.2 Método do gradiente

Este método também conhecido como *steepest descent*, cujo próprio nome indica, segue na direcção que mais desce. Este processo é apropriado para lidar com problemas multi-dimensão e a regra de avanço no espaço é seguir na direcção mais íngreme. A regra do movimento vem apresentada pela (3.2)

$$\text{onde:} \quad X_{n+1} = X_n + k * \nabla F(X_n), \quad (3.2)$$

$F(X_n)$  é a função a optimizar,  
n é a iteração actual,  
k é o passo de iteração (escalar, negativo para minimização).

Este método apresenta uma convergência rápida, caso se utilize um passo elevado, rapidamente chega próximo do ponto óptimo, mas depois o método tende a circular em torno do óptimo devido a ultrapassar o óptimo. Caso se utilize um passo baixo, o método tende a avançar pouco de iteração para iteração [14]. Para resolver este problema tem que se adoptar metodologias de diminuição gradual do passo, seja de forma linear ou com recurso a uma função que varie com  $F(X_{n-1})$  e  $F(X_n)$ .

### 3.2.3 Método de *Simulated annealing*

Este método de pesquisa estocástica, é inspirado na cristalização de alguns materiais, ou no processo de recozimento. Quando se aquece um metal até á temperatura de fusão, e depois se vai sucessivamente baixando a temperatura, este vai solidificando e as suas propriedades vão se alterando criando metais diferentes. Este processo vai-se repetindo sucessivamente até se atingir um limite de variação de temperatura. Enquanto a temperatura estiver alta, a probabilidade (3.3), de este ‘saltar’ para novas soluções é elevada, isto é, o processo vai gerando novas soluções. Quando a temperatura está baixa, o processo tende a optimizar a melhor solução actual. Em suma, o processo inicialmente produz diversas soluções e vai pesquisando por todo o espaço permitido, com o avançar das iterações, e consequente diminuição da temperatura(3.5),

o algoritmo tende a fixar-se na zona actual de pesquisa e finalmente, quando a temperatura chega a zero, o algoritmo assume uma forma de pesquisa semelhante ao método do gradiente.

A Figura 3.2 apresenta um diagrama de blocos, referente ao processo iterativo de pesquisa em questão [15].

Devido a este método ser um método de pesquisa estocástica, não existe garantias de que o óptimo global seja atingido, no entanto está provado que este tem uma elevada probabilidade de encontrar o máximo global [16].

Parâmetros que caracterizam o método:

$$P = e^{\frac{\Delta E}{T}}, \quad (3.3)$$

$$\Delta E = F(X_n + \Delta X) - F(X_n), \quad (3.4)$$

onde:  $T_{n+1} = \alpha T_n, \quad (3.5)$

P é a probabilidade de aceitar novas soluções,

$\Delta E$  é a variação da energia da partícula,

$F(X)$  é a função a otimizar,

T é a temperatura actual

$\alpha$  é a uma constante próxima de 1, sempre menor que 1.

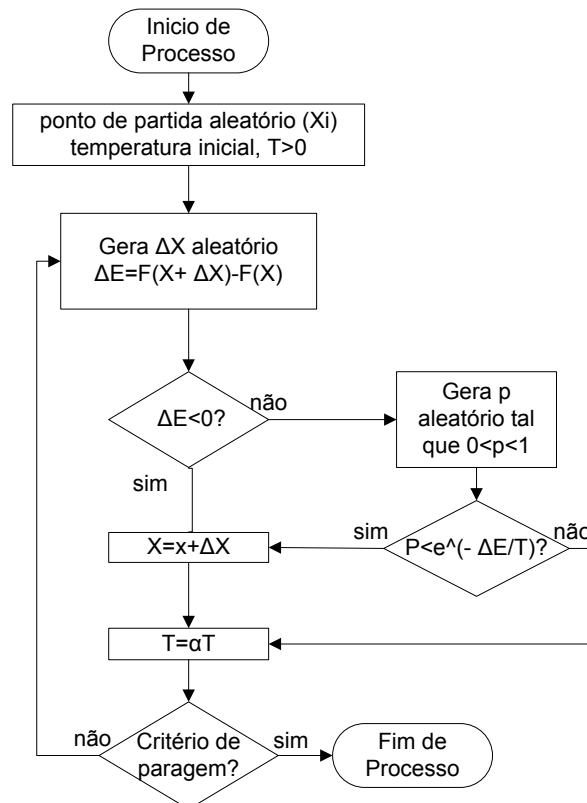


Figura 3.2-Diagrama de blocos representando o algoritmo *simulated annealing*.

### 3.3 Algoritmos Genéticos

Os algoritmos genéticos (GA) foram desenvolvidos por John Holland nos seus trabalhos em 1960 [17] e também por Goldberg [18]. Estes algoritmos foram inspirados na teoria de Darwin sobre evolução natural, sendo um processo em que as sucessivas gerações de plantas e/ou animais vão guardando as melhores características dos antecessores, de forma a irem adoptando uma característica perfeitamente adaptada ao meio onde vivem [16].

Este é um método de genótipo<sup>1</sup>, ou seja, as as variáveis do problema são codificadas sob a forma de genes, sendo cada elemento um cromossoma, uma sequência de *bits* que codificam o problema. Esta codificação implica a execução de um algoritmo descodificador para extrair as variáveis naturais do problema. A Figura 3.3 apresenta o exemplo de uma codificação de um elemento cuja representação natural é os valores 2 e 5, que representam em binário 0010 e 0101, respectivamente.

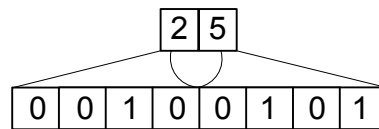


Figura 3.3-Representação de uma possível codificação de um gene.

Cada geração guarda parte dos genes dos progenitores, mas sofre sempre uma mutação de modo a que os elementos, cujas características se alterarem no sentido de uma melhor adaptação ao meio terão maiores probabilidades de sobreviver e de procriar. Cada elemento é caracterizado por um conjunto de genes que são combinados entre os diferentes progenitores para gerar novos elementos. [19]

Um gene é representado por um *bit*, sendo um cromossoma representado por um conjunto de *bits*. Para a procriação são permitidas operações de recombinação entre os progenitores, cruzando os *bits* num dado ponto de intersecção aleatório e mutação através da inversão de bits escolhidos aleatoriamente, ver Figura 3.4 [20].

Na fase selecção, são escolhidos os cromossomas que seguem para a próxima geração, podendo recorrer a diferentes regras de selecção:

- Processo de selecção elitista, são seleccionados melhores elementos entre a geração mutada e os progenitores.
- Torneio estocástico, de entre dois elementos aleatórios, o mais forte é seleccionado com uma probabilidade  $p$ , e existe a probabilidade  $1-p$  de ser seleccionado um elemento fraco (tipicamente  $p=0.8$ ). O Objectivo deste factor aleatório é permitir uma pesquisa mais vasta no espaço.

<sup>1</sup> O genótipo é a composição genética elementar de um organismo relativamente a uma ou várias características que determinam a transmissão dessas mesmas características por via hereditária [26].

- Selecção proporcional ao *fitness*, existe uma probabilidade associada ao valor do *fitness* de cada partícula sendo a escolha função de um valor probabilístico, desta forma é possível que algumas boas soluções sejam descartadas em detrimento de algumas piores, permitindo uma mais vasta pesquisa no espaço.

Pode observar-se na Figura 3.4 os processos inerentes à replicação e mutação dos cromossomas. Neste caso, dois cromossomas geram dois descendentes, através do cruzamento num ponto escolhido aleatoriamente. Depois cada descendente sofre mutação em genes escolhidos de forma aleatória. Sendo depois avaliados cada um dos novos cromossomas e seleccionados os melhores para a próxima geração.

Na Figura 3.5 vem representado de forma simplista os diversos processos efectuados para a execução de um algoritmo genético.

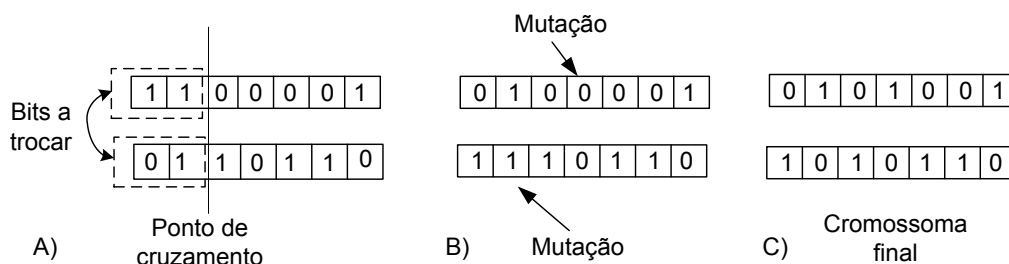


Figura 3.4- Exemplo da sequência de alterações sofridas por 2 cromossomas.

Deve haver especial atenção no que diz respeito ao espaço de pesquisa. A função de avaliação deve penalizar os cromossomas que ultrapassem o espaço de pesquisa, baixando a probabilidade de esses serem seleccionados para a próxima geração. Outra opção para lidar com os limites de pesquisa, pode ser limitando a localização de novas partículas, isto é, após uma partícula ser criada e mutada, deve realizada uma nova mutação que introduza as partículas dentro dos limites. Por exemplo, no problema do despacho económico, os geradores têm limites máximos e mínimos de produção.

Quando algum gerador ultrapassa o valor máximo permitido, deve-se penalizar na função objectivo. Por outro lado, na condição de que a produção tem que ser igual ao consumo mais as perdas, é preferível fazer um ajuste de forma proporcional, repartindo por todos os geradores a diferença entre a potência gerada e as cargas somadas das perdas.

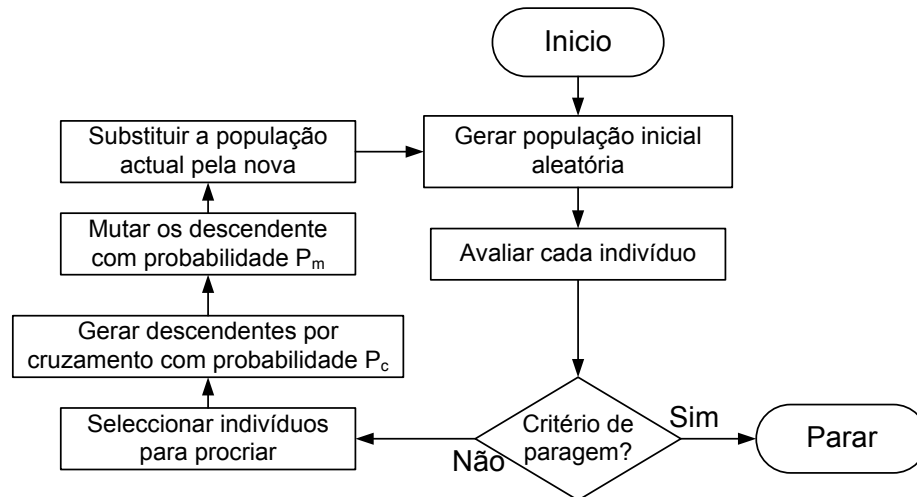


Figura 3.5-Diagrama de blocos representando os passos de um algoritmo genético

### 3.4 Estratégias de Evolução

As estratégias de evolução (ES) foram desenvolvidas na década de 1960 por I. Rechenberg e H.P. Schwefel, tendo sido também inspiradas na teoria da evolução de Darwin, as ES foram a ‘versão alemã’ algoritmos evolucionários. Convém frisar que na altura em que estes algoritmos foram descobertos, não existiam tanta facilidade de comunicação entre os diversos países, tendo sido os GA desenvolvidos nos EUA e as ES na Alemanha, cada um escrevendo artigos na sua língua natural, foi difícil existir cooperação. Só nos anos 80 é que começaram fazer contactos regulares e desde então tem havido cooperação e convergência entre estas duas filosofias [20].

Os algoritmos de ES são métodos fenótipos<sup>1</sup>, onde não existe codificação das variáveis para a execução do algoritmo. Esta é a principal diferença entre os GA e as ES. É possível separar então os algoritmos em diferentes categorias [20]:

- Fenotípica pura – o indivíduo é representado nas mesmas variáveis com a mesma forma que usadas na função de adaptação.
- Fenotípica transformada – a codificação representando um indivíduo compõe-se das mesmas variáveis que na função de adaptação mas numa forma distinta da utilizada nela.
- Genética – a descodificação da representação de um indivíduo exige um programa para construir, a partir dela, a sua representação fenotípica.

Hoje em dia existem diversos modelos de ES, tendo sido definido o modelo canónico de Schwefel, o modelo  $(\mu, \kappa, \lambda, \rho)$  ES, em que:

<sup>1</sup> Fenótipo é a característica física ou o comportamento visível de um organismo ou de um ser humano por oposição ao genótipo, que é a constituição genética dos indivíduos inscrita nos cromossomas [26]

- $\mu$  - Número total de progenitores numa geração
- $\kappa$  - Número de gerações em que um indivíduo sobrevive ou número de ciclos reprodutivos de um indivíduo
- $\lambda$  - Número total de descendentes criados numa geração
- $\rho$  - Número de progenitores de um indivíduo

A esta luz, um modelo de Programação Evolucionária com 1 progenitor por indivíduo com base em mutação e em que os pais não sobrevivem para a geração seguinte pode ser referido como uma Estratégia de Evolução do tipo  $(\mu,0,\mu,1)$ ES. Ou seja, toda uma família de processos podem ser iniciados, dependendo da escolha de valores para os parâmetros acima. Algumas dessas variantes foram intensamente exploradas e outras ainda permanecem em aberto.

Os primeiros modelos de ES exibiam menos graus de liberdade que os acima descritos. De facto, o primeiro de todos veio a ser conhecido como a estratégia  $(1+1)$ ES: tem, em cada geração, um único indivíduo, o qual gera por mutação um novo indivíduo, agindo a selecção sobre o conjunto constituído por progenitor e descendente. Mais tarde, apareceram as estratégias designadas como  $(\mu+\lambda)$ ES e  $(\mu,\lambda)$ ES, sendo aqui introduzida a notação  $(,+)$ . Na verdade, enquanto na estratégia  $(\mu+\lambda)$ ES os  $\mu$  sobreviventes para a geração seguinte são escolhidos ou seleccionados de entre o conjunto formado pela união dos  $\mu$  progenitores anteriores e dos seus  $\lambda$  filhos, na estratégia  $(\mu,\lambda)$ ES, com  $\lambda \geq \mu \geq 1$ , os futuros  $\mu$  progenitores da geração seguinte e que sobrevivem de uma dada geração são seleccionados dentro do conjunto dos  $\lambda$  descendentes dessa geração apenas, independentemente da qualidade dos seus  $\mu$  progenitores. Os primeiros modelos da estratégia  $(,)$  foram do tipo  $(1,\lambda)$  ES, com um único indivíduo originando  $\lambda$  descendentes de entre os quais o melhor é seleccionado para a geração seguinte.

Foi mostrado que nas estratégias  $(\mu,\lambda)$  ES pode ocorrer divergência, se a solução “correntemente melhor” não for guardada externamente ou, pelo menos, preservada para a geração seguinte. Este procedimento determinístico recebe o nome de elitismo.

A estratégia  $(\mu,\lambda)$  ES implica que um indivíduo tem descendência apenas uma vez, e que a sua duração de vida cobre apenas uma geração, enquanto que a estratégia  $(\mu+\lambda)$  ES não impõe qualquer limite à duração de vida de um indivíduo.

Quando se definem as estratégias e modo mais completo com a notação  $(\mu,\kappa,\lambda,\rho)$  ES, compreendemos que o parâmetro  $\kappa$  origina uma situação intermédia entre os casos extremos  $(\mu,\lambda)$ ES e  $(\mu+\lambda)$ ES. Por outro lado, o parâmetro  $\rho$ , que define quantos progenitores tem um novo indivíduo, introduz explicitamente a operação de recombinação entre ascendentes como mecanismo condicionador da evolução numa dada estratégia.

Uma ES deverá ter um código semelhante a [20]:

*Procedure ES*

```

(BEGIN)
fixar  $\mu, \kappa, \lambda, \rho$  e outros parâmetros;           // definir parâmetros e operadores
fixar operadores(rec, mut, sel);
g := 0;                                               // iniciar o contador de gerações
Initpopulation P[g];                                 // inicializar uma população aleatória P de  $\mu$  elementos
Evaluate P[g];                                       // Avaliar a adaptação de todos os indivíduos da população
while g < GenMAX do                                  //correr o algoritmo durante GenMAX gerações
// reprodução - gerar  $\lambda$  descendentes:
P' [g] := recombine(P [g]);                          //...por recombinação
[g] := Mutate ( P' [g] );                             // ...por mutação - introduzir perturbações estocásticas na nova
população
Evaluate P [g];                                     // avaliação – calcular a adaptação dos novos indivíduos
P [g+1] := select ( P[g] U P' [g] );                 //selecção - de  $\mu$  sobreviventes para a geração seguinte, com base
no valor da adaptação
g := g + 1;                                         // Incrementar o contador de gerações
End while                                           //terminar processo iterativo quando atingir o numero máximo de
gerações

```

*End ES*

Como se pode observar, este algoritmo segue uma lógica semelhante ao da Figura 3.5.

As Estratégias de Evolução designam uma vasta família de algoritmos evolucionários que têm em comum uma representação fenotípica dos problemas, ou seja, a representação das soluções no espaço das variáveis naturais do problema, em vez de recorrer a codificações, nomeadamente binárias, adoptadas nos Algoritmos Genéticos.

A Programação Evolucionária foi desenvolvida independentemente e as duas escolas, alemã e americana, eventualmente convergiram, em particular no que se refere a problemas com variáveis reais. [20]

### 3.5 Optimização por enxames de partículas

PSO, Optimização por Enxame de Partículas (*Particle Swarm Optimization*) é um algoritmo de pesquisa da família dos algoritmos meta-heurísticos. Foi desenvolvido por James Kennedy e Russel Eberhart [21], foi inspirado no movimento de aves à procura de peixe, tendo apresentado grandes vantagens na resolução de problemas não lineares e/ou de difícil modelação matemática. Este é um algoritmo de população, tal como os algoritmos evolucionários e genéticos, sendo no entanto baseado na cooperação em vez de rivalidade.

O PSO é de fácil implementação, não sendo necessário o conhecimento e/ou formulação matemática do problema a otimizar. Sendo um algoritmo de pesquisa estocástica, é possível que este não convirja para a solução óptima, existe garantia que atinge o óptimo local, mas

devido á presença de parcelas aleatórias, o algoritmo percorrerá sempre caminhos diferentes para o óptimo. Existindo assim soluções finais que sejam óptimos locais, no entanto o algoritmo poderá convergir para diferentes óptimos locais, sendo que em diversas execuções convergirá para o óptimo global.

Durante cada iteração só é necessária uma avaliação da solução (*Fitness*), podendo ser uma avaliação qualitativa ou quantitativa, sendo esta a principal vantagem face aos algoritmos de pesquisa clássicos, os quais necessitam de conhecimento do gradiente, o conduz a que a próxima solução seja sempre melhor que a actual.

Este algoritmo meta-heurístico executa uma pesquisa aleatória no espaço, em que um conjunto de partículas que vão percorrendo o espaço, deslocando-se baseando-se unicamente na sua velocidade (inércia), na experiência pessoal da partícula (melhor posição alguma vez atingida pela partícula nas diversas iterações), e na experiência do grupo em que se encontra inserida, ou na experiência do enxame total (melhor posição atingida pelas diversas partículas) desta forma a partícula deslocar-se-á para uma posição tal que:

$$\text{onde: } X_i^{new} = X_i + V_i^{new}, \quad (3.6)$$

$X_i$  é a posição da partícula na iteração  $i$ ,

$V_i$  é a velocidade da partícula na iteração  $i$ .

$$\text{onde: } V_i^{new} = V_i + c_1 * \text{Rand} * (X_{iB} - X_i) + c_2 * \text{Rand} * (X_{sB} - X_i), \quad (3.7)$$

$c_1$  e  $c_2$  são constantes que, modelizam a experiência da partícula e do grupo,

Rand representa um numero aleatório,

$X_{iB}$  e  $X_{sB}$  representam as melhores posições onde a partícula já passou, e onde o enxame todo já passou, respectivamente.

As equações ( 3.6) ( 3.7) apresentam assim a fórmula mágica para fazer convergir um algoritmo cujo ex-líbris é a simplicidade. No entanto o algoritmo nesta forma apresentava alguns problemas em convergir para o óptimo, embora convergisse rapidamente no início, após o enxame se aproximar do óptimo, este formava uma nuvem, aproximando-se muito lentamente do óptimo, podendo até nunca atingir o óptimo. Esse fenómeno deve-se ao facto da componente inércia tornar-se muito elevada quando o enxame está perto do óptimo, pois  $X_{sB}-X_i$  e  $X_{iB}-X_i$  são números pequenos, mantendo-se  $V_i$  elevado, conduzindo a partícula a afastar-se, ultrapassando o máximo, depois  $X_{sB}-X_i$  e  $X_{iB}-X_i$  tornam-se elevados, arrastando a partícula para junto do óptimo. Para lidar com esse fenómeno foi introduzido um parâmetro decrescente associado á inércia [22], para que se torne mais preciso no final. Obtendo-se a expressão para a velocidade da partícula:

$$\text{onde: } V_i^{new} = \omega_i V_i + c_1 * \text{Rand} * (X_{iB} - X_i) + c_2 * \text{Rand} * (X_{sB} - X_i), \quad (3.8)$$

$\omega_i$  representa um parâmetro decrescente ao longo das iterações, é usual utilizar uma variação linear entre  $\omega_{max}$  e  $\omega_{min}$  definidos inicialmente.

Outra versão foi proposta por Maurice Clerc [23] na qual é utilizado um factor de constrição  $K$ , definido por ( 3.10) , este factor traduz numa limitação de amplitude da velocidade da partículas, sendo agora a velocidade definida por( 3.9)

$$V_i^{new} = K_k[V_i + W_{m1} * Rand * (X_{iB} - X_i) + W_{m2} * Rand * (X_{sB} - X_i)], \quad (3.9)$$

onde:

$$K_k = \frac{1}{|2 - W_k - \sqrt{W_k^2 - 4W_k}|}, \quad (3.10)$$

$W_k = W_{m1} + W_{m2}$  e  $W_k > 4$ .

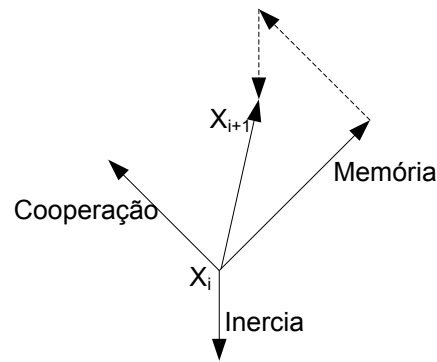


Figura 3.6- Exemplo do movimento de uma partícula no PSO.

Os pesos  $c_1$  e  $c_2$  deveram ser definidos adequadamente para cada problema e a escolha destes constitui a maior dificuldade na programação do algoritmo. Inicialmente os valores mais indicados foram encontrados empiricamente, sendo que com base nestes 3 pesos podem ser definidos 4 métodos de pesquisa:

$C_1, c_2 > 0$ , modelo de pesquisa normal.

$C_1 > 0, c_2 = 0$ , modelo de pesquisa individual, segue a intuição.

$C_1 = 0, c_2 > 0$ , modelo de pesquisa cooperativo, segue o melhor do enxame.

$C_1 = 0, c_2 > 0, X_{ib} \neq X_{gb}$ , pesquisa cooperativa ,seguinto o melhor dos restantes.

O número de partículas,  $N$ , deverá ser tal que permita que as partículas sejam suficientes para cobrir/ percorrer a maior parte do espaço. Um número pequeno de partículas conduzirá a potenciais resultados óptimos locais, um número demasiado elevado de partículas conduzirá a uma maior probabilidade de encontrar o óptimo global, sendo a execução do algoritmo mais demorada.

Existe a necessidade de utilizar um número  $it_{máx}$ , muito elevado de gerações para que haja a garantia estatística de que as partículas cobrem grande parte do espaço e que convergem para o óptimo.

A robustez do método mede o rácio entre o número de óptimos globais encontrados face ao número total de execuções do algoritmo, para diversas execuções distintas.

### 3.6 Optimização com Enxames de partículas Evolucionários (EPSO)

Em 2002 foi desenvolvido uma versão Evolucionária do algoritmo de Enxame de Partículas o qual pretende combinar o melhor de estratégias evolucionárias com o melhor dos enxames de partículas [24].

#### 3.6.1 Recombinação no EPSO

O Algoritmo PSO pode ser considerado Evolucionário, se se considerar que a cada iteração se dá uma mutação e destruição dos progenitores. A regra de mutação em ( 3.8) ou ( 3.9) pode simplificar-se para a forma ( 3.11), e a equação da próxima posição também pode ser resolvida em ordem à velocidade ( 3.12):

$$V_i^{k+1} = A * V_i^k + B * (X_{iB} - X_i^k) + C * (X_{sB} - X_i^k), \quad (3.11)$$

$$X_i^k = X_i^k - X_i^{k-1}, \quad (3.12)$$

ou seja, a velocidade (ou deslocação) da partícula depende unicamente da posição actual ( $X_i^k$ ), da posição anterior ( $X_i^{k-1}$ ), de uma posição bastante anterior da própria partícula ( $X_{iB}$ ), e de uma posição anterior de todas as partículas ( $X_{sB}$ ). Desta forma é possível identificar aqui uma Estratégia de Evolução, em que a recombinação vai depender de quatro progenitores, existindo uma regra condicionante na escolha de estes progenitores. Considerando-se não só as partículas activas mas também algumas anteriores, existe a necessidade de memória, criando uma população mais extensa [24].

Após nova reestruturação de ( 3.12) chega-se então á regra de dita a reprodução das partículas (ou deslocação):

$$X_i^{k+1} = X_i^k + A * (X_i^k - X_i^{k-1}) + B * (b_i - X_i^k) + C * (b_G - X_i^k), \quad (3.13)$$

$$\text{onde: } X_i^{k+1} = (1 + A - B - C)X_i^k - A * X_i^{k-1} + B * b_i + C * b_G, \quad (3.14)$$

A, B e C são escalares,

$b_i$  é a memória da melhor posição de cada partícula,

$b_G$  é a memória da melhor posição de todas as partículas.

O facto de existir uma população alargada, através inclusão não só da ultima geração como também de um conjunto de boas posição dá garantias de que o processo vai sempre caminhar para soluções melhores ou iguais á actual, e ainda dá um melhoramento em termos de avanço mais rápido rumo ao óptimo [24].

#### 3.6.2 Mecanismos auto-adaptativos de recombinação

Para determinar os melhores parâmetros A, B e C a usar, o algoritmo EPSO utiliza uma auto-adaptação durante o processo iterativo. Esses parâmetros considerados estratégicos, estarão sujeitos a uma selecção e evolverão no sentido de uma melhor convergência. Para uma dada população, o um EPSO genérico executará:

- Replicação - cada partícula é copiada r vezes.

- Mutação – cada partícula vê os seus parâmetros estratégicos mutados.
- Reprodução – cada partícula mutada reproduz-se com regra de recombinação definida
- Avaliação – cada partícula descendente é avaliada
- Selecção – Através de torneio estocástico, ou outro processo de selecção, as melhores partículas são escolhidas, sobrevivendo e formando uma nova geração, composta dos descendentes seleccionados de cada partícula da geração anterior.

As mutações deverão ser aleatórias do tipo produto LogNormal ( $W_i^* = W_i [\log N(0,1)]^\tau$ ) ou adição de distribuição Gaussiana [ $W_i^* = W_i + \sigma N(0,1)$ ]. Os parâmetros  $\sigma$  e  $\tau$  devem ser fixo externamente [20].

A regra de recombinação do EPSO fica então da forma:

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1}, \quad (3.15)$$

Onde: 
$$V_i^{k+1} = W_{i1}^* * V_i^k + W_{i2}^* * (b_i - X_i^k) + W_{i3}^* * (b_G - X_i^k) * P, \quad (3.16)$$

$b_G$ , melhor posição atingida pela partícula  $i$

$b_G$ , melhor posição atingida por todas as partículas

$V_i^k$ , velocidade da partícula  $i$  na iteração  $k$

$W_{i1}$ , peso associado á inércia da partícula

$W_{i2}$ , peso associado á memória de cada partícula

$W_{i3}$ , peso associado á cooperação ou comunicação entre partículas

$P$ , factor de comunicação, representa a probabilidade de haver comunicação entre as diferentes partículas.

De notar que na regra de recombinação, ( 3.16), para além de existir mutação no parâmetros estratégicos ( $W_{i1}$ ,  $W_{i2}$ ,  $W_{i3}$ ) existe também uma mutação associada á melhor posição do enxame, de forma a componente cooperativa seja uma espécie de intervalo difuso em torno do melhor global com distribuição normal. A Figura 3.7 apresenta as diversas componentes na recombinação de uma partícula, deve-se notar o intervalo difuso em torno da melhor posição global, com distribuição de probabilidade Gaussiana, centrado na melhor posição global [24].

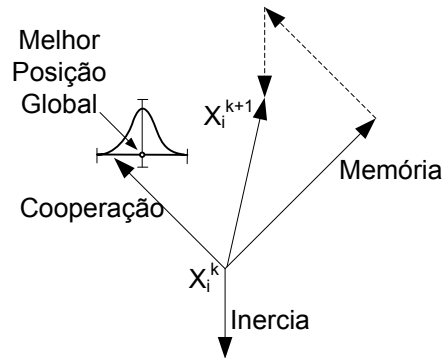


Figura 3.7-Exemplo do movimento de uma partícula no EPSO.

### 3.7 Coordenação de relés de protecção de MIH

A coordenação de relés de protecção de MIH é um problema em cujo objectivo é conseguir que o sistema de protecções esteja projectado para a máxima selectividade e segurança. Neste caso, cada relé tem o seu tempo de actuação (2.3.4) dependente de três factores:

- TMS - *Time multiplier setting*, é o multiplicador de tempo,
- $I_{PK}$  - *current tap setting*, é a corrente de disparo,
- $I_{CC}$  - corrente de curto-circuito, intensidade de corrente que ‘passa’ no relé.

De entre estes, os dois primeiros, TMS e  $I_{PK}$  deverão ser escolhidos de modo a que, em qualquer defeito Fase Terra franco, em qualquer linha, actue primeiramente o relé que protege essa mesma linha e em caso de defeito, só actuem as protecções de backup definidas para essa linha [10]. Actualmente estes parâmetros são calculados de forma empírica, sendo este cálculo moroso, repetitivo e por vezes inconclusivo.

Os primeiros sistemas CAD<sup>1</sup> foram desenvolvidos com a função de calcular os tempos de actuação de todos os relés, para uma dada falha. O Engenheiro responsável pelas protecções teria unicamente que fazer uma análise crítica sobre a qualidade da solução (se as violações eram relevantes ou não) e recorrendo á sua experiencia fornecer indicações de novos *settings* com algum sentido crítico, para que o software calcule os novos tempo de actuação.

A introdução dos algoritmos evolucionários vem introduzir a mais-valia de permitir que a máquina realize os cálculos e avalie as diferentes soluções até encontrar uma solução que respeite as exigências de selectividade e segurança pretendidas [10], devendo para tal o algoritmo ser robusto o suficiente para que este consiga encontrar o óptimo. A função que avalia a qualidade dos *settings* (TMS,  $I_{PK}$ ) deve ser definida de tal forma que permita ao algoritmo uma pesquisa mais direccionada.

<sup>1</sup> Computer-Aided-Design [10]

### 3.8 Sumário

Neste capítulo foram apresentados alguns métodos de optimização, tendo começado por mostrar qual a importância da optimização e quais métodos actualmente disponíveis.

Houve especial incidência sobre os algoritmos evolucionários, principalmente o algoritmo de optimização através de enxame de partículas e enxames de partículas evolucionários, sendo que estes são de grande importância na realização do trabalho proposto.

De frisar algumas vantagens inerentes ao algoritmo EPSO que vieram incentivar à sua escolha para a resolução do problema de coordenação. No EPSO existe uma selecção elitista, mas combinada com o princípio da cooperação do PSO, no qual não existe comparação entre partículas. Desta forma, no EPSO não existem partículas que morrem ou que sejam substituídas. Para cada partícula existe uma selecção elitista individual que leva à escolha por parte do algoritmo do descendente com melhores parâmetros estratégicos.

A não destruição ou substituição das partículas orienta-as a seguir em direcção a melhores zonas de pesquisa, mas sem dar saltos no espaço, efectuando assim uma pesquisa mais vasta no espaço. Foi ainda realizada uma breve introdução ao conceito de optimização/ pesquisa de parâmetros ideias para permitir a coordenação de relés MIH.



## Capítulo 4

# Aplicação do algoritmo EPSO em coordenação de relés

### 4.1 Introdução

Neste capítulo será apresentado o problema a resolver, coordenação de relés de MIH, assim como o algoritmo desenvolvido para a resolução desse mesmo problema. E será apresentada a rede utilizada para realizar coordenação dos relés de protecção de Máximo de Intensidade Homopolar.

O problema consiste na coordenação de relés de protecção (2.3.5) de máxima intensidade homopolar (2.5.2 e 2.7) em redes emalhadadas. Os relés seleccionados para a resolução deste problema foram escolhidos os relés de característica de tempo inverso com a corrente, direccionais (2.3.4). A utilização de programas de apoio á regulação das protecções é de extrema importância devido á quantidade de cálculos associados a cada relé para encontrar o tempo de actuação do relé primário e dos relés de *backup*. As primeiras aplicações limitavam-se a apresentar os tempos de actuação para cada caso, reduzindo a tarefa do Engenheiro responsável a escolher qual a configuração que apresentava menos problemas.

Recorrendo a algoritmos evolucionários, é possível testar uma elevada quantidade de parâmetros sem que estes demorem muito tempo. Devido á elevada capacidade computacional do equipamentos informáticos actuais, os problemas de coordenação são mais facilmente resolúveis. O algoritmo escolhido foi o EPSO (3.6) e foi implementado em Matlab, aproveitando as grandes capacidades de cálculo matricial deste software.

O programa criado efectua a coordenação dos relés de MIH para defeitos assimétricos do tipo Fase Terra (2.5.2).

Para auxílio á resolução do problema, foram utilizados alguns programas presentes na “Power System ToolBox”, os quais são direccionados para a análise de Sistemas Eléctricos de Energia.. Foram desenvolvidos por Hadi Saadat [12].

O algoritmo EPSO desenvolvido foi baseado nos artigos Vladimiro Miranda, Nuno Fonseca e Hrvoje Keko e Álvaro Jaramillo. [25] [24] [20]

## 4.2 Programa desenvolvido

O programa desenvolvido efectua os seguintes passos

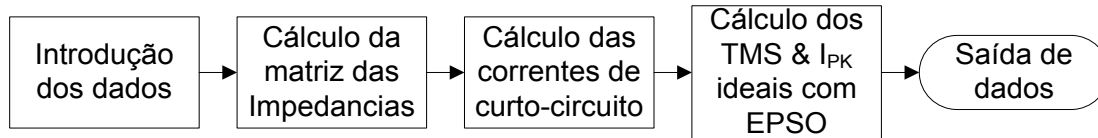


Figura 4.1-Esquema global dos módulos que compõem o programa.

São introduzidos os dados da rede e as características limites dos relés ( $I_{PKmin}$ ,  $I_{PKmax}$ ,  $TMS_{min}$ ,  $TMS_{max}$ ), depois o programa executa uma função para calcular as correntes de curto-circuito em todas as linhas da rede, para os defeitos fase terra para todos os relés a coordenar. Caso já exista uma matriz com as correntes de curto-circuito, o programa pode ser executado directamente a partir deste ponto, onde é chamada a função que implementa o EPSO.

O EPSO gera o enxame inicial, distribuindo as partículas de forma aleatória pelo espaço permitido. Cada partícula tem dimensão igual a 4 vezes o número de linhas da rede em estudo. Sendo que a primeira metade da partícula está associada aos TMS, e a segunda está associada aos  $I_{PK}$ . De notar que esta dimensão da partícula, em relação ao número de linhas existente na rede, deve-se ao facto de por cada linha existir 2 relés, e cada relé ter 2 parâmetros a ajustar.

### 4.2.1 Introdução dos dados no programa

Os dados a inserir no programa são as características referentes à rede a coordenar, e os limites de regulação dos relés,  $I_{pkmin}$ ,  $I_{pkmax}$ ,  $TMS_{min}$ ,  $TMS_{max}$ , devendo ser introduzidos todos os dados da rede em p.u. É necessário fornecer os valores das impedâncias directa, inversa e homopolar das linhas, geradores e cargas, caso não seja fornecida impedância inversa é assumido que seja igual à impedância directa.

As impedâncias das linhas devem ser inseridas numa matriz, com as indicações de qual o barramento de partida, qual barramento de destino, a resistência total e qual a reactância total da linha a inserir.

Os geradores são representados pela sua impedância transitória, sendo representados como uma linha entre o barramento a que está ligado e o barramento de referência, o zero.

A matriz deve ficar com seguinte aspecto:

$$\text{Rede\_exemplo: } \begin{matrix} & \begin{matrix} De & Para & R & X \end{matrix} \\ \begin{matrix} Gerador \\ Linha \\ Linha \\ Linha \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 2 & 0 & 0.20 \\ 1 & 2 & 0 & 0.25 \\ 1 & 3 & 0 & 0.30 \\ 2 & 3 & 0 & 0.20 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

No exemplo acima pode ver-se a introdução dos dados de um gerador ligado ao barramento dois com reactância transitória de 0,2 p.u. e resistência desprezável. E a linha que liga o barramento 2 ao barramento 3, com resistência 0 e reactância 0.20 p.u.

Com recurso à função *Zbuild* [12] o programa calcula a matriz das impedâncias nodais para permitir o futuro cálculo das correntes de curto-circuito.

Deve ser também fornecidos os limites de regulação das protecções, podendo ser fornecido de forma geral, limites iguais para todos os relés, ou caso aja diferenças nos diversos relés, deverá ser fornecida uma matriz com os valores mínimos e máximos da regulação dos relés. Esta matriz deverá estar ordenada pela ordem das linhas inseridas na matriz Rede1, dado que o número de relés é o dobro do número de linhas a ordem deve manter-se, invertendo o sentido das linhas.

Para a rede Rede\_exemplo apresentada acima, os limites seriam inseridos da seguinte forma:

$$\begin{array}{l}
 \text{limites:} \\
 \begin{array}{l}
 1 - 2 \\
 1 - 3 \\
 2 - 3 \\
 2 - 1 \\
 3 - 1 \\
 3 - 2
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 I_{PKmin} \quad I_{PKmax} \quad TMS_{min} \quad TMS_{max} \\
 \left[ \begin{array}{cccc}
 0.2 & 1.4 & 0.5 & 4 \\
 0.1 & 1.5 & 0.5 & 4 \\
 0.3 & 1.6 & 0.5 & 4 \\
 0.2 & 1.4 & 0.5 & 4 \\
 0.1 & 1.5 & 0.5 & 4 \\
 0.3 & 1.3 & 0.5 & 4
 \end{array} \right]
 \end{array}
 \end{array}$$

#### 4.2.2 Cálculo das corrente de curto-circuito máximas

Como já foi dito anteriormente, foi utilizada a livraria ‘Power System Toolbox’ fornecida em [12]. Foi criada uma versão hibrida do programa *LGFault*, o qual calcula a corrente de curto-circuito nas diversas linhas, para um defeito linha terra num dado barramento.

Para o calculo da corrente de curto circuito máxima, o defeito deve ocorrer imediatamente aos terminais do relé de protecção, para facilitar cálculos, aproxima-se a corrente de curto-circuito para um defeito aos terminais do relé, como sendo igual á corrente de curto-circuito para um defeito no barramento. Esta aproximação é perfeitamente aceitável pois a impedância que separa o barramento do relé é insignificante quando comparada com as restantes impedancias que participam no cálculo de curto-circuitos.

O cálculo da magnitude do curto circuito e correntes nos ramos é efectuado com recurso á matriz das impedâncias nodais, sendo neste caso ,para defeito fase-terra franco, igual a:

$$I_{cc} = \frac{3V_0^-}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3Z_d'} \quad (2.22)$$

Sendo a magnitude da componente homopolar 1/3 de  $I_{cc}$ , como foi definido anteriormente em 2.5.2. As tensões nos diversos barramentos são calculadas recorrendo também á matriz das impedâncias [12]:

$$V_i^0 = 0 - Z_{ik}^0 * I_k^0, \quad (4.1)$$

$$V_i^1 = V_i^1(0) - Z_{ik}^1 * I_k^1, \quad (4.2)$$

$$V_i^2 = 0 - Z_{ik}^2 * I_k^2, \quad (4.3)$$

Após conhecidas as tensões nos barramentos, a corrente que circula na linha que liga o barramento 'i' ao barramento 'j' é calculada pela lei ohm, é o quociente da diferença de potencial entre os dois pontos, pela impedância da linha que os liga:

$$I_{ij}^0 = \frac{V_i^0(F) - V_j^0(F)}{Z_{ij}^0}, \quad (4.4)$$

$$I_{ij}^1 = \frac{V_i^1(F) - V_j^1(F)}{Z_{ij}^1}, \quad (4.5)$$

$$I_{ij}^2 = \frac{V_i^2(F) - V_j^2(F)}{Z_{ij}^2}, \quad (4.6)$$

Devido à natureza do problema, só é necessário registar todas as correntes homopolares para defeitos em todas linhas. Isto é, para cada relé, devem ser calculadas a corrente máxima (no local de defeito), e as correntes nos relés de *backup* (nas linhas que ligam directamente á linha de defeito). No entanto, por questões de simplicidade são registadas as correntes em todas as linhas para todos os defeitos.

No Matlab existe grande versatilidade em criar matrizes de n dimensões, tendo optado neste caso por utilizar uma matriz de 3 dimensões, que se resume a uma sobreposição de tabelas com a identificação da linha e a corrente de curto-circuito. A dimensão da matriz é (número de linhas, três, 2\*número de linhas), na Figura 4.2 representa a organização da matriz. Desta forma é possível o acesso directo às correntes de curto-circuito para avaliar o tempo de actuação dos relés, evitando o cálculo da corrente de curto-circuito durante a execução do EPSO.

De	Para	I <sub>CC</sub>
1	2	I <sub>CC1-2</sub>
1	...	...
...	...	...
i	j	I <sub>CCi-j</sub>

Figura 4.2-Matriz utilizada para armazenar as correntes de curto-circuito.

### 4.2.3 Função de execução do algoritmo EPSO

O algoritmo EPSO recebe como dados de entrada, a função objectivo, uma matriz com os limites máximos e mínimos dos parâmetros (TMS, I<sub>PK</sub>) dos diferentes relés, uma matriz tridimensional com as correntes de curto-circuito nos diversos ramos, e uma matriz com o índice das linhas. Esta última tem o objectivo de garantir a existência de um índice para identificação dos diferentes relés na partícula e também para cruzamento com a matriz das correntes de curto-circuito.

Inicialmente é criado o enxame de partículas, sendo as partículas distribuídas de forma aleatória dentro do 'espaço' permitido. Cada partícula terá na primeira metade os valores de TMS e na segunda os valores de  $I_{PK}$  (Figura 4.3).

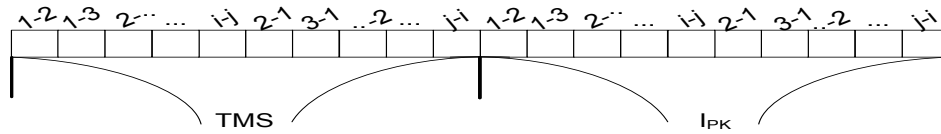


Figura 4.3-Composição de uma partícula utilizada no EPSO.

A Figura 4.4 apresenta um diagrama de blocos representando de forma genérica todos os passos realizados pelo EPSO desde a introdução dos dados até ao final do processo iterativo e saída de resultados. Após a criação dos enxames é realizada uma primeira avaliação das partículas, para permitir que posteriormente sejam movidas correctamente. São então replicadas, sendo esta réplica uma simples cópia do enxame inicial. Após a criação do enxame replicado, inicia-se o ciclo que terá 2 critérios de paragem: atingir o número máximo de gerações ou ser encontrada uma partícula cujos valores dos *settings* não conduzam a nenhuma violação dos relés na rede.

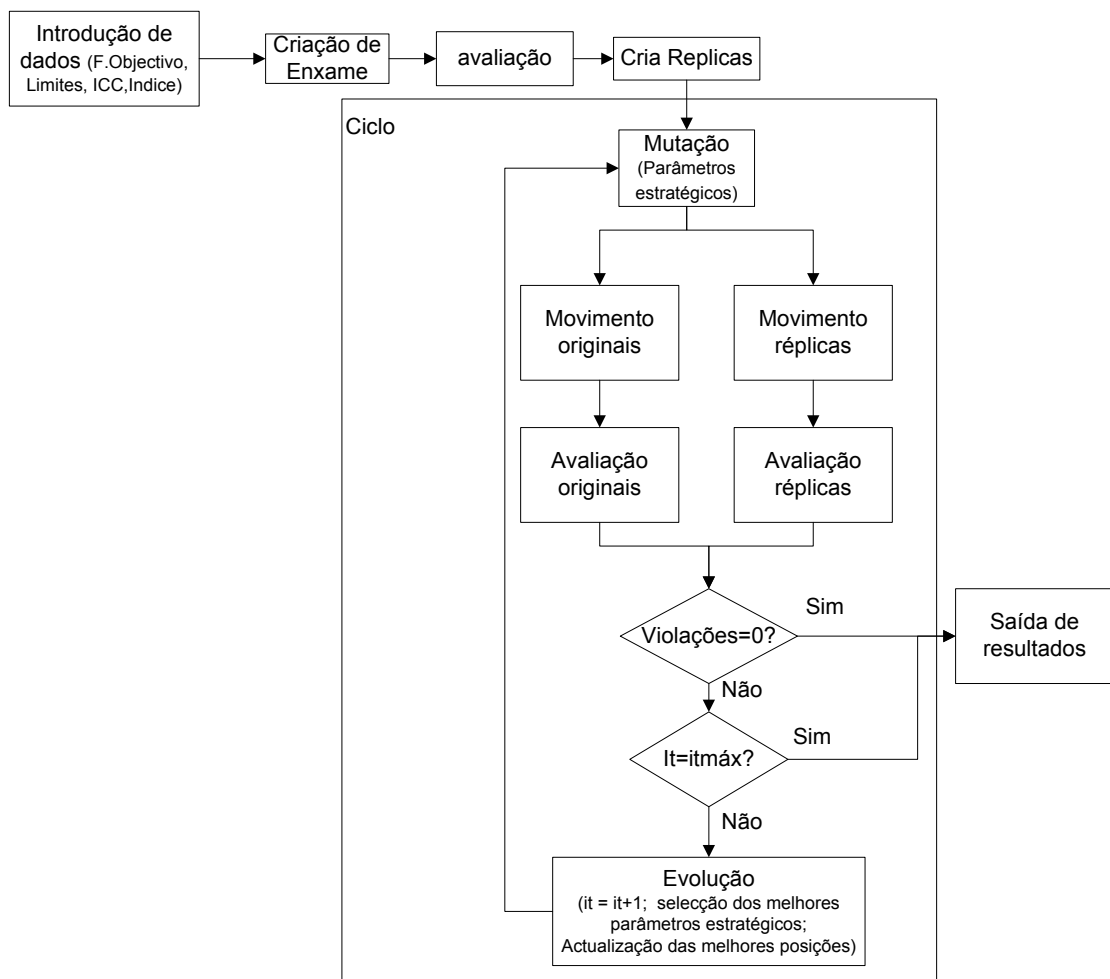


Figura 4.4-Diagrama de bloco da metodologia adoptada para a resolução do problema.

Na Figura 4.4 deve dedicar-se especial atenção à parte do diagrama referente ao ciclo que será responsável pelo sucesso da optimização realizando os seguintes passos:

- *Mutação*: É criada uma cópia mutada dos parâmetros estratégicos para que as diferentes partículas possam deslocar-se com diferentes pesos (inércia, memória e cooperação) podendo desta forma o enxame auto-adaptar-se de geração para geração. No início são melhores os parâmetros mais elevados, conduzindo a ‘passos’ mais longos, e grandes variação no *fitness* das partículas. Com o avançar do processo, é necessário fazer uma pesquisa mais minuciosa, pelo que as partículas que avançarem mais lentamente e obtiverem melhores resultados ser-lhes-ão escolhidos os parâmetros estratégicos que serão aplicados nas diferentes partículas.
- *Movimento*: São movidas as partículas originais com os parâmetros estratégicos originais, as réplicas são movidas com os parâmetros mutados. Este movimento é feito pela regra do PSO, considerando ainda o efeito do ruído Gaussiano em torno óptimo global.
- *Avaliação*: São avaliadas todas as partículas recorrendo a uma função que calcula o número de violações de cada relé e aplica uma penalização em função do número de violações e em função do tempo que falta em cada caso de violação para que fique coordenado.
- *Critério de paragem*: Caso se atinja um número máximo de iterações ou alguma partícula não tenha nenhuma violação dos tempos, isto é, os  $I_{PK}$  e TMS são tais que conduzem a que nenhum relé de *backup* actue antes do primário.
- *Evolução*: Nesta etapa, são actualizados os valores das melhores posições atingidas por cada partícula; é actualizada a melhor posição do enxame; e são seleccionados os parâmetros estratégicos das partículas com melhor *fitness* de entre o conjunto partícula mais réplica. Convém focar que este é um método elitista para os parâmetros estratégicos, e para as partículas não há selecção, só há movimento, isto conduz a que o enxame se mantenha disperso por mais tempo e consiga uma pesquisa mais vasta.
- *Saída de resultados*: os resultados de saída do EPSO são da formada de vector, neste caso a partícula com melhor *fitness*. É necessário descodificar os valores dos  $I_{PK}$ , isto é, extrair do vector os TMS e os  $I_{PK}$ , como se pode ver na Figura 4.3, é só necessário dividi a matriz em duas sub-matrizes.

#### 4.2.4 Função objectivo

Esta função é a função que calcula o valor de *fitness* de cada partícula, de forma permitir que o EPSO consiga encontrar o valor óptimo, neste caso, a finalidade é minimizar a função

objectivo. As partículas são avaliadas em função do número de relés que desrespeitam o critério da segurança, isto é, os relés de *backup* que actuam antes dos relés primários.

Para cada partícula, são testados todos os *settings* e é calculado o número de relés que violam o critério de coordenação. O método utilizado é, para cada relé de uma dada partícula a avaliar, calcular as correntes de curto-circuito Fase-Terra imediatamente após o relé, para essa linha e para as linhas adjacentes ao relé. Para tornar o algoritmo mais rápido as correntes de curto-circuito são calculadas no início do programa e armazenadas numa matriz, ver 4.2.2,

$$Fitness = c_1 \times NVP + c_2 \times TP^2 + c_3 \times NVB + c_4 \times TB, \quad (4.7)$$

onde:  $c_1, c_2, c_3, c_4$  são constantes, tais que:  $c_1 \gg c_2 > c_3 > c_4$

NVP é o número de violações dos relés primários (quando  $I_{PK} > I_{CC}$ );

TP são os 'tempos negativos' de actuação dos relés primários (quando  $I_{PK} > I_{CC}$ );

NVB é o número de violações dos relés de *backup*;

TVB é tempo de violação dos relés de *backup*.

A Função a minimizar é proporcional ao valor absoluto do tempo do relé primário, caso o tempo de actuação seja negativo, isto é,  $I_{pk}$  nesse caso é superior á corrente de curto-circuito que o percorre. Depois é adicionado um valor proporcional aos tempos dos relés de *backup* que violam o critério de coordenação. E por último é adicionado um valor proporcional ao número de relés que violam o critério de coordenação.

### 4.3 Caso de estudo

Foi utilizada uma rede de teste para verificar a funcionalidade do programa desenvolvido. A rede de teste é constituída por 11 barramentos, 14 linhas e 3 geradores, assume-se que a rede se encontra em vazio e que as tensões se encontram a 1 p.u. em toda a rede. Na Figura 4.5 pode observar-se o esquema directo e indirecto da rede em análise.

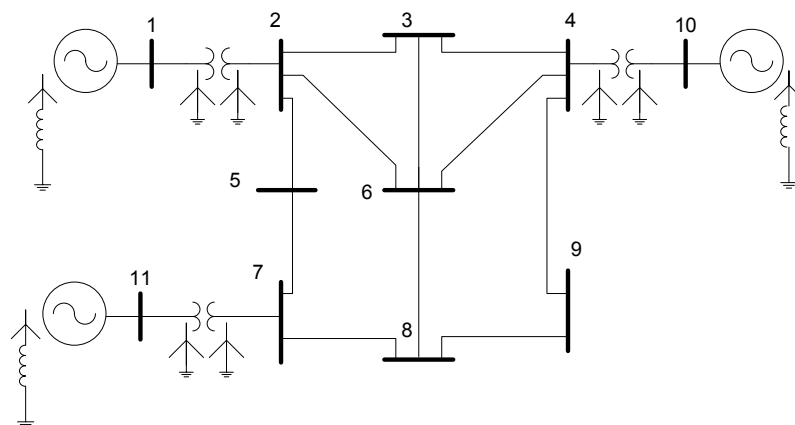


Figura 4.5-Esquema da rede de teste.

As características das linhas e transformadores na rede vêm apresentadas na Tabela 4.1, e as dos geradores na Tabela 4.2. Notar que a impedância inversa é assumida como sendo igual

à directa. Já a impedância homopolar é diferente, tal como o esquema de ligações, ver Figura 4.6

Tabela 4.1- Características das linhas e transformadores da rede de teste.

Dados das Linhas e Transformadores							
De	Para	$X^1$	$X^0$	De	Para	$X^1$	$X^0$
1	2	0.06	0.06	4	9	0.70	1.10
2	3	0.30	0.60	4	10	0.08	0.08
2	5	0.15	0.30	5	7	0.43	0.80
2	6	0.45	0.90	6	8	0.48	0.95
3	4	0.40	0.80	7	8	0.35	0.70
3	6	0.40	0.80	7	11	0.10	0.10
4	6	0.60	1.00	8	9	0.48	0.90

Tabela 4.2- Características dos geradores ligados á rede

Dados dos Geradores			
Nº barr.	$X^1$	$X^0$	$X^n$
1	0.20	0.06	0.05
10	0.15	0.06	0.05
11	0.25	0.08	0.05

Na Figura 4.6 pode ver-se o esquema da componente homopolar da impedância da rede de teste. De notar que os valores das impedâncias homopolares no esquema são elevadas devido á ligação dos geradores em estrela, com neutro impedante à terra. Desta forma as correntes homopolares estarão mais limitadas, protegendo os transformadores e as linhas.

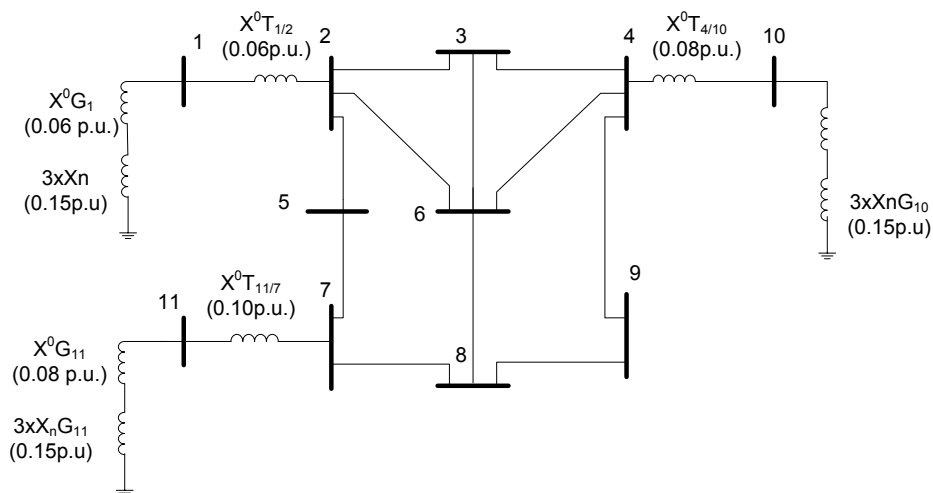


Figura 4.6- Esquema eléctrico homopolar da rede de teste.

#### 4.3.1 Introdução dos dados no programa

Matrizes da componente directa e homopolar da rede, a inserir no programa, para o posterior cálculo da corrente de curto-circuito:

$$Zdata1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0.20 \\ 0 & 10 & 0 & 0.15 \\ 0 & 11 & 0 & 0.25 \\ 1 & 2 & 0 & 0.06 \\ 2 & 3 & 0 & 0.30 \\ 2 & 5 & 0 & 0.15 \\ 2 & 6 & 0 & 0.45 \\ 3 & 4 & 0 & 0.40 \\ 3 & 6 & 0 & 0.40 \\ 4 & 6 & 0 & 0.60 \\ 4 & 9 & 0 & 0.70 \\ 4 & 10 & 0 & 0.08 \\ 5 & 7 & 0 & 0.43 \\ 6 & 8 & 0 & 0.48 \\ 7 & 8 & 0 & 0.35 \\ 7 & 11 & 0 & 0.10 \\ 8 & 9 & 0 & 0.48 \end{bmatrix}, \quad Zdata0 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0.06 + 3 * 0.05 \\ 0 & 10 & 0 & 0.06 + 3 * 0.05 \\ 0 & 11 & 0 & 0.08 + 3 * 0.05 \\ 1 & 2 & 0 & 0.08 \\ 2 & 3 & 0 & 0.60 \\ 2 & 5 & 0 & 0.30 \\ 2 & 6 & 0 & 0.90 \\ 3 & 4 & 0 & 0.80 \\ 3 & 6 & 0 & 0.80 \\ 4 & 6 & 0 & 1.00 \\ 4 & 9 & 0 & 1.10 \\ 4 & 10 & 0 & 0.08 \\ 5 & 7 & 0 & 0.80 \\ 6 & 8 & 0 & 0.95 \\ 7 & 8 & 0 & 0.70 \\ 7 & 11 & 0 & 0.10 \\ 8 & 9 & 0 & 0.90 \end{bmatrix}, \quad (4.8)$$

Os valores de regulação de TMS, e  $I_{PK}$  foram estabelecidos iguais para todos os relés, os intervalos entre [0.05 e 1] para TMS e [0.1e 2] para os  $I_{PK}$ . O programa calcula as correntes de curto-circuito e estas são guardadas numa matriz semelhante á presente na Figura 4.2.

### 4.3.2 Resultados obtidos

O Algoritmo EPSO convergiu ao fim de 349 iterações. Tendo sido utilizadas 25 partículas. Uma taxa de mutação de 0.09 e taxa de ruído de 0.08. Sendo ainda 0.5 a percentagem máxima de mutação dos parâmetros estratégicos e 10 % de afecção pelo ruído. Tendo atingido um valor de zero na Função Objectivo, isto é, foi possível encontrar *settings* dos relés que conduzem a uma coordenação correcta entre os diversos relés. Na Tabela 4.3 é possível consultar os resultados da optimização.

Tabela 4.3-Resultados obtidos com o EPSO

Relé	TMS	$I_{PK}$	Relé	TMS	$I_{PK}$
1	2	0,83174	2	1	0,05
2	3	0,3255	3	2	0,8911
2	5	0,5383	5	2	0,1975
2	6	0,075694	6	2	0,6783
3	4	0,18615	4	3	1
3	6	0,97671	6	3	0,5523
4	6	1	6	4	0,2565
4	9	0,51916	9	4	0,7077
4	10	0,89171	10	4	0,9198
5	7	0,99027	7	5	0,8671
6	8	0,74405	8	6	0,7959
7	8	0,57803	8	7	0,05
7	11	0,58055	11	7	0,8755
8	9	0,33577	9	8	0,6

O valor da função objectivo foi diminuindo, seguindo a curva típica da evolução dos EPSO, isto é, no inicio houve uma diminuição bastante elevada da função objectivo. Depois começa a existir uma estabilização, onde as partículas se deslocam mais devagar e já são

precisas diversas iterações para pequenas melhorias na função objectivo. É típico existirem patamares no gráfico do *Fitness*, sempre que aparece um degrau, indica que parte do enxame encontrou uma zona melhor a Figura 4.7 apresenta a evolução do fitness para o caso estudado.

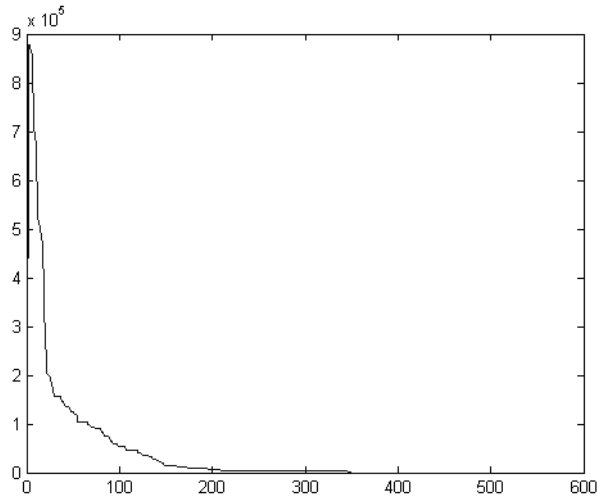


Figura 4.7-Evolução do valor da função objectivo com número de iterações.

#### 4.4 Sumário

Neste capítulo foi revisto o problema da coordenação de relés de Máxima Intensidade Homopolar, em particular em redes emalhadas, e foi apresentada a metodologia seguida para a implementação do EPSO em coordenação de relés de protecção de MIH de característica de tempo inversa com a intensidade.

Foi apresentada a rede de testes e os resultados obtidos para essa mesma rede.

## Capítulo 5

# Conclusões e perspectivas de desenvolvimentos futuros

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões, que têm como base o programa desenvolvido sobre a problemática da coordenação de relés de Máxima Intensidade Homopolar, recorrendo ao algoritmo EPSO para encontrar os melhores parâmetros para cada relé de forma a minimizar o número casos em que o relé *backup* actua antes do primário.

No final de cada capítulo são apresentados alguns aspectos que não foram referidos ao longo do trabalho que podem ser de especial interesse para o desenvolvimento de um trabalho mais intenso sobre o tema estudado.

### 5.1 Principais conclusões

Para a realização do programa foi dedicada especial atenção a que se conseguisse atingir o objectivo. O programa realizado forneceu resultados positivos, apresentando uma boa robustez para número máximo de iterações igual a 1000. Em 405 execuções consecutivas para a rede de teste, convergiu em 316 vezes, tendo nos restantes casos apresentado valores baixos da função objectivo, isto é, caso tivesse utilizado um limite de iterações superior certamente teria convergido em mais casos. Em 60% dos casos convergiu em menos de 500 iterações, o que indica que o algoritmo apresenta rápida convergência. Convém frisar que este tipo de algoritmo necessita de elevado número de iterações para que haja melhores garantias de convergência.

O EPSO apresenta-se como sendo um poderosíssimo algoritmo de pesquisa estocástica. A robustez do método depende dos parâmetros estratégicos, do número de partículas do enxame e do número máximo de iterações. Mas a função de avaliação apresenta sempre importância crucial para a convergência do método. No caso em questão, a inclusão da diferença entre o tempo dos relés *backup* e o do relé primário, como factor de penalização, caso o tempo de *backup* não seja 0,3segundos superior ao relé principal esse tempo participa proporcionalmente

na função de avaliação, para além da participação do número de relés que não actuam coordenados.

## 5.2 Perspectivas futuras

O programa desenvolvido cumpre com os requisitos propostos, no entanto poderia ser bastante mais optimizado. Devendo ser criada uma interface para o utilizador para uma mais fácil introdução de dados e execução do algoritmo.

O programa só é aplicável em redes onde haja ligações de neutro á terra, seja nos transformadores ou nos geradores, convém lembrar que em regimes de neutro isolado a componente das correntes de curto-circuito homopolar é praticamente nula. Os regimes de neutro apresentam forte influência na actuação do algoritmo na medida em que este é só aplicável quando existem componentes homopolares não nulas. Pelo que deveria criar-se neste programa a capacidade de coordenação de relés de protecção de máximo de intensidade homopolar e também de máxima intensidade de sequência inversa para existir coordenação combinada entre as duas protecções.

O programa deverá ser testado numa rede de distribuição MT real, para permitir uma validação experimental de resultados. E também contribuir para regulação das protecções de máxima intensidade homopolar onde os métodos utilizados não estiverem a encontrar resultados satisfatórios.

# ANEXOS

**ANEXO A-** Código ANSI dos relés mais frequentes.

Código numérico ANSI/IEEE	Função de protecção
2	Temporizador (auxiliar)
21	Distância
24	sobreexcitação ou V/Hz
25	Sincronismo ( <i>synchrocheck</i> )
27	Mínimo de Tensão
30	Sinalizador (auxiliar)
32	Inversão de Potência
37	Mínimo de Corrente (motores)
38	<i>Bearing</i>
40	Perda de campo de excitação (geradores)
46	Máximo de Corrente de Sequência Inversa
47	Sequência errada de fases da Tensão
48	Falta de fase na Tensão
49	Térmica ou contra sobrecargas
50	Máximo de Corrente instantânea
50BF	Falha de disjuntor ( <i>Breacker Failure</i> )
51	Máximo de Corrente temporizada
51G ou 51N	Máximo de Corrente homopolar, temporizada
51V	Máx. de Corrente temp. com bloqueio por 27
59	Máximo de Tensão
63	Pressostato
64G	Corrente à terra no rotor (geradores)
67	Máximo de Corrente Direccional
67N	Máximo de Corrente Direccional homopolar
68	Relé bloqueante (auxiliar)
69	Relé permissivo (auxiliar)
71	Relé detector de gás
74	Relé de Alarme (auxiliar)
76	Máximo de Corrente contínua
78	Dessincronização (geradores)
79	Religação Automática (linhas aéreas)
81	Frequência (mínimo ou máximo)
85	Interface para tele-protecção
86	Bloqueio (usada para encravar ligações)
87	Diferencial
87B	Diferencial de Barramentos ( <i>bus</i> )
87L	Diferencial de Linhas
87N	Diferencial restrita a defeitos à terra
94	Relé de disparo (auxiliar, de amplificação)

Este anexo apresenta a designação internacional dos relés mais presentes na rede, esta designação internacional é importante para facilitar a compreensão dos sistemas de protecção e para facilitar uma globalização dos sistemas.

## Referências Bibliográficas

- [1] Paiva, José Pedro Sucena., *Redes de Energia Eléctrica, uma análise sistémica*. 2005. ISBN:972-8469-34-9.
- [2] Ferreira, José Rui., "1º Texto de Apoio á disciplina de Sistemas de Protecção, 5ºano LEEC." 2005/2006. [http://paginas.fe.up.pt/~jrf/\[28/05/08\]](http://paginas.fe.up.pt/~jrf/[28/05/08]).
- [3] Pinto de Sa, Jose Luis., "Apontamentos de Regimes de Neutro, disciplina:Tecnologias de Transporte e Distribuição de Energia." [ed.] Institui Superior Técnico. <https://fenix.ist.utl.pt/disciplinas/ttde/2007-2008/2-semester> [20/05/08].
- [4] Blackburn, J. Lewis., *Protective Relaying*. s.l. : Marcel Dekker,inc., 1987. ISBN:0-8287-7445-0.
- [5] Blackburn, J. Lewis e Domin, Thomas J., *Protective Relaying,Principles and Applications*. ISBN:978-1-57444-716-3.
- [6] Chen, Wai Kai e David, Irwin J., *The Electrical Engineering Handbook*. s.l. : Academic Press, 2005. ISBN: 9780121709600.
- [7] Gurevich, Vladimir., *Electric Relays,Principles and Applications*. s.l. : CRC Press. 978-0-8493-4188-5.
- [8] The Electricity Training Association., *Power System Protection, Volumes 3:application*. s.l. : The Institution of Electrical Engineers, 1995. ISBN:0-85296-837-x.
- [9] Solidal., *Guia Técnico,9ª Edição*. outubro de 2005.
- [10] University of washington., *Specification of Computer-Aided Design of Transmission Protection Systems*. Seattle : s.n., January 1984.
- [11] Blackburn, J.Lewis., *Symmetrical Componnts for Power Systems Engineering*. 1993. ISBN:0-8247-8767-6.
- [12] Saadat, Hadi., *Power System Analysis*. 1999. ISBN:0-07-116758.
- [13] Matos, Anibal Castilho Coimbra de., *Apontamentos de Análise Numérica*. setembro, 2005.
- [14] Miranda, Vladimiro., *Algumas notas sobre Programação Não-Linear*. 2007.
- [15] Ponce de Leão, M. Teresa; Matos, Manuel A.;., "Multicriteria distribution network planning using simulated annealing." *International Transactions in Operational Research*. 1999, Vol. 6.

[16] Hopgood, Adrian A., *Intelligent Systems for Engineers and Scientists*. 2001. ISBN:0-8493-0456-3.

[17] Holland, J. H., "Adaptation in Natural and Artificial Systems." s.l. : University of Michigan Press, 1975.

[18] Goldberg, D. E., "Genetic Algorithms In Search, Optimization And Machine Learning."

[19] Zebulum, Ricardo Salem, Pacheco, Marco Aurélio C. e Vellasco, Marley Maria B.R., *Evolutionary Electronics: Automatic Design of Electronic Circuits and Systems by Genetic Algorithms*. ISBN:0849308658.

[20] Miranda, Vladimiro., *Computação Evolucionária Fenotípica*. Março, 2005.

[21] Kennedy, James e Eberhardt, Russel., "Particle Swarm Optimization." Perth, Australia : Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Neural Networks, pp. 1942-1948, 1995.

[22] Beyer, H., "Toward a Theory of Evolution Strategies: Self-Adaptation." 1996.

[23] Clerc, Maurice., "The Swarm and the Queen: Towards a Deterministic and Adaptive Particle Swarm." 1999 : IEEE publisher.

[24] Miranda, Vladimiro, Keko, Hrvoje e Jaramillo, Álvaro., *EPSO: Evolutionary particle Swarms. advances in evolutionary computing for system design*. 2007.

[25] Miranda, Vladimiro e Fonseca, Nuno., "EPSO- The Best of two Worlds Meta-heuristic Applied to Power Pystem Problems." Honolulu(Hawaii) : s.n., 2002.

[26] Porto Editora., Infopédia. [Online] [Citação: 24 de Junho de 2008.] [http://www.infopedia.pt/\\$genotipo](http://www.infopedia.pt/$genotipo).

[27] Damborg, M J; Venkala, S S;., *Specification of Computer-Aided Design of Transmission Protection Systems*. Seattle, Washington : University of Washington, 1984.

[28] Xiaohui Hu, Ph.D., Particle Swarm Optimization. [Online] [Citação: 24 de 05 de 2008.] <http://www.swarmintelligence.org/>.