Carlos Frederico Meschini Almeida

**Metodologia para a Monitoração Eficiente de Variações de
Tensão de Curta Duração em Sistemas Elétricos de Potência**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia.

São Paulo
2007

Carlos Frederico Meschini Almeida

**Metodologia para a Monitoração Eficiente de Variações de
Tensão de Curta Duração em Sistemas Elétricos de Potência**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia.

Área de Concentração:
Sistemas de Potência

Orientador:
Prof. Dr. Nelson Kagan

São Paulo
2007

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com anuência de seu orientador.

São Paulo, 14 de março de 2007.

Assinatura do autor:

Assinatura do orientador:

FICHA CATALOGRÁFICA – EDIÇÃO REVISADA

ALMEIDA, Carlos Frederico Meschini

Metodologia para a Monitoração Eficiente de Variações de Tensão de Curta Duração em Sistemas Elétricos de Potência.

99p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1. Sistemas de Potência 2. Qualidade de Energia 3. Alocação de Medidores 4. Algoritmos Genéticos. 5. Teoria dos Conjuntos Fuzzy I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu pai, engenheiro Carlos Alberto Almeida, em quem sempre me espelhei, devido à inteligência e caráter, que motivaram o meu ingresso na Engenharia Elétrica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela saúde e força necessárias para a conclusão desta etapa.

Agradeço ao meu orientador, Professor Nelson Kagan pelo apoio e incentivo, fundamentais para a realização deste trabalho, e pela oportunidade de ingresso no campo da pesquisa.

Agradeço aos colegas do ENERQ que muito contribuíram para a realização deste trabalho, através das inúmeras discussões.

Ao ENERQ pela oportunidade de participar do desenvolvimento das ferramentas computacionais que permitiram o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos meus pais e minha irmã pelo constante suporte e incentivo.

Agradeço à Camila, minha namorada, pelo apoio e paciência.

RESUMO

Esta dissertação apresenta uma metodologia baseada em Algoritmos Genéticos e Teoria dos Conjuntos Fuzzy que determina o número ótimo de medidores de Qualidade de Energia, bem como os pontos onde os mesmos devem ser instalados para monitorar Afundamentos e Elevações de Tensão em redes de transmissão de energia elétrica.

A metodologia desenvolvida representa uma ferramenta para diversas áreas de uma empresa de energia elétrica, porque ela indica a melhor maneira para se alocar medidores de Qualidade de Energia, considerando as restrições econômicas a que as empresas estão sujeitas. Além disto, a metodologia também determina a melhor configuração para um sistema de medição para um sistema de potência, quando há barras que devem ser monitoradas e/ou o número de medidores disponíveis é menor que o mínimo necessário para atingir a completa **Observabilidade**.

O trabalho desenvolvido também representa uma importante aplicação dos Algoritmos Genéticos em conjunto com a Teoria dos Conjuntos Fuzzy. Ele define aspectos a serem considerados no problema de monitoração de Qualidade de Energia Elétrica e sugere rapidamente a melhor forma de atender diferentes objetivos e restrições operacionais.

A fim de validar o modelo proposto, nesta dissertação, três redes elétricas são avaliadas para determinar o número mínimo de medidores de

Qualidade de Energia, bem como a localização onde esses equipamentos deveriam ser instalados. Os níveis de **Redundância** e de **Observabilidade** são apresentados, bem como as formulações usadas para atingir os resultados apresentados.

ABSTRACT

This dissertation presents a methodology based on Genetic Algorithms and Fuzzy Mathematical Programming to determine the optimum number of power quality monitors and the locations they should be installed to measure Voltage Sags and Swells in transmission power networks.

The methodology developed represents a tool for planning power networks, because it indicates the best way to allocate the power quality monitors, considering economical constraints. Similar to this, the methodology also determines the best configuration for a monitoring system when there are important busses to monitor and the number of monitors available is lower than the minimal needed to accomplish completely **Observability**.

The work presented here also represents an important Genetic Algorithms application. With fuzzy mathematical programming it easily allows the definition of aspects to be considered in the monitoring problem and quickly suggests the best way to attend different objectives and operational restrictions.

In order to validate the developed model proposed in this dissertation three electric power networks are assessed to determine the minimum number of power quality monitors as well as the locations where

these devices should be installed. The levels of **Redundancy** and **Observability** are presented as well as the formulations used to achieve the results.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Considerações Gerais.....	1
1.2 Contribuição acadêmica.....	7
1.3 Organização do Trabalho	15
1.4 Publicações.....	17
CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
CAPÍTULO 3 DEFINIÇÕES E MODELAGEM.....	32
3.1 Definições	33
3.1.1 Vetor-Alocação.....	33
3.1.2 Matriz de Observabilidade	37
3.1.3 Vetor-Redundância	42
3.2 Algoritmos Genéticos	43
3.2.1 Avaliação	46
3.2.2 Operador Seleção	48
3.2.3 Operador Cruzamento	52
3.2.4 Operador Mutação	54
3.3 Tomada de Decisão Fuzzy.....	55
3.4 Modelagem (Aplicação do AG ao Problema)	56
3.4.1 Avaliação Utilizando Algoritmo Genético Clássico	58
3.4.2 Avaliação Utilizando Teoria dos Conjuntos Fuzzy	61
3.4.3 Função – Penalização.....	63
CAPÍTULO 4 SIMULAÇÕES E RESULTADOS	67
4.1 Considerações Gerais.....	67
4.1.1 Curto-circuito.....	68
4.1.2 Ocorrências de VTCDs	69
4.2 Rede com 7 barras.....	71
4.3 Rede com 60 barras.....	74

4.4 Rede com 154 barras.....	80
4.4.1 Vetor-Alocação Binário	85
4.4.2 Vetor-Alocação Inteiro.....	89
CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES E FUTUROS DESENVOLVIMENTOS	91
5.1 Conclusões	91
5.2 Futuros Desenvolvimentos.....	95
BIBLIOGRAFIA	97
ANEXO I - Diagrama de Impedâncias – Rede de 154 barras	100

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentadas as razões que motivaram a elaboração deste trabalho, bem como uma breve descrição das limitações de escopo ao qual ele se destina. Também é apresentada a forma pela qual o trabalho foi organizado, descrevendo a finalidade de cada capítulo. Ao final, foram listadas as publicações originadas com o desenvolvimento do trabalho.

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A presente dissertação ilustra uma série de definições que apoiam a elaboração de uma metodologia que oriente a determinação dos locais de instalação de medidores de QEE (Qualidade de Energia Elétrica) em um sistema elétrico de potência qualquer. Por se tratar de um tema relativamente novo, observou-se uma escassez de referências que o abordassem. Sendo assim, a fim de garantir a abordagem completa perante o tema em questão, o trabalho ateve-se, exclusivamente, na alocação de medidores para monitorar as VTCDs (Variações de Tensão de Curta Duração), que, atualmente, podem ser consideradas o fenômeno de maior gravidade dentro da QEE. Dentro desse contexto, a principal contribuição do trabalho foi o estabelecimento de conceitos pelos quais os sistemas de

potência pudessem ser avaliados, de modo a orientar o dimensionamento de sistemas de medição capazes de monitorar a ocorrência de VTCDs, e de permitir a caracterização das redes elétricas frente a este fenômeno.

As VTCDs são perturbações causadas, normalmente, devido ao acionamento de grandes blocos de carga (partida de motores, energização de transformadores, etc.), ou devido a curto-circuitos (com origem tanto nos sistemas consumidores, quanto nos sistemas supridores). Normalmente, as VTCDs mais severas são originadas por curto-circuitos francos ou de baixas impedâncias de defeito, os quais, em sistemas de transmissão e de subtransmissão, causam variações que podem ser percebidas a grandes distâncias do ponto da sua ocorrência. Logo, elas podem ser consideradas como uma das maiores causadoras de reclamações por parte dos clientes das concessionárias de energia elétrica, uma vez que podem provocar o mau funcionamento de equipamentos sensíveis às variações na tensão de alimentação, interrompendo processos industriais e gerando prejuízos consideráveis.

Elas também estão entre as perturbações mais difíceis de serem monitoradas, pois são ocasionadas por fatores aleatórios e imprevisíveis, ou seja, a dificuldade não está só em medir a magnitude e a duração que as caracterizam, mas em determinar a frequência de ocorrência e o instante de início das mesmas. Sendo assim, a literatura atual sugere que seja feita a instalação de instrumentos de medição dedicados em todos os pontos do

sistema de potência em que se deseja monitorar a ocorrência das VTCDs ([09], [10], [11] e [12]). O inconveniente desse método é a quantidade de equipamentos necessários, uma vez que medições locais em múltiplos pontos fazem com que a avaliação seja uma atividade bastante onerosa, devido à quantidade de equipamentos necessários para a detecção das perturbações, e ao tratamento do elevado volume de dados registrados, inviabilizando, por muitas vezes, o próprio sistema de monitoração.

Com a reestruturação do setor elétrico, a preocupação com penalizações advindas das infrações aos limites regulatórios, bem como o aumento da competitividade, acentuaram a necessidade de se implementar um sistema de monitoração permanente, pois a energia elétrica passou a ser encarada como um produto, que deveria ser visto não só sob a ótica da continuidade, mas, também, da conformidade. Ou seja, empresas capazes de fornecer energia com maior qualidade a um custo menor, têm mais condições, sobre as demais, de se destacar no mercado, principalmente entre os consumidores que necessitam de energia elétrica livre de perturbações.

Nesse contexto, uma metodologia que determine o número mínimo de medidores de Qualidade de Energia necessários para monitorar uma rede elétrica, bem como os pontos onde os mesmos devam ser instalados, torna-se uma alternativa atraente para as concessionárias de

energia dimensionar os sistemas de medição necessários para monitorar as suas redes.

A *alocação ótima* de medidores de QEE determina as posições em que os mesmos devem ser instalados, de modo que a área de monitoração sobre um sistema de potência qualquer seja maximizada. Ou seja, dado um medidor, este deve ser instalado em um ponto do sistema de potência em avaliação de modo que ele seja capaz de “observar” o maior número possível de ocorrências que provocam variações de tensão no sistema possa vir a ser submetido. A essa capacidade de um medidor instalado em uma dada barra de um sistema de potência “observar” as ocorrências de variações de tensão que possam vir a ocorrer, definimos o conceito de **Observabilidade**¹ a ser empregado nesta dissertação.

Já a determinação do *número mínimo* de medidores de QEE busca estabelecer o número de medidores necessários para se monitorar todo um sistema de potência com a menor **Redundância** possível. Isto é, considerando o caso limite, cada barra do sistema tem que ser monitorada

¹**Observabilidade:** nesta dissertação, o termo em questão é usado sob o ponto de vista dos equipamentos de medição instalados em uma determinada barra do sistema de potência em avaliação. Ele é utilizado com o intuito de quantificar o alcance da monitoração de um medidor instalado em um determinado ponto do sistema dentro das possíveis ocorrências de VTCDs a que o mesmo pode vir a ser submetido.

por pelo menos um medidor, na ocorrência de uma VTCD qualquer; e cada uma das VTCDs, a que o sistema pode vir a ser submetido, tem que ser “observada” por pelo menos um dos medidores a serem instalados.

A essa característica de um dado sistema elétrico de potência, de ter as variações de tensão de curta duração a que ele possa vir a ser submetido, “observadas” por pelo menos um dos medidores a serem instalados no mesmo, definimos o conceito de **Grau de Observabilidade**² a ser empregado nesta dissertação.

Sendo assim, observa-se que a determinação do *número mínimo* de medidores e a *alocação ótima* dos mesmos estão intrinsecamente ligadas, pois o *número mínimo* de medidores é atingido através da *alocação ótima* dos mesmos, isto é, a instalação dos medidores em pontos estratégicos dos sistemas de potência. Logo, nota-se que a maximização do **Grau de Observabilidade** de um determinado sistema de potência é inerente à maximização da **Observabilidade** por parte de cada equipamento

²**Grau de Observabilidade:** nesta dissertação, o termo em questão é usado sob o ponto de vista do sistema de potência em avaliação. Ele é utilizado para quantificar a qualidade de um sistema de medição diante da monitoração das ocorrências de VTCDs a que o sistema de potência em questão possa vir a ser submetido. Portanto, este termo considera a cobertura que um determinado sistema de medição é capaz de realizar diante das possíveis ocorrências de VTCDs, bem como a redundância na monitoração de cada VTCD em particular.

de medição, pois, a fim de reduzir o número de medidores, maximiza-se o alcance da monitoração de cada um dos equipamentos de medição, o que, por sua vez, é atingido através da instalação dos mesmos nos pontos mais suscetíveis às VTDCs que o sistema em avaliação pode vir a ser submetido.

A utilização de AGs (Algoritmos Genéticos) para a formulação desse problema de otimização constitui uma alternativa interessante, pois, inicialmente, a codificação binária em que o AG se baseia representa adequadamente a questão de decisão da instalação dos equipamentos em determinados pontos do sistema de potência em avaliação.

Além disso, a utilização da Teoria de Conjuntos Fuzzy fornece flexibilidade suficiente para atender diferentes objetivos (maximização da **Observabilidade**, minimização do número de equipamentos, minimização do custo de instalação), bem como diferentes restrições (pontos de instalação permitidos, cargas com monitoração obrigatória), a que o problema em questão pode ser submetido, no caso da avaliação de redes elétricas reais.

A metodologia desenvolvida neste trabalho engloba a simulações de ocorrência de VTCDs, devido aos diversos tipos possíveis de curtos-circuitos em diferentes pontos das redes elétricas (tanto nas barras, quanto ao longo das linhas que as compõem), de forma que se permita caracterizar o comportamento do sistema elétrico frente a esse fenômeno. Essa caracterização dos sistemas elétricos frente à ocorrência de VTCDs

considera as características topológicas das redes elétricas, viabilizando a verificação da influência de cada defeito no próprio sistema em avaliação. Assim, possibilita-se a determinação dos pontos em que se deve instalar um medidor para que a área do sistema “observada” pelo mesmo seja a maior possível.

Outros tipos de VTCDs, isto é, causadas por eventos que não curto-circuitos na rede elétrica, não são consideradas no escopo deste trabalho.

1.2 CONTRIBUIÇÃO ACADÊMICA

A importância da Alocação de Medidores advém da necessidade das concessionárias de energia em determinar as frequências de Variações de Tensão de Curta Duração a que as suas redes estão sujeitas, bem como a severidade na ocorrência das mesmas. A relevância disso é devida à necessidade de disponibilizar informações que permitam avaliar o desempenho das suas redes elétricas, que, por sua vez, são fundamentais para o estabelecimento da compatibilidade entre os níveis de sensibilidade dos diversos tipos de equipamentos presentes nos consumidores e o nível de desempenho (confiabilidade) dos suprimentos. A Figura 1.1 ilustra a relação entre esses níveis de forma genérica, uma vez que a variável Nível de Perturbação no eixo horizontal pode corresponder a qualquer tipo de perturbação a que um SEP pode ser submetido.

Figura 1.1 – Relação entre os Níveis de Perturbação e Imunidade para um Ponto de um SEP

Sendo assim, os níveis de imunidade às perturbações e de emissão de perturbações podem ser entendidos como os parâmetros utilizados para avaliar se um determinado SEP está executando a sua finalidade precípua, isto é, fornecer energia elétrica, de forma a permitir o funcionamento de todas as cargas consumidoras.

Então, fica claro que a determinação do limite de tolerância de uma determinada carga a uma determinada perturbação (*Nível de Imunidade*) se faz tão essencial quanto à determinação do *Nível de Perturbação* do local onde ela será instalada, de modo que o funcionamento correto da mesma possa ser garantido, e que a mesma não introduza

perturbações que impeçam o funcionamento das demais cargas conectadas no mesmo SEP. Enquanto os primeiros devem ser determinados através de testes laboratoriais pelos seus fabricantes, os SEPs também têm que ter as perturbações pelas quais eles são normalmente submetidos quantificadas por meio de medições, de forma a orientar futuros empreendimentos quanto às restrições de cada um de seus pontos, ou até mesmo às próprias concessionárias de energia, com relação às adequações que suas redes devem sofrer. É nesse último ponto que a Alocação Ótima de Medidores insere a sua contribuição, pois é ela que auxilia na determinação de um sistema de monitoração que permite caracterizar todo um SEP sem a necessidade de se instalar um medidor em cada barra do mesmo.

Assim, a Figura 1.1 apresentada anteriormente tenta ilustrar justamente como deve se dar a relação entre as restrições das cargas que podem vir a serem conectadas em um determinado SEP (Nível de Imunidade da Carga) e as condições que o mesmo está sujeito pelas cargas existentes (Nível de Perturbação do Local), para que carga e SEP operem harmoniosamente (isto é, para que haja compatibilidade entre ambos).

Ela ilustra duas distribuições, as quais se referem às perturbações capazes de prejudicar a operação normal de uma determinada carga (Nível de Imunidade da Carga) e às perturbações características de um determinado ponto de um SEP (Nível de Perturbação no Local).

Além disso, três eixos são exibidos, ilustrando limites orientativos para garantir a compatibilidade entre os sistemas em questão (carga e SEP). O *Nível Avaliado* corresponderia ao limite superior de todas as perturbações capazes de ocorrer. Assim, ele corresponderia a uma das perturbações mais severas capazes de ocorrer, mas que, por sua vez, teria uma baixa probabilidade de ocorrência. Este nível orientaria as concessionárias de energia com relação às ações que deveriam ser realizadas sobre as suas redes, de modo que o fornecimento de energia elétrica fosse realizado de forma satisfatória, obedecendo valores máximos de perturbação.

O *Nível de Compatibilidade* corresponderia ao limite inferior das perturbações capazes de prejudicar a operação normal de uma determinada carga. Assim, ele corresponderia a uma das perturbações de menor intensidade capazes de prejudicar o funcionamento de uma carga, mas, também, com baixa probabilidade de ocorrência. Este nível, por sua vez orientaria os fabricantes de equipamentos com relação aos limites máximos de perturbações que os mesmos poderiam injetar nos sistemas onde fossem instalados, sem, com isso, vir a interferir no funcionamento do próprio sistema e nos demais equipamentos ligados no mesmo.

O *Nível de Planejamento*, por sua vez indicaria um ponto intermediário que estabeleceria um limite através do qual os outros dois eixos não deveriam ultrapassar, evitando que as distribuições se sobrepusessem significativamente, de modo que o funcionamento das

cargas e do SEP pudesse vir a ser prejudicado, garantindo, assim, a compatibilidade entre ambos. Este nível serviria de orientação para o projeto de instalações elétricas, sendo que as mesmas deveriam ser dimensionadas considerando este nível como o de operação normal para os equipamentos a serem instalados.

Esse aspecto ganha cada vez mais atenção por parte da engenharia dos sistemas de potência, devido a crescente aplicação da eletrônica de potência, bem como a utilização de equipamentos eletrônicos. Pois, ao mesmo tempo em que esses equipamentos deformam as correntes nas fases que alimentam as instalações consumidoras, devido ao funcionamento dos seus componentes semi-condutores, eles têm o seu funcionamento extremamente dependente da tensão de alimentação (tornando-os demasiadamente sensíveis, com relação tanto ao nível da tensão de alimentação, quanto com a forma da mesma).

Isso faz com que diversos níveis de sensibilidade, oriundos de diferentes equipamentos (muitos dos quais essenciais para alguns processos de produção), possam vir a estar presentes em uma mesma instalação consumidora, tornando o funcionamento de toda uma produção extremamente dependente do desempenho do suprimento de energia.

Porém, existem algumas dificuldades que tornaram a preocupação em fornecer os índices de desempenho das redes elétricas ainda maior. Inicialmente, havia dificuldade inerente à aleatoriedade da

perturbação, que tornava necessária monitoração do sistema por longos períodos de tempo, para a determinação de estatísticas válidas e confiáveis, conforme pode ser averiguado em [09] e [11]. Para contornar essa dificuldade, nesses mesmos trabalhos, foram apresentadas metodologias baseadas na Avaliação Estocástica de VTCDs, que consistiam na simulação de defeitos, levando em consideração probabilidades relacionadas com o tipo de defeito, com a localização de defeito, e com a impedância de defeito, permitindo, assim, determinar a probabilidades de ocorrência para um determinado defeito. Viabilizava-se, dessa forma, a caracterização de todo um sistema de potência frente às VTCDs, sem a necessidade de longos períodos de monitoração. Essa metodologia atendia a algumas atividades do planejamento, eliminando a dificuldade atrelada com o tempo de monitoração necessário; mas a mesma não eliminava a necessidade de se considerar muitos dados de medição para obter dados estatísticos confiáveis e para, até mesmo, validar a própria metodologia.

A dificuldade com relação à consideração das medições era maior, pois além dos grandes períodos de tempo, seria necessário um número de equipamentos que encareceria demasiadamente o sistema de monitoração, uma vez que devido à aleatoriedade da perturbação considerada, a literatura sugeria a instalação de equipamentos em todas as barras do sistema que se pretendia avaliar. Assim, a metodologia apresentada neste trabalho procura contornar justamente essa dificuldade, e por isso, representa uma ferramenta importante para o gerenciamento do

desempenho de redes, já que ela propõe uma configuração fundamentada para o sistema de monitoração sem a necessidade de adquirir um número elevado de equipamentos; e viabiliza meios para avaliar a qualidade da monitoração frente às possíveis faltas que um sistema de potência pode sofrer, considerando os pontos de alocação dos equipamentos e a topologia do sistema em avaliação.

Basicamente, a Alocação de Medidores de Qualidade de Energia determina as posições que são mais sensibilizadas pelas possíveis faltas em um sistema de potência qualquer. Essas posições são determinadas por uma análise indireta da topologia do sistema em avaliação, uma vez que ela é feita através de um conjunto simulações de faltas, que procura representar o desempenho do sistema frente aos possíveis defeitos que podem ocorrer. Assim, de acordo com a metodologia em exposição, todo um sistema pode ser monitorado por um número reduzido de equipamentos, diminuindo assim a proporção dos investimentos necessários em um sistema de monitoração.

Logo, lançando mão da Avaliação Estocástica para caracterizar criteriosamente o comportamento de um sistema de potência qualquer com relação à ocorrência de VTCDs, poder-se-ia definir graus do alcance da monitoração de um sistema de monitoração sobre um sistema de potência (***Graus de Observabilidade***).

Para possibilitar o atendimento dos diferentes objetivos envolvidos no processo de Alocação Ótima de Medidores (maximização da

Observabilidade, minimização do número de equipamentos, minimização do custo de instalação, etc.) optou-se pela utilização dos AGs, devido o fato dos mesmos serem de implementação suficiente flexível para o atendimento de diferentes restrições (pontos de instalação permitidos, cargas com monitoração obrigatória), a que esse problema pode ser submetido no caso da avaliação de redes elétricas reais. A utilização de métodos de busca heurística tornou-se inviável para a avaliação de redes reais, como no caso do sistema utilizado para o desenvolvimento desse trabalho devido o elevadíssimo número de possibilidades envolvido.

No desenvolvimento do trabalho, o foco ateve-se na determinação do número mínimo de medidores necessários para monitorar toda uma rede elétrica, pois assim verificar-se-ia a validade da aplicação da metodologia. Avaliações voltadas para alocar um determinado número de medidores, inferior ao mínimo necessário para a completa monitoração de uma rede (devido restrições orçamentárias, ou por perda de equipamentos), podem ser feitas utilizando a mesma metodologia, acrescida de critérios que priorizem a alocação dos equipamentos em determinados pontos (priorizar instalação em clientes, secundários de transformadores, etc.), de acordo com critérios bem definidos (custo de instalação, reclamações de clientes, pontos com maior prioridade de monitoração, etc.). Isso pode ser implementado facilmente com a modelagem abordada, uma vez que a aplicação da Teoria dos Conjuntos Fuzzy viabiliza a agregação de diferentes objetivos.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho desenvolvido nesta dissertação está organizado em cinco capítulos. Os escopos de cada um dos capítulos são apresentados a seguir:

- Capítulo 1 – Introdução:

Esse capítulo procura ressaltar a relevância do tema tratado no trabalho em questão, identificando seu ponto de contribuição, considerando o contexto atual do setor elétrico brasileiro.

- Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica:

Nesse capítulo foi feita a descrição de uma série de trabalhos que auxiliaram o desenvolvimento da presente dissertação. Juntamente com a descrição dos mesmos, foi destacada a forma que cada um contribuiu a fim de justificar a relevância dos mesmos para esta dissertação, já que o número de publicações que abordam diretamente o tema tratado é pouco expressivo.

- Capítulo 3 – Definições e Modelagem:

Nesse capítulo são apresentadas detalhadamente as definições realizadas para a elaboração do trabalho em questão. Apresentam-se, também, os conceitos da ferramenta utilizada para resolver o

problema abordado pela dissertação (Algoritmos Genéticos e Teoria dos Conjuntos Fuzzy). O capítulo é concluído com a formulação do problema de Alocação Ótima de Medidores através das ferramentas adotadas.

- Capítulo 4 – Simulações e Resultados:

O capítulo em questão apresenta a descrição das simulações realizadas e os resultados das mesmas para três redes, de diferentes portes. As simulações que foram realizadas sobre as duas primeiras redes ilustram a funcionalidade da metodologia elaborada, enquanto que, para a terceira rede, as simulações foram realizadas de forma a ilustrar potencialidade da aplicação em casos que melhor refletem a realidade dos Sistemas Elétricos de Potência (SEPs).

- Capítulo 5 - Conclusões e Futuros Desenvolvimentos:

Esse capítulo apresenta a conclusão do trabalho, identificando as potencialidades da aplicação do mesmo, tanto para o órgão regulador do setor elétrico, como para as empresas responsáveis pela distribuição de energia elétrica. Também são destacadas as possibilidades de continuidade natural do trabalho.

1.4 PUBLICAÇÕES

Abaixo são listadas as publicações que foram geradas a partir do trabalho desenvolvido para a elaboração desta dissertação:

- Almeida, Carlos F. M.; Kagan, Nelson; Camilo, Luciano. *Metodologia para a Alocação Ótima de Medidores de Qualidade de Energia em Redes Transmissão e Subtransmissão para a Monitoração de VTCDs devido a Curto-Circuitos*. VI Seminário Brasileiro sobre Qualidade de Energia Elétrica. Belém, 21 a 24 de agosto de 2005.
- Almeida, Carlos F. M.; Kagan, Nelson; Camilo, Luciano. *Aplicação de Algoritmos Genéticos na Alocação de Medidores de Qualidade de Energia*. VII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente. São Luís, setembro de 2005.
- Almeida, Carlos F. M.; Kagan, Nelson; Camilo, Luciano. *Metodologia para a Alocação Ótima de Medidores de Qualidade de Energia em Redes Transmissão e Subtransmissão para a Monitoração de VTCDs devido a Curto-Circuitos*. X Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica. Florianópolis, 21 a 25 de maio de 2006.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo é composto por análise dos principais trabalhos encontrados que podem ser relacionados com o desenvolvimento realizado nesta dissertação. Para alguns casos, foi feita uma analogia entre o problema abordado em cada um dos trabalhos analisados e o abordado por esta dissertação, a fim de justificar a relevância de cada um perante o desenvolvimento realizado.

A fim de permitir a compreensão entre os objetivos dos trabalhos revisados com o desta dissertação, faz-se necessário expor a motivação deste trabalho. Basicamente, nesta dissertação procurou-se definir uma metodologia eficiente, a partir da análise de técnicas já existentes, capaz de determinar o número mínimo necessário de medidores a serem instalados em um sistema de potência qualquer, de forma a garantir a completa monitoração do mesmo (todas as tensões em barras e correntes elétricas em ligações da rede devem ser monitoradas) quanto aos fenômenos de QEE.

A literatura atual sugere que, para caracterizar um sistema de potência frente às Variações Tensão de Curta Duração, deve-se proceder a instalação de um medidor de Qualidade de Energia em cada barra do mesmo ([09], [10], [11] e [12]). O inconveniente dessa técnica é o número de

equipamentos necessários. Porém, no novo contexto do setor elétrico, a necessidade de monitoração adquire cada vez mais força, devido aos possíveis conflitos entre consumidores e concessionárias, ocasionados pelas multas oriundas das transgressões sobre os limites estabelecidos para os fenômenos da Qualidade de Energia. O interesse pela monitoração também é contribuído pelo aumento da competitividade no setor elétrico, uma vez que a eletricidade passou a ser encarada como um produto comercial, que deve ser avaliado não apenas pela sua continuidade, mas também pela sua conformidade. Ou seja, as concessionárias, fornecendo energia com melhor qualidade e menor custo, têm mais chance de atrair uma parte considerável do mercado, especialmente àquela composta pelos consumidores cujos processos produtivos necessitam de energia livre de perturbações. Nesse contexto, uma metodologia que determine o número mínimo de medidores de Qualidade de Energia para monitorar um sistema elétrico de potência torna-se uma alternativa atraente para as concessionárias avaliarem as suas redes.

A minimização do número de medidores está intrinsecamente relacionada com a *Alocação Ótima* dos Medidores, ou seja, a determinação dos pontos em que os medidores devem ser instalados para que a área de alcance de cada um seja maximizada, garantindo a monitoração completa do sistema de potência em análise.

Sendo assim, desde já é estabelecido que o problema abordado na dissertação em questão lide com dois objetivos complementares, que seriam:

- Determinação do número mínimo de medidores;
- Determinação da posição ótima dos medidores.

Uma referência sutil à importância da Alocação de Medidores de Qualidade de Energia em sistemas de potência é feita em [09] e em [11]. Nesses trabalhos, a preocupação fundamental dos autores foi viabilizar uma metodologia para a determinação das frequências de afundamentos de tensão de um sistema de potência qualquer, através de simulações estocásticas de curtos-circuitos. Com isso, a intenção seria de disponibilizar informações que caracterizassem as redes elétricas de potência. Essas informações são fundamentais para o estabelecimento da compatibilidade entre os níveis de sensibilidade dos diversos tipos de equipamentos possíveis de estarem presentes nos consumidores e o desempenho (confiabilidade) dos pontos de suprimentos de energia elétrica, sem a necessidade de promover gastos com longas e complexas campanhas de medição.

Em [09] e em [11], a partir da simulação de um defeito, foi averiguada a propagação do mesmo, nas demais barras do sistema, de forma a determinar a extensão do impacto da perturbação em questão. Simulando-se um número fixo de defeitos possíveis de ocorrer no sistema

em avaliação, ponderados pela taxa de falha dos locais onde eles ocorreriam, determina-se um valor médio para a tensão em cada uma das barras do sistema. Isso define regiões com comportamentos semelhantes (para um nível de disparo fixado, o número de afundamentos que ocorreram eram iguais) definidas por áreas que contornam as barras com mesma “taxa de sensibilidade”. Para simular a propagação dos defeitos foram comparados dois métodos:

- Método de posição de falta;
- Método de distância crítica.

Tendo apresentado as conveniências e inconveniências de cada método, bem como as ocasiões adequadas para as aplicações dos mesmos, o artigo em questão conclui que os afundamentos de tensão variam bastante ao longo dos sistemas de potência, de forma que os resultados médios de monitoração não poderiam ser aplicados diretamente em consumidores individuais. Isso porque a probabilidade de ocorrência de uma falta em uma determinada linha varia consideravelmente ao longo de todo um sistema de potência.

Além disso, a escolha dos pontos de monitoração também representou um fator a ser considerado, devido as diferenças de exposição aos curto-circuitos (a probabilidade de ocorrência de curto-circuito nas barras de um sistema – subestações – era consideravelmente menor que a probabilidade ao longo das linhas de transmissão, além dessa última

assumir valores diferentes ao longo das próprias linhas – quanto mais próximo do meio das linhas, maior seria essa probabilidade).

Os autores também destacam, com grau de importância elevado, a influência da posição dos geradores do sistema, pois a frequência de afundamentos diminui com a proximidade às grandes estações geradoras.

Em [08], os autores realizaram uma abordagem inovadora ao problema da **Determinação do Número Mínimo de Medidores de Qualidade de Energia** utilizando os conceitos de “Covering and Packing” (seção da Matemática que trata de um conjunto de problemas, cuja solução ótima depende da minimização - Covering - e/ou da maximização - Packing - de propriedades dos problemas). Esses conceitos se adequaram perfeitamente ao problema em questão, no qual, ao mesmo tempo em que se busca minimizar o número de medidores necessários para monitorar um determinado sistema de potência, maximizando-se a **Observabilidade** dos mesmos; deseja-se maximizar o **Grau de Observabilidade** do sistema, de maneira que todas variáveis de estado do mesmos fossem monitoradas (ou, pelo menos, a sua grande maioria).

Nesse artigo, a questão “Covering” refere-se especificamente à minimização do número de medidores, isto é, dada uma rede elétrica a ser monitorada, “Covering” aborda as formas pelas quais os medidores podem ser dispostos, de maneira que a **Observabilidade** de cada medidor seja maximizada. Outra maneira de explicar a questão “Covering” para o

problema em questão seria que ela busca determinar uma disposição de medidores em um sistema de potência qualquer, de forma que a soma das intersecções das áreas de alcance desses medidores seja a menor possível, sem que, para isso, deixe-se de monitorar qualquer elemento do sistema.

A questão “Packing” refere-se à maximização do **Grau de Observabilidade** do sistema. Segundo os autores, esses conceitos retratam o problema de forma a permitir a determinação de um vetor-existência de medidores, que determina a posição onde cada um dos mesmos deve ser instalado em uma rede elétrica qualquer. Esse trabalho engloba um equacionamento no qual, através de Programação Linear Inteira, a função-objetivo impõe que o número de medidores seja mínimo, e as restrições garantem a **Observabilidade** sobre todo o sistema de potência em análise. Isto é, ou garante-se a capacidade de monitorar as variáveis de estado (tensão para as barras e corrente para as linhas) nos pontos de instalação dos medidores; ou garante-se a capacidade de estimar analiticamente (através de equações que modelem o comportamento dos elementos elétricos que compõem o SEP) esses estados para cada um dos elementos que não são monitorados diretamente, mas que também compõem a rede elétrica de potência.

Porém, nesse trabalho os autores não destinam a aplicação da metodologia a um determinado tipo de fenômeno de Qualidade de Energia. Fica implícito, pela modelagem utilizada, que a preocupação maior se atém

aos fenômenos de regime permanente (Flutuação de Tensão, Desequilíbrio de Tensão, Distorção Harmônica de Tensão e Corrente), transmitindo a idéia de que a partir dela seja possível monitorar todo um sistema, para todos os fenômenos, independente da forma de propagação específica de cada um pelo SEP em avaliação.

Uma abordagem alternativa ao problema da **Determinação do Número Mínimo de Medidores de Qualidade de Energia** pode ser encontrada em [02]. Nesse trabalho, apesar do próprio título, o objetivo principal, foi determinar os pontos com comportamentos semelhantes perante os fenômenos de QEE, de forma a permitir a caracterização de todo o sistema por meio da monitoração de apenas alguns pontos do mesmo.

A motivação dos autores desse trabalho foi devida à sugestão encontrada na literatura existente, que sugere a instalação de medidores em todas as barras de um SEP. Isso, porém, conforme discutido no próprio artigo, faz com que o volume de dados a ser transmitido, processado e armazenado seja muito elevado, inviabilizando a própria monitoração, devido à quantidade e à sofisticação dos equipamentos necessários para realizar tal tarefa.

Com isso, no intuito de estabelecer uma garantia que permita a redução do volume de dados (e torne a monitoração viável), os autores desenvolveram uma metodologia, baseada em análises de correlação e de regressão de medições fictícias, que identifica pontos de uma rede elétrica

com comportamento semelhante frente aos fenômenos envolvidos pela Qualidade de Energia. Ou seja, dada uma rede elétrica qualquer, simula-se a injeção de perturbações características de um fenômeno de Qualidade de Energia em pontos determinados, e registra-se o efeito dos mesmos nas variáveis de estado da rede (no caso, o trabalho restringiu-se à injeção de 5ª harmônica, e ao registro da tensão). Com os valores registrados, efetuam-se as análises de correlação e de regressão, de maneira a agrupar os pontos com comportamentos semelhantes. Dessa forma, determina-se que um medidor deve ser instalado em qualquer um dos pontos de cada um dos agrupamentos formados.

Assim, de acordo com a proposta idealizada pelos autores, para a monitoração de um sistema de potência qualquer, seria necessária a instalação de apenas um medidor em um único representante de cada agrupamento de pontos com comportamentos semelhantes (“clusters”), uma vez que o comportamento desses, conforme garantido pelas análises de regressão e de correlação, seria capaz de representar o comportamento dos demais, frente aos distúrbios característicos dos fenômenos de Qualidade de Energia.

Contudo, conforme destacado anteriormente, a metodologia apresentada nesse trabalho preocupou-se com a minimização do número de medidores, e não com a determinação da posição ótima dos mesmos. Esses dois objetivos, de certa forma, podem ser confundidos, já que, para a

determinação da posição ótima dos medidores, determinam-se inicialmente os pontos em que os medidores devem ser instalados, de forma a maximizar a **Observabilidade** de cada um sobre as variáveis de estado do SEP em avaliação.

Logo, a **Determinação da Posição Ótima dos Medidores de Qualidade de Energia** é um fator que contribui para a minimização do número de medidores, pois ela está vinculada com a maximização da **Observabilidade** do sistema de potência em estudo. Porém a **Determinação do Número Mínimo de Medidores de Qualidade de Energia**, por si só, isto é, sem a necessidade de alocar os medidores de forma a garantir a monitoração de todas as variáveis de estado de um SEP, não garante a completa monitoração do mesmo. Isto se deve ao fato de que ela não engloba diretamente restrições e aspectos inerentes a um SEP, como o fato de existirem pontos eletricamente equivalentes (cuja monitoração de qualquer deles, permite estimar o comportamento em todos os demais), esses mesmos pontos apresentam diferenças consideráveis, devido a fatores ambientais, facilidade de acesso, infra-estrutura disponível, etc.

Dessa forma, apesar dessa metodologia representar uma alternativa econômica à monitoração de sistemas de potência, por reduzir consideravelmente o número de equipamentos necessários para monitoração, ela não se preocupa com a forma de propagação dos

distúrbios característicos a cada um dos fenômenos de Qualidade de Energia, nem com as características particulares a que cada ponto de um sistema pode estar submetido (como fatores ambientais), tão pouco com a garantia da monitoração das variáveis de estado das redes em avaliação, já que ela agrupa pontos com comportamentos elétricos semelhantes, mas que, por sua vez, podem ser eletricamente independentes uns dos outros.

Ela permite, apenas, estimar estatisticamente o comportamento de todo um sistema de potência através da monitoração de alguns pontos representativos do mesmo; tornando-se interessante e aplicável, então, para os sistemas com pouca informação ou que apresentam baixa diversidade de cargas, e em que as mesmas estão distribuídas de forma uniforme (pois, assim, garante-se que o número de “clusters” formados seja razoável).

O trabalho desenvolvido nesta dissertação foi fortemente baseado nas definições apresentadas em [01], [03], [07], [10] e [13]. Assim, nesse ponto do trabalho são feitos apenas alguns comentários sobre os objetivos principais de cada um dos mesmos, uma vez que maiores detalhes sobre as técnicas aplicadas nos mesmos podem ser encontrados nos capítulos seguintes, durante a descrição da modelagem realizada para resolver o problema da Alocação Ótima de Medidores de Qualidade de Energia.

Em [07] e em [10] os autores ilustraram as definições e premissas, nas quais o desenvolvimento da modelagem do problema foi fundamentado, como o **Vetor-Alocação**, a **Matriz de Observabilidade** e o

Vetor-Redundância. Neles nota-se a importância da **Matriz de Observabilidade**, pois os autores apontam que a mesma é a responsável pela caracterização do desempenho dos SEPs perante a metodologia desenvolvida.

Dessa forma, são ilustrados os equacionamentos para os cálculos de curto-circuitos, bem como a importância dos detalhes da modelagem para execução dos mesmos, como a ligação dos transformadores, etc.

Em [13], os autores descreveram um procedimento pelo qual essas definições apresentadas em [07] e em [10] foram empregadas para realizar a Estimção de VTCDs em Redes de Transmissão, baseada em Alocação Ótima de Medidores e Simulação Estocástica de Defeitos.

Diferentemente da Alocação Ótima de Medidores para a Monitoração de Redes de Transmissão, a Alocação Ótima de Medidores para a Estimção de VTCDs apresenta um número de restrições maiores. Isso, porque a Estimção de VTCDs não se limita a garantir que todas as barras do sistema estejam monitoradas. Por ela é necessário, também, garantir que a Alocação de Medidores sugerida detecte todos os defeitos passíveis de ocorrerem no SEP em avaliação, de forma que o erro de Estimção seja minimizado.

Como a Estimção utiliza medições para realizar a localização das faltas, isto é, a partir de informações de medições de uma determinada

falta, por uma Alocação sugerida, verifica-se o erro dessa localização de falta. Isso se deve ao fato de que, em redes transmissão, com topologia malhada, defeitos diferentes podem ocasionar valores de tensões residuais próximos em algumas barras, podendo vir a dificultar a localização da falta.

Assim, a metodologia baseia-se na distribuição dos erros possíveis de Estimação oriundos da má localização das faltas. As Alocações que gerarem bons resultados são consideradas soluções para o problema abordado.

O trabalho desenvolvido em [01] e em [03] serviu de base para orientar a nova abordagem dada por essa dissertação para a solução do problema da Alocação Ótima de Medidores de Qualidade de Energia Elétrica. Devido o tamanho das redes utilizadas, os valores obtidos pelas funções objetivo e de penalização eram distorcidos pelo valor das constantes utilizadas e pela própria forma da função de avaliação, que, assim, não favoreciam a convergência do AG. Essa dificuldade foi contornada através da utilização da Teoria de Conjuntos Fuzzy na determinação dos valores das funções objetivo e de penalização, inspirando-se nos trabalhos [01] e [03], de maneira que os valores dessas funções não interferissem na convergência do algoritmo e permitisse que o mesmo pudesse ser aplicado para redes com dimensões maiores.

Nesses trabalhos os autores empregam na modelagem da avaliação das soluções a Teoria dos Conjuntos Fuzzy, a fim de averiguar se

as configurações de rede de distribuição sugeridas pelo Algoritmo Genético desenvolvido atendem os requisitos estabelecidos. Basicamente, eles identificam condições em que a rede de distribuição não pode operar e definem funções que representam esse comportamento. Dessa forma, viabiliza-se o atendimento de diversos objetivos com relativa flexibilidade (no caso do trabalho, a avaliação ateu-se ao carregamento das linhas e a queda de tensão nas barras), ponderando-os de forma que ambos fossem atendidos satisfatoriamente, sem a interferência do processo do Algoritmo Genético.

O trabalho referenciado em [06] deu origem a uma configuração alternativa dos indivíduos utilizados no Algoritmo Genético desenvolvido nesta dissertação. Inicialmente, optou-se por uma configuração na qual o tamanho dos indivíduos (**Vetor-Alocação** de medidores de QEE) era determinado pelo número de barras do SEP em avaliação. Assim, como os indivíduos representam soluções alternativas para a Alocação Ótima de Medidores, a sugestão para a instalação de certo medidor em certa barra do SEP em avaliação era determinada através da existência do número **1** na posição respectiva do indivíduo, enquanto que o **0** indicava a não instalação de medidor.

Porém, com essa modelagem o Algoritmo Genético apresentou uma série de dificuldades para a sua convergência na aplicação em redes com número de barras significativo. Dessa forma, a fim de aprimorar o

desempenho do AG, um novo **Vetor-Alocação** foi definido. Ele teve sua dimensão fixada e a decisão pela instalação de um medidor em uma determinada barra foi feita através do preenchimento de cada uma das suas posições com o número de uma barra do SEP em avaliação. Isto é, apenas as barras com os números descritos nas coordenadas no **Vetor-Alocação** deveriam ser consideradas para a instalação de medidores de QEE.

Em [06] a preocupação dos autores está na determinação de pontos ótimos de um SEP para a instalação de bancos de capacitores. O trabalho ainda leva em consideração na sua formulação os tipos e tamanhos dos bancos de capacitores a serem instalados, propondo um método híbrido, baseado em Programação Linear e Algoritmos Genéticos (entre outras técnicas), para a determinação das barras onde se devem instalar os bancos de capacitores, bem como o tamanho e tipo de cada um, de modo que o problema abordado, apesar de ser para outra aplicação, se assemelha bastante com o abordado nesta dissertação.

CAPÍTULO 3

DEFINIÇÕES E MODELAGEM

Este capítulo apresenta detalhadamente as definições que foram necessárias para a elaboração de uma metodologia que atendesse o problema da Alocação Ótima de Medidores para a Monitoração de Redes Elétricas abordado nesta dissertação. Nele também são apresentados os conceitos básicos de Algoritmos Genéticos e da Teoria dos Conjuntos Fuzzy, utilizados como ferramentas para solução do problema, bem como a descrição da formulação utilizada.

Conforme já mencionado nos capítulos anteriores, a metodologia apresentada nesta dissertação preocupa-se em determinar as posições em que medidores de Qualidade de Energia Elétrica devem ser instalados, de forma a maximizar a capacidade de monitoração de VTCDs sobre um SEP. Sendo assim, foi necessário o estabelecimento de algumas definições que:

- Viabilizassem o equacionamento do problema dentro dos métodos de obtenção de solução utilizados;
- Permitissem ilustrar as soluções encontradas, bem como o resultado da avaliação das soluções.

3.1 DEFINIÇÕES

Com o problema da Alocação Ótima de Medidores de QEE tornou-se necessária a criação de uma abordagem específica frente à análise dos SEPs, uma vez que ele agrega a necessidade de avaliar várias alternativas de configurações de alocação de medidores simultaneamente. Essa abordagem ainda teve que ser sofisticada, de modo que permitisse sistematizar a busca pela melhor solução. Sendo assim, fez-se necessário o estabelecimento de uma série de definições, apresentadas a seguir, que, além de facilitar a difusão dos resultados ao leitor, evitassem a constante repetição de cálculos matriciais complexos, inerentes a análise dos SEPs.

3.1.1 Vetor-Alocação

Trata-se justamente da resposta ao problema da Alocação Ótima de Medidores de QEE. É ele que vai indicar o número de medidores necessários para monitorar um SEP, bem como em quais pontos (barras) do SEP devem ser instalados os equipamentos de medição.

A sua configuração é, então, justificada pelo fato do problema abordado nesta dissertação se tratar de um problema de decisão dupla, no qual a solução deve satisfazer duas variáveis simultaneamente:

- Uma referente à decisão sobre a instalação, ou não, de um medidor;

- E outra referente à decisão da posição (barra) do SEP em avaliação que um medidor deve ser instalado.

Sendo assim, nesta dissertação o Vetor-Alocação foi definido de duas formas distintas, de modo a averiguar qual alternativa mais eficiente para a modelagem da solução para o problema.

3.1.1.1 Vetor-Alocação Binário

Inicialmente, o **Vetor-Alocação** definido teve sua dimensão variando de acordo com o número de barras do SEP em avaliação. Isto é, cada posição do vetor representava um possível ponto de instalação do medidor (barra determinada).

Logo, a questão referente à determinação do número de medidores necessários ficou aberta, uma vez que todas as barras do sistema tinham a mesma possibilidade de ter um medidor instalado em cada solução.

A decisão pela instalação ou não de um medidor em uma determinada barra foi feita através do preenchimento de cada uma das coordenadas do vetor. Elas eram preenchidas por **0** (zero) ou **1** (um), indicando a não-instalação ou a instalação de um medidor, respectivamente.

A expressão [1], que segue, ilustra a definição do **Vetor-Alocação** (V_{Aloc}) Binário:

$$V_{Aloc}(i) = \begin{cases} 1, & \text{para a instalação de medidor na barra } i \\ 0, & \text{para a não-instalação de medidor na barra } i \end{cases} \quad [1]$$

A fim de ilustrar o **Vetor-Alocação Binário**, a Figura 3.1 exibe um exemplo para um sistema de 20 barras, no qual é sugerida a instalação de equipamentos nas barras de índices 5, 10, 15 e 19.

Barras do SEP →																			
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)
0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0

Figura 3.1 – Exemplo de Vetor-Alocação Binário

3.1.1.2 Vetor-Alocação Inteiro

Posteriormente, a fim de aprimorar o desempenho do AG, o **Vetor-Alocação** definido teve sua dimensão fixada, isto é, a questão referente à determinação do número de medidores necessários ficou restringida pelo tamanho do vetor.

Dessa forma, a decisão pela instalação de um medidor em uma determinada barra foi feita através do preenchimento de cada uma das coordenadas do vetor com o número de uma barra do SEP em avaliação. Isto é, apenas as barras com os números descritos nas coordenadas no **Vetor-Alocação** deveriam ser consideradas para a instalação de medidores de QEE.

Essa mudança fez com que a possibilidade de cada uma das barras terem medidor de QEE fosse diminuída consideravelmente; pois, na

determinação de cada coordenada do vetor, todas as barras do sistema concorreriam igualmente.

A expressão [2], que segue, ilustra a definição do **Vetor-Alocação** (V_{Aloc}) *Inteiro*:

$$V_{Aloc}(i) = n; \text{ para instalação do medidor } i \text{ na barra } n \text{ o,} \quad [2]$$

sendo que n pode variar de 0 ao número de barras do SEP em avaliação

A fim de ilustrar o **Vetor-Alocação Inteiro**, a Figura 3.2 exibe um exemplo no qual o número máximo de medidores permitido é de 5 equipamentos. Ele sugere a instalação de medidores nas barras 4, 10, 19 e 03.

Medidores a serem Alocados

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
04	10	19	10	03

Figura 3.2 – Exemplo de Vetor-Alocação Inteiro

Note que no vetor-exemplo da Figura 3.2 propositalmente há a repetição do número 10, como se os medidores 2 e 4 devessem ser instalados na mesma barra. Nesta dissertação esse fato implica que, para monitorar o suposto SEP, seriam necessários apenas 4 medidores (nas barras 03, 04, 10 e 19), e que os mesmos deveriam ser alocados nas barras indicadas. O valor máximo 5 excede o mínimo necessário para que o SEP tenha **Grau de Observabilidade** máximo dentro da **Redundância** mínima

de monitoração (pelo menos um medidores monitorando cada um dos defeitos passíveis de ocorrerem nesse SEP)³.

3.1.2 Matriz de Observabilidade

Para mapear o desempenho de um SEP qualquer frente às possíveis ocorrências de VTCDs no mesmo, foi definida uma matriz com os valores das tensões de falta em cada uma das barras, para cada defeito simulado. Essa matriz foi definida considerando que cada linha representaria a posição de defeito, isto é, uma barra ou um ponto no meio de uma linha do SEP em avaliação em que foi simulado um determinado tipo de curto-circuito; e que, em cada coluna, seriam armazenados os valores das tensões de falta de cada barra.

A fim de simplificar e tornar a avaliação mais objetiva, a partir dessa matriz definiu-se a **Matriz de Observabilidade**, que é obtida fixando-

³ Porém, para os casos em que a preocupação seria garantir a monitoração de determinados pontos de um SEP qualquer, esse fato pode ser interpretado diferentemente, isto é, para os casos em que a preocupação seria ter uma monitoração redundante de determinados pontos de um SEP (logo, redundância mínima diferente da unitária) ele indicaria que na barra 10 do SEP deveria ser instalados 2 medidores, de modo que para o ponto em questão as medições pudessem ser confrontadas e o SEP em avaliação continuasse tendo **Grau de Observabilidade** máximo dentro da **Redundância** de monitoração fixada.

se o valor da magnitude das tensões de falta, a partir do qual se deseja que os medidores sejam sensibilizados (**Nível de Disparo** - n_d - dos medidores).

Assim, para o caso de avaliação de Afundamentos de Tensão, fixando-se adequadamente o **Nível de Disparo** desejado (sendo que $n_d \in [0,1\text{pu}; 0,9\text{pu}]$, de acordo com a referência [05]), as posições da matriz são preenchidas com **0** (zero), caso o valor da tensão de falta seja superior ao **Nível de Disparo** fixado, e com **1** (um), caso contrário. Já para a avaliação de Elevações de Tensão, fixando-se adequadamente o **Nível de Disparo** desejado (sendo que $n_d \in [1,1\text{pu}; \infty)$, de acordo com a referência [05]), as posições da matriz são preenchidas com **0** (zero), caso o valor da tensão de falta seja inferior ao **Nível de Disparo** fixado, e com **1** (um), caso contrário.

A expressão [3] ilustra o procedimento descrito para montagem da **Matriz de Observabilidade** (MO), para o caso da avaliação de Afundamentos de Tensão.

$$mo_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{quando defeito } i \text{ faz com que tensão de falta na barra } j \text{ for} \\ & \text{igual ou abaixo do } \mathbf{Nível\ de\ Disparo} \text{ fixado } (0,1 < v_{ij} \leq n_d) \\ 0, & \text{quando defeito } i \text{ faz com que tensão de falta na barra } j \\ & \text{não fique abaixo do } \mathbf{Nível\ de\ Disparo} \text{ fixado } (v_{ij} > n_d) \end{cases} \quad [3]$$

Onde:

- v_{ij} : é o elemento da linha i , coluna j de uma matriz de tensões V .

Analogamente, a expressão [4], que segue, ilustra o procedimento descrito para montagem da **Matriz de Observabilidade (MO)**, para o caso da avaliação de Elevações de Tensão:

$$mo_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{quando defeito } i \text{ faz com que tensão de falta na barra } j \text{ for} \\ & \text{igual ou ficar acima do } \mathbf{Nível\ de\ Disparo} \text{ fixado } (v_{ij} \geq n_d) \\ 0, & \text{quando defeito } i \text{ faz com que tensão de falta na barra } j \\ & \text{não fique acima do } \mathbf{Nível\ de\ Disparo} \text{ fixado } (v_{ij} < n_d) \end{cases} \quad [4]$$

Onde:

- v_{ij} : é o elemento da linha i , coluna j de uma matriz de tensões V .

A fim de ilustrar a obtenção de uma **Matriz de Observabilidade** para um determinado SEP, suponha uma matriz de tensões de barras (V) para um SEP de 20 barras, conforme ilustrado pela Figura 3.3.

		Barras do SEP (j)																			
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)
Defeitos Simulados (i)	[1]	0.20	0.52	1.00	0.88	0.89	0.89	0.96	0.87	0.96	0.96	0.97	0.91	0.97	0.97	0.92	0.90	0.95	0.98	0.88	0.95
	[2]	0.39	0.27	1.00	0.81	0.86	0.83	0.95	0.80	0.95	0.95	0.96	0.86	0.96	0.96	0.90	0.87	0.93	0.97	0.82	0.93
	[3]	1.00	1.00	0.14	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00	1.00
	[4]	0.75	0.72	0.99	0.49	0.87	0.50	0.94	0.50	0.93	0.93	0.94	0.57	0.94	0.94	0.90	0.87	0.93	0.97	0.50	0.93
	[5]	0.94	0.95	1.00	0.97	0.31	0.97	0.98	0.97	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.92	0.84	0.97	0.98	0.97	0.96
	[6]	0.70	0.67	0.99	0.28	0.83	0.10	0.91	0.32	0.91	0.91	0.92	0.49	0.92	0.92	0.86	0.83	0.90	0.96	0.33	0.91
	[7]	0.97	0.97	1.00	0.98	0.96	0.97	0.51	0.98	0.67	0.74	0.79	0.98	0.79	0.78	0.97	0.97	0.98	0.99	0.98	0.98
	[8]	0.74	0.71	0.99	0.50	0.87	0.53	0.94	0.47	0.94	0.93	0.94	0.59	0.94	0.94	0.90	0.88	0.93	0.97	0.52	0.93
	[9]	0.99	0.99	1.00	0.99	0.99	0.99	0.87	0.99	0.16	0.79	0.85	0.99	0.84	0.82	0.99	0.99	0.99	1.00	0.99	0.99
	[10]	0.97	0.97	1.00	0.98	0.96	0.97	0.75	0.98	0.54	0.49	0.64	0.98	0.64	0.63	0.97	0.97	0.98	0.99	0.98	0.98
	[11]	0.97	0.97	1.00	0.98	0.97	0.97	0.75	0.98	0.52	0.53	0.08	0.98	0.12	0.15	0.97	0.97	0.98	0.99	0.98	0.98
	[12]	0.92	0.90	1.00	0.79	0.96	0.82	0.98	0.80	0.98	0.98	0.98	0.17	0.98	0.98	0.97	0.96	0.98	0.99	0.80	0.98
	[13]	0.98	0.98	1.00	0.98	0.97	0.98	0.82	0.98	0.64	0.67	0.43	0.99	0.40	0.41	0.98	0.97	0.98	0.99	0.98	0.99
	[14]	0.98	0.98	1.00	0.99	0.98	0.98	0.85	0.99	0.67	0.73	0.53	0.99	0.47	0.31	0.98	0.98	0.99	1.00	0.99	0.99
	[15]	0.95	0.95	1.00	0.97	0.89	0.96	0.98	0.97	0.98	0.98	0.98	0.97	0.98	0.98	0.43	0.90	0.96	0.97	0.97	0.93
	[16]	0.92	0.93	1.00	0.96	0.78	0.95	0.97	0.96	0.97	0.97	0.97	0.96	0.97	0.97	0.89	0.57	0.95	0.98	0.96	0.94
	[17]	0.98	0.98	1.00	0.98	0.97	0.98	0.99	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.97	0.97	0.28	0.99	0.98	0.97
	[18]	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	0.99	1.00	1.00	0.98	0.98	0.99	0.32	0.99	0.96
	[19]	0.81	0.79	1.00	0.55	0.91	0.60	0.95	0.57	0.95	0.95	0.96	0.66	0.96	0.96	0.93	0.91	0.95	0.98	0.33	0.95
	[20]	0.95	0.95	0.99	0.97	0.93	0.97	0.98	0.97	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.89	0.93	0.94	0.92	0.97	0.70
	[21]	0.97	0.97	1.00	0.98	0.95	0.98	0.99	0.98	0.99	0.99	0.99	0.98	0.99	0.99	0.94	0.96	0.96	0.95	0.98	0.36
	[22]	0.85	0.86	0.99	0.91	0.77	0.90	0.93	0.91	0.93	0.93	0.94	0.93	0.94	0.94	0.55	0.77	0.86	0.86	0.91	0.60
	[23]	0.94	0.94	0.99	0.96	0.90	0.96	0.97	0.96	0.97	0.97	0.98	0.97	0.98	0.98	0.76	0.89	0.94	0.93	0.96	0.84
	[24]	0.98	0.98	0.99	0.99	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.95	0.97	0.98	0.77	0.99	0.92
	[25]	0.97	0.98	1.00	0.98	0.96	0.98	0.99	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.95	0.96	0.97	0.96	0.98	0.58
	[26]	0.96	0.96	1.00	0.97	0.94	0.97	0.98	0.97	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.92	0.94	0.95	0.94	0.97	0.63
	[27]	0.92	0.93	0.99	0.95	0.89	0.95	0.97	0.95	0.96	0.96	0.97	0.96	0.97	0.97	0.85	0.89	0.91	0.90	0.95	0.38
	[28]	0.95	0.95	0.99	0.97	0.93	0.97	0.98	0.97	0.98	0.98	0.98	0.97	0.98	0.98	0.89	0.93	0.94	0.91	0.97	0.70
	[29]	0.89	0.89	0.99	0.93	0.84	0.92	0.95	0.93	0.95	0.95	0.95	0.94	0.95	0.95	0.74	0.84	0.85	0.86	0.93	0.41
	[30]	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Figura 3.3 – Exemplo de Matriz de Tensões de Falta (V)

Fixando-se o **Nível de Disparo** de 0,9pu, temos a **Matriz de Observabilidade** para Afundamentos de Tensão, conforme ilustra a Figura

3.4.

		Barras do SEP (j)																			
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)
[1]		1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0
[2]		1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0
[3]		0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
[4]		1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0
[5]		0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
[6]		1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0
[7]		0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0
[8]		1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0
[9]		0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0
[10]		0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0
[11]		0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0
[12]		0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
[13]		0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0
[14]		0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0
[15]		0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
[16]		0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
[17]		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
[18]		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
[19]		1	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
[20]		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
[21]		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
[22]		1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1
[23]		0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1
[24]		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
[25]		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
[26]		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
[27]		0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1
[28]		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
[29]		1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1
[30]		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 3.4 – Exemplo de **Matriz de Observabilidade** para Afundamentos de Tensão

Logo, percebe-se que a qualidade do resultado obtido pela metodologia está relacionada com a precisão do “mapeamento” do desempenho do SEP em avaliação frente às VTCDs passíveis de ocorrerem no mesmo, ou seja, está relacionado com os critérios de obtenção da **Matriz de Observabilidade** (número de defeitos simulados, tipos de defeitos simulados, impedância de defeitos consideradas, posição de ocorrência dos defeitos, etc.).

3.1.3 Vetor-Redundância

Definidos o **Vetor-Alocação**⁴ e a **Matriz de Observabilidade** para um determinado SEP, conforme descrito anteriormente, o **Vetor-Redundância** - V_{Red} é obtido através da multiplicação da **Matriz de Observabilidade** pelo **Vetor-Alocação** transposto, conforme ilustrado pela expressão [5] que segue:

$$V_{red} = MO \times V_{Aloc}^t \quad [5]$$

Essa operação faz com que cada posição do **Vetor-Redundância** contabilize o número de medidores que, dispostos segundo V_{Aloc} , são capazes de monitorar o defeito na barra correspondente a sua posição, isto é, cada posição do **Vetor-Redundância** indica o número de medidores sensibilizados para um determinado defeito armazenado na **Matriz de Observabilidade**.

⁴**Vetor-Alocação:** foram definidos no item 3.1.1 desta dissertação, dois tipos de **Vetor-Alocação**, um *Binário* e outro *Inteiro*, conforme os valores nas posições dos mesmos. Porém, para que a multiplicação definida pela expressão [5] seja possível para ambos os tipos de vetores, é necessário que, no caso da utilização de **Vetores-Alocação Inteiros**, os mesmos sejam convertidos para o formato *Binário*, a fim de determinar as **Redundâncias** com relação à monitoração de cada um dos defeitos da **Matriz de Observabilidade**. A funcionalidade do formato Inteiro para **Vetor-Alocação** se faz útil na execução do AG.

A Figura 3.5 ilustra o **Vetor-Redundância** obtido a partir do **Vetor-Alocação** e da **Matriz de Observabilidade** fixados nas Figuras 3.1 e 3.3.

Defeitos Simulados →																													
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	[12]	[13]	[14]	[15]	[16]	[17]	[18]	[19]	[20]	[21]	[22]	[23]	[24]	[25]	[26]	[27]	[28]	[29]	[30]
2	2	0	3	1	3	1	3	1	1	1	1	1	1	2	2	0	0	1	1	0	2	2	0	0	0	2	1	2	0

Figura 3.5 – Exemplo de **Vetor-Redundância**

3.2 ALGORITMOS GENÉTICOS

Uma vez que o método de busca de solução escolhido foram os Algoritmos Genéticos, cabe neste ponto uma breve descrição dos seus principais fundamentos, pois, apesar de não se tratar do objeto principal do trabalho realizado, as configurações dos principais parâmetros do mesmo exercem influência direta nos resultados da metodologia elaborada.

O algoritmo básico do AG é constituído por quatro etapas principais:

- sorteio da população;
- avaliação;
- seleção (reprodução);
- cruzamento e mutação.

A Figura 3.6 ilustra como essas etapas são inter-relacionadas de maneira a constituir o AG que foi aplicado ao problema abordado neste trabalho.

Figura 3.6 - Fluxograma do Algoritmo Genético Básico

Basicamente, no AG são formuladas populações de indivíduos (conjuntos limitado de possíveis soluções para um problema) em diferentes etapas (gerações). Em cada etapa são aplicados aos indivíduos os operadores **Seleção**, **Cruzamento** e **Mutação**, analogamente ao processo biológico da *Seleção Natural*, de maneira que as respostas sofram alterações convenientes. Logo, as alterações são ponderadas pela adaptabilidade de cada indivíduo, isto é, pelo atendimento de cada possível solução às restrições e objetivos pertinentes ao problema em análise, de maneira que os indivíduos sofram alterações favoráveis para que o AG convirja para uma solução melhor que satisfaça o problema, ou seja, a solução melhor adaptada.

Sendo assim, cada indivíduo do AG é formado por “cromossomos”, os quais carregam as informações que determinam as características próprias daquele indivíduo, ou seja, parâmetros pelos quais o AG irá avaliar cada indivíduo (possível solução), de modo a averiguar o grau de satisfação dessa solução às restrições e objetivos do problema. No AG, o cromossomo é representado pela string (a Tabela 3.1 apresenta a analogia entre os entes biológicos e os seus equivalentes no AG).

Tabela 3.1 - Tabela de equivalências

Biologia	Algoritmo Genético
Cromossomo	String ou Indivíduo
Genes	Bits
Lócus	Posição do bit na string
Genótipo	Estrutura de dados
Fenótipo	Solução alternativa
População	Conjunto de Strings
Geração	Iteração do AG

Desse modo, a principal finalidade das funções que constituem o AG é adequar as strings que compõem cada população de uma determinada geração, através da manipulação dos seus conjuntos de dados, de maneira que as possíveis soluções que eles constituem, cada vez mais, satisfaçam os objetivos e restrições do problema.

O algoritmo básico é caracterizado pela utilização da codificação binária, a qual se mostra muito eficiente na resolução de problemas de tomada de decisão, como no caso em questão.

Porém, há casos em que uma codificação alternativa, utilizando inteiros, apresenta uma convergência melhor, principalmente quando a aplicação de codificação binária implicaria em indivíduos de tamanho muito grande, como também é o caso do problema em questão. Nesta dissertação as duas formas de aplicação dos AGs são efetuadas, permitindo avaliar qual é a que melhor atenderia o problema em questão.

A população inicial é criada de forma aleatória e então o processo, em “loop”, faz a avaliação, seleção e alteração dos indivíduos que constituem cada geração até a convergência.

3.2.1 Avaliação

A avaliação do indivíduo é realizada através de uma função de avaliação. Ela pode ser representada por qualquer tipo de função, desde que indique o quão bem “adaptado” é um determinado indivíduo para o contexto em que ele está inserido. Colocando em termos mais adequados com o problema abordado nesta dissertação, a função de avaliação deve indicar o grau de satisfação de uma possível resposta para os objetivos e restrições do problema dentro da modelagem do mesmo através dos AGs.

Muitas vezes, porém, principalmente quando se têm pequenas populações, pode ocorrer que o AG convirja rapidamente para um máximo (mínimo) local do universo de soluções do problema, gerando um resultado não esperado.

Quando se trabalha com a técnica de seleção da *Roleta* (que será detalhada em item seguinte), e os melhores indivíduos estão com avaliações próximas à média; pode ocorrer, devido ao sorteio, que alguns dos melhores indivíduos não sejam selecionados, e conseqüentemente perdem-se informações importantes para evolução do algoritmo. Uma técnica utilizada para aprimorar este detalhe do algoritmo básico é o *Re-escalamento*.

3.2.1.1 Re-escalamento

O *Re-escalamento* consiste em evidenciar melhor as diferenças entre as avaliações dos indivíduos de uma dada geração. Isto é feito através de uma função, que altera os valores das avaliações de cada indivíduo, sem alterar a ordem da avaliação dos mesmos em uma dada geração.

Neste trabalho, quando se fez necessário, adotou-se o critério de que a média das avaliações não deveria mudar, e que o melhor indivíduo deveria ter como avaliação o valor fornecido pela mesma multiplicado pelo dobro do valor fornecido pela média das avaliações de cada população (vide Figura 3.7).

Figura 3.7 - *Re-escalamento*

Um caso particular encontrado em algumas simulações foi aquele em que a média e o máximo possuem o mesmo valor, ou ainda o máximo e o mínimo possuem o mesmo valor (e conseqüentemente todos os elementos possuem a mesma avaliação e não devem ser re-escalonados, pois a convergência já teria sido atingida).

Assim, observou-se em muitos casos que, para problemas que possuem máximos (mínimos) locais bem característicos e pouco próximos do máximo (mínimo) absoluto, a utilização do *Re-escalonamento* coopera na convergência para esses pontos, devendo-se atentar para a adequação da modelagem, de forma a contornar esses inconvenientes, aumentando-se as taxas de *Cruzamento* e *Mutação*, ou até mesmo aumentando-se o número de indivíduos em cada população.

3.2.2 Operador Seleção

Depois da avaliação de cada um dos indivíduos, executa-se a **Seleção** dos indivíduos. Para a solução do problema de otimização em questão foram empregadas duas técnicas para a seleção dos indivíduos de cada geração. A técnica empregada inicialmente foi a da *Roleta*, na qual a chance de cada indivíduo ser selecionado é proporcional a sua avaliação. Dessa maneira, um determinado indivíduo, com uma boa avaliação, pode ser selecionado mais de uma vez, já que a chance de ele ser selecionado para constituir a próxima população é maior que a dos indivíduos mal-avaliados.

Com o desenvolvimento do trabalho, percebeu-se que o grau de dificuldade da alocação de medidores aumentava de acordo com o número de pontos do sistema em avaliação. Dessa forma, uma outra técnica de seleção foi implementada, a fim de permitir uma convergência mais rápida para a resposta do problema. A segunda técnica foi a do *Torneio*, através da qual, os indivíduos de uma dada geração são escolhidos por meio de subconjuntos formados por indivíduos aleatórios da geração anterior. Maiores detalhes das técnicas utilizadas no operador seleção do AG são fornecidas nos itens seguintes.

3.2.2.1 *Roleta*

Esta técnica constitui uma forma de realizar o operador seleção do AG. Ela é efetuada em duas etapas distintas. Inicialmente, logo após a avaliação de cada um dos n indivíduos, executa-se o somatório das avaliações, conforme explicitado na expressão [6] que segue.

$$F_{soma} = \sum_{i=1}^n F_{aval} (i) \quad [6]$$

Onde:

- F_{soma} : Soma das avaliações de todos os indivíduos de cada geração;

- $F_{aval}(i)$: Valor da avaliação do indivíduo i de uma dada geração;
- n : Número de indivíduos em cada geração.

Com o valor de F_{soma} , calcula-se a probabilidade de seleção de cada um dos indivíduos de uma geração k para a geração $k+1$ seguinte, baseando-se na relação do valor da avaliação pela soma das avaliações de todos os indivíduos de uma dada geração. A expressão [7] que segue ilustra a probabilidade de seleção do indivíduo i na geração k para a geração $k+1$:

$$P(i) = \frac{F_{aval}(i)}{F_{soma}} \quad [7]$$

Nota-se que, por essa compilação, a probabilidade de cada indivíduo ser selecionado para a geração futura é diretamente proporcional ao valor de sua avaliação.

A Figura 3.8 ilustra a técnica exposta para o caso de uma população com seis indivíduos que têm probabilidades de serem selecionados (pela *Roleta*) proporcional a sua Função de Avaliação.

A partir das probabilidades individuais, elabora-se uma Roleta Numérica⁵, na qual cada faixa (indicada por cores na Figura 3.8) é proporcional a sua probabilidade $P(i)$. Nessa técnica de seleção, depois de elaborada a roleta, sorteia-se um número entre 0 e 1, e verifica-se qual indivíduo teria esse número dentro da respectiva faixa, e, só então, este indivíduo é selecionado para possíveis cruzamentos e mutações, para formação da geração futura.

3.2.2.2 Torneio

Diferentemente da seleção por *Roleta*, esta técnica de seleção não tem a necessidade de criar a probabilidade individual de cada indivíduo. Nela são pré-selecionados, aleatoriamente, x indivíduos (sendo que $x \ll n$, e n é o número de indivíduos por geração), e o melhor entre os esses é

⁵ É dado o nome de *Roleta Numérica* pela **Seleção** ser realizada através de um número real pertencente ao conjunto $[0, 1]$

selecionado. O ciclo é repetido n vezes até que o número de indivíduos por geração seja alcançado para a nova população da geração seguinte. A Figura 3.9 ilustra uma iteração da aplicação do operador **Seleção** utilizando a técnica do *Torneio* com $x = 3$.

Figura 3.9 – Seleção por Torneio

3.2.3 Operador Cruzamento

Após a **Seleção** dos indivíduos, aplica-se o operador **Cruzamento** na população de cada uma das gerações que compõem um AG. No caso do **Cruzamento**, os indivíduos que sofrerão **Cruzamento** são sorteados de acordo com uma probabilidade específica, ou seja, a decisão se um determinado indivíduo sofrerá o **Cruzamento** é feita através do

sorteio de um número aleatório no intervalo $[0, 1]$. Se esse número for superior ao valor da probabilidade de cruzamento fixado para o AG, o indivíduo em questão não sofrerá o **Cruzamento**, caso contrário, ele é separado dos demais.

Em seguida, os indivíduos selecionados para **Cruzamento** são agrupados dois a dois, aleatoriamente. Sorteia-se, então, um número inteiro no intervalo $[1, n_{locus}]$, onde n_{locus} é o número de bits que forma os indivíduos do AG. O valor obtido com o sorteio determina a posição dos indivíduos em que se dará a troca de informação. A Figura 3.10 abaixo ilustra a aplicação do operador **Cruzamento**, para o caso da utilização do **Vetor-Alocação Binário** como indivíduo (que facilmente generalizada para a utilização do **Vetor-Alocação Inteiro**):

Figura 3.10 – Operador Cruzamento

3.2.4 Operador Mutação

Após a aplicação do operador **Cruzamento**, aplica-se o operador **Mutação** para a população de cada uma das gerações do AG. Ele é aplicado de acordo com uma dada probabilidade, fixada para o AG. Dessa forma, para cada bit, de cada um dos indivíduos da população, de uma determinada geração, sorteia-se um número aleatório no intervalo $[0, 1]$. Se esse número for inferior ao valor da probabilidade de mutação fixado para o AG, o bit em questão sofrerá a **Mutação**.

Na utilização do **Vetor-Alocação Binário**, a aplicação da **Mutação** faz com que o valor do bit selecionado seja alterado, isto é; se ele for **0** torna-se **1**, se ele for **1** torna-se **0**. Já para o caso da utilização do **Vetor-Alocação Inteiro**, a aplicação da **Mutação** ocorre de forma diferente. O valor do bit selecionado para a **Mutação** é alterado para um outro qualquer, dentro do universo de possibilidades, ou seja, o número de uma barra armazenado no gene em questão é alterado para um outro número qualquer, que identifica uma outra barra do SEP em avaliação.

Na seqüência do processo do AG, todos os indivíduos são novamente avaliados. Caso seja a última geração, assume-se como resposta, o indivíduo mais bem avaliado entre todas as gerações.

Maiores informações sobre os Algoritmos Genéticos podem ser encontrados em [04].

3.3 TOMADA DE DECISÃO FUZZY

A Teoria de Conjuntos Fuzzy pode ser utilizada em problemas de tomada de decisão (Zadeh [01], Zimmerman [01]), como é o caso do problema abordado por esta dissertação. Ela representa uma alternativa a abordagem de problemas de tomada de decisão, que podem ser encarados como problemas de otimização (pois se têm objetivos e restrições bem definidos). Sendo assim, na sua aplicação, deseja-se determinar uma solução que “satisfaça” de forma simétrica tantos os objetivos, quanto as restrições.

Dessa forma, utilizam-se funções de pertinência (tanto para os objetivos, quanto para as restrições do problema) que descrevem o grau de satisfação para uma possível solução do problema em análise.

No caso do problema tratado neste trabalho, adotou-se uma função de pertinência para o objetivo (μ_{obj}), que indica o quão mais próximo de **1** (alocação mínima para monitoração de um SEP) é o número de medidores sugeridos por um possível **Vetor-Alocação**; e uma função de pertinência para a restrição (μ_{res}), que indica o quanto melhor um **Vetor-Redundância** está para uma possível solução (**Vetor-Alocação**), considerando uma meta mínima de redundância para cada falta. A decisão que avalia se os resultados de ambos (objetivos e restrições) estão satisfatórios é feito através de uma função de pertinência de decisão (μ_{dec}), a

qual, dessa maneira, agrega os resultados dos objetivos e das restrições. A expressão [8] ilustra a expressão descrita.

$$\mu_{dec} = \mu_{obj} \otimes \mu_{res} \quad [8]$$

Onde:

- μ_{obj} : função de pertinência para o objetivo;
- μ_{res} : função de pertinência para as restrições;
- μ_{dec} : função de pertinência para a decisão;
- $\otimes$: representa o operador de agregação.

3.4 MODELAGEM (APLICAÇÃO DO AG AO PROBLEMA)

Tendo exposto as ferramentas que foram empregadas no desenvolvimento da metodologia proposta por este trabalho, procede-se à descrição da modelagem do problema abordado utilizando as mesmas.

A preocupação fundamental na solução do problema de Alocação Ótima de Medidores de Qualidade de Energia Elétrica reside na determinação das posições em que devem ser instalados os equipamentos para minimizar o número de medidores. Logo, percebe-se que a minimização do número de medidores é atingida indiretamente, a partir da determinação dos pontos de maior **Observabilidade** do SEP em avaliação.

Sendo assim, a avaliação recai na análise da influência de um medidor no **Grau de Observabilidade** do sistema. Isto é, uma vez determinado o número mínimo de equipamentos necessários e a disposição dos mesmos para garantir **Grau de Observabilidade** máximo sobre o sistema, tornar-se-ia possível averiguar a influência sobre o **Grau de Observabilidade** do SEP com a redução de um medidor do número mínimo estabelecido, bem como a **Redundância** da monitoração com o acréscimo de um medidor.

Dessa forma, inicialmente, o problema restringiu-se na determinação do **Vetor-Alocação Binário** com o menor número de **1's** (medidores a serem instalados) possível, de forma que o **Vetor-Redundância** não apresente nenhuma posição com valor nulo (garantia da completa **Observabilidade** do sistema em avaliação). Posteriormente, a fim de averiguar a possibilidade de redução do número de medidores, utilizou-se o **Vetor-Alocação Inteiro**, sendo o tamanho máximo dele, definido a partir dos resultados obtidos com a utilização do **Vetor-Alocação Binário**.

Logo, observou-se que essa abordagem pode ser bem modelada através de AGs, uma vez que se têm uma função-objetivo bem definida (minimização de medidores), e uma função de penalização clara (a não-monitoração de algum defeito).

3.4.1 Avaliação Utilizando Algoritmo Genético Clássico

Para resolver o problema de alocação dos medidores de qualidade de energia, a princípio foi feita a modelagem do problema utilizando a modelagem clássica do AG.

Nela o string de cada indivíduo do AG consiste em n_M genes, que representam as n_M barras do SEP em avaliação, onde se poderia alocar medidores de QEE (utilização do Vetor-Alocação Binário).

3.4.1.1 Função - Objetivo

A função-objetivo do problema para a modelagem clássica é apresentada através da expressão [9]. Pela sua definição, nota-se que a intenção da mesma é minimizar o somatório dos elementos do **Vetor-Alocação Binário**:

$$F_{obj} = \sum_{i=1}^{n_M} V_{Aloc}(i) \quad [9]$$

Onde:

- n_M : é o número de barras nas quais pode-se alocar medidores;
- $V_{Aloc}(i)$: é o valor da posição i do vetor V_{Aloc} .

3.4.1.2 Função - Penalização

As restrições do problema quanto a não-monitoração de algum defeito da **Matriz de Observabilidade** por um determinado **Vetor-Alocação** (independente de este ser *Binário* ou *Inteiro*) foram consideradas através da função de penalização. Para esse problema, para cada posição do **Vetor-Redundância** que apresentou valor nulo - indicando que o defeito da linha correspondente na **Matriz de Observabilidade** não foi “observado” por nenhum dos medidores na configuração da string em avaliação (V_{Aloc}) - acrescenta-se uma unidade no valor do valor da função de penalização, conforme descrito na expressão [10] que segue:

$$F_{pena} = \sum_{i=1}^{n_d} g(V_{red}(i)) \quad [10]$$

$$g(V_{red}(i)) = \begin{cases} 1 & se V_{red}(i) = 0 \\ 0 & se V_{red}(i) \neq 0 \end{cases}$$

Onde:

- n_d : é o número de defeitos considerados;
- $V_{red}(i)$: é o valor da posição i do vetor V_{red} .

3.4.1.3 Função - Avaliação

Em seguida, como descrito para o algoritmo básico, multiplica-se o valor obtido com a função de penalização pela constante de valor elevado

r e adiciona-se a ele o valor obtido com a função-objetivo. Como a finalidade do problema é de minimizar o número de medidores, definiu-se a função de avaliação de cada indivíduo como o inverso dessa soma, como é ilustrado pela expressão [11], de maneira que os indivíduos sem posições nulas no **Vetor-Redundância** e com o menor número de medidores sugeridos para a instalação adquirissem um elevado valor para a sua avaliação.

$$F_{aval} = \frac{1}{F_{obj} + r \cdot F_{pena}} \quad [11]$$

Onde:

- F_{aval} : é a função de avaliação;
- F_{obj} : é a função-objetivo que queremos minimizar;
- F_{pena} : é o número de vezes cujo indivíduo extrapolou as restrições;
- r : é um número muito alto (10^6 por exemplo).

A função de avaliação em questão, ilustrada pela expressão [11], é uma função característica do AG clássico, no qual geralmente modela-se o problema em avaliação de tal forma que, na busca pela melhor solução, busca-se minimizar os valores das funções objetivo e de penalização. Assim, na tentativa de ilustrar o resultado obtido por cada indivíduo nessa busca, a função foi definida da maneira ilustrada, pois com os menores valores para as funções objetivo e de penalização é que se atingem os maiores valores da função de avaliação.

Através dessa implementação do problema, nota-se que a questão referente à definição das barras onde devem ser instalados os medidores fica a cargo da busca realizada pelo AG, entre as possíveis soluções apontadas pelos indivíduos de cada uma de suas gerações.

3.4.2 Avaliação Utilizando Teoria dos Conjuntos Fuzzy

Com o desenvolvimento do trabalho, percebeu-se que o grau de dificuldade da alocação de medidores aumenta de acordo com o número de pontos do sistema em avaliação. E, devido o tamanho do indivíduos envolvidos, o equacionamento ilustrado nos itens anteriores não era suficiente para modelar corretamente os objetivos e restrições do problema em questão.

Essa dificuldade advinha do fato dos valores obtidos pelas funções objetivo e de penalização serem distorcidos pelo valor da constante r e pela própria forma da função de avaliação, que, assim, não favoreciam a convergência do AG.

Para contornar essa dificuldade, lançou-se mão da utilização da Teoria de Conjuntos Fuzzy na determinação dos valores das funções objetivo e de penalização, de maneira que os valores das mesmas não interferisse na convergência do algoritmo e permitisse que o mesmo pudesse ser aplicado para redes com dimensões maiores.

3.4.2.1 Função - Objetivo

A função-objetivo proposta para essa modelagem alternativa do problema continua com a finalidade de minimizar o número de medidores a serem alocados segundo um **Vetor-Alocação**. Ela é apresentada abaixo através da expressão [12]:

$$\mu_{obj}(x) = \begin{cases} 1, & \text{se } 1 < x < NIM \\ x, & \\ 0, & \text{se } NIM \geq x \end{cases} \quad [12]$$

Onde:

- x : é o número de medidores para alocação que o indivíduo em avaliação sugere;
- NIM : é o número inaceitável de medidores para o sistema em estudo, isto é, a partir do qual o sistema de monitoração torna-se inviável.

Note que a função em questão não é definida para o intervalo $(-\infty, 1[$, pois o número mínimo de medidores a serem instalados em um SEP que se deseja monitorar é, logicamente, no mínimo unitário.

A razão da escolha de uma função hiperbólica, para representar a função-objetivo, foi o fato desse tipo de função ilustrar fielmente o objetivo do problema em questão, sem a necessidade de se utilizar constantes ou quaisquer outros artifícios algébricos.

Além disso, essa função, de forma simples, insere um comportamento muito interessante para o problema de minimização do número de medidores, que é característico na definição dos sistemas de monitoração. Este comportamento refere-se ao fato de que o impacto de se agregar uma unidade (no caso do problema em questão, um medidor) no resultado da função não é tão expressivo quanto o de se retirar uma unidade. Isto é, sendo $f(x)$ a função hiperbólica definida pela expressão [13].

$$|f(x+1) - f(x)| > |f(x) - f(x-1)| \quad [13]$$

Dessa forma, pode-se entender que, por esse comportamento, a função-objetivo também favorece a minimização do número de medidores.

3.4.3 Função - Penalização

Já as restrições do problema para a nova modelagem foram consideradas através da função de penalização em duas etapas. Na

primeira etapa, avaliou-se a redundância mínima desejada, conforme apresentado na expressão [14] abaixo:

$$F_{pena}(x) = \begin{cases} \frac{1}{x - RM} & , \text{ se } x > (RM + I) \\ 1, & \text{ se } (RM - I) \leq x \leq (RM + I) \\ \frac{-1}{x - RM} & , \text{ se } x < (RM - I) \end{cases} \quad [14]$$

Onde:

- x : é a média das redundâncias para uma determinada alocação;
- RM : é a redundância-média mínima definida para a avaliação (número mínimo de medidores que se deseja para monitorar cada uma dos defeitos).

Por fim, em uma segunda etapa, a fim de garantir que houvesse uma distribuição homogênea da redundância ao longo de todo o **Vetor-**

Redundância, divide-se o resultado da função de penalização pelo número de posições nulas do próprio **Vetor-Redundância**. Dessa forma, impede-se que um indivíduo (**Vetor-Alocação** em avaliação pelo algoritmo), que apresentou uma redundância elevada para um determinado defeito e redundância nula para muitos outros, seja tão bem avaliado quanto um que apresentou uma redundância baixa para todos os defeitos.

Logo, seguindo os mesmos motivos que levaram a escolha de uma função do tipo hiperbólica para a função-objetivo, determinou-se a função de penalização definitiva aplicada no algoritmo, conforme está ilustrado abaixo pela expressão [15]:

$$\mu_{pena} = \frac{\mu_{res}(x)}{NRZ^3} \quad [15]$$

Onde:

- **NRZ**: é a o número de posições nulas do **Vetor-Redundância** (V_{Red});

Note que o expoente utilizado sobre o fator que considera o número de posições nulas intensifica o peso deste na função, de forma que seja favorecida a obtenção de **Vetores-Rendundância** sem nenhuma posição nula, e, assim, a avaliação exercida pelo AG possa se voltar unicamente para a questão da alocação dos medidores, a fim de se minimizar o número dos mesmos.

Isto é, a princípio a função de penalização deve refletir a premissa básica para o problema da alocação dos medidores, que seria garantir a monitoração de todos os defeitos passíveis de ocorrerem em um SEP. Apenas após ter essa premissa atendida, se atentaria para a averiguação de qual deve ser a disposição dos medidores, de maneira que seja necessário o menor número dos mesmos para se monitorar um SEP.

3.4.3.1 Função - Avaliação

Para essa alternativa a modelagem do problema, a avaliação do indivíduo é fornecida através de uma função de avaliação semelhante à função de pertinência de decisão. Sendo assim, adotou-se a expressão [16]:

$$\mu_{dec} = \mu_{obj} * \mu_{pena} \quad [16]$$

Onde:

- μ_{dec} é a função de avaliação;
- μ_{obj} é a função-objetivo;
- μ_{pena} é a função de penalização.

Nessa função, o operador da multiplicação faz o papel do operador de agregação da expressão [8].

CAPÍTULO 4

SIMULAÇÕES E RESULTADOS

O capítulo em questão exhibe os resultados da aplicação da metodologia definida no capítulo anterior em três redes reais. Além da apresentação dos resultados da Alocação Ótima de Medidores de Qualidade de Energia Elétrica, são detalhados os objetivos e particularidades de cada uma das simulações realizadas. Gráficos de desempenho do Algoritmo Genético, bem como aprimoramentos executados para cada situação são apresentados e justificados na medida em que se fizeram necessários.

4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A metodologia desenvolvida nesta dissertação foi empregada em três redes reais de diferentes portes. Todas elas foram supostas equilibradas. O AG utilizado em todas as simulações foi resultado de desenvolvimento próprio.

Inicialmente, as simulações foram feitas sob uma série de restrições, a fim de averiguar o correto funcionamento da metodologia desenvolvida. Posteriormente, a medida que o desempenho da metodologia se mostrou satisfatório, o grau de complexidade das simulações era aumentado gradativamente. Ao final, para validar a metodologia, a alocação de medidores final foi executada na rede de maior porte, considerando

defeitos fase-terra, dupla fase-terra e trifásico simultaneamente, a fim de garantir a monitoração de Afundamentos e Elevações de tensão.

4.1.1 Curto-circuito

A opção por fazer a simulação de validação final considerando os três tipos de defeitos, simultaneamente, deve-se a tentativa de tornar a **Matriz de Observabilidade** do SEP em avaliação o mais completa possível, isto é, aumentar a precisão do “mapeamento” de VTCDs passíveis de ocorrerem no SEP utilizado, a partir da consideração do maior número de causas dos mesmos, que, para esta dissertação, são simulações de curto-circuitos.

As características de uma dada VTCD estão intrinsecamente relacionadas com as características do evento que a originou. As VTCDs dependem, basicamente, da aleatoriedade, da intensidade e do tipo do evento que a originou.

Nesta dissertação foram utilizadas simulações de curto-circuitos para modelar as principais causas da ocorrência de VTCD. Então, as características de um dado curto-circuito, como intensidade e tipo, estão relacionadas a uma série de parâmetros determinados na ocorrência dos mesmos, como impedância de defeito, posição de ocorrência e número de fases envolvidas.

A expressão [17] abaixo ilustra a dependência entre um dado defeito e os parâmetros que o caracteriza:

$$Defeito = f(x, \Omega, \phi) \quad [17]$$

Onde:

- x : corresponde à posição de ocorrência do defeito em uma determinada rede elétrica;
- Ω : corresponde à impedância de defeito;
- ϕ : corresponde ao número de fases envolvidas no defeito.

Logo, quanto maior for o número de curto-circuitos diferentes simulados, maior será a **Matriz de Observabilidade** de um dado SEP e melhor será a caracterização do comportamento do mesmo SEP com relação às VTCDs. Por isso que, para a validação final da metodologia, foram considerados defeitos fase-terra, dupla fase-terra e trifásico, simultaneamente.

4.1.2 Ocorrências de VTCDs

Conforme descrito no item 3.1.2 do capítulo anterior, as simulações de curto-circuito determinam uma matriz de tensões de falta que, por sua vez, são utilizadas para determinar a **Matriz de Observabilidade**, utilizada na metodologia. Assim, definindo-se o **Nível de Disparo**,

determina-se qual a intensidade das VTCDs que se deseja monitorar em um dado SEP.

Definindo-se **o Nível de Disparo** como 0,9pu ou 1,1pu, isto é, o limiar de ocorrência dos Afundamentos e Elevações, respectivamente, fica claro que VTCDs com intensidades mais severas (isto é, com magnitudes inferiores a 0,9pu, para os Afundamentos; e superiores a 1,1pu para as Elevações) também serão monitoradas. Logo, fixando-se o valor de **Nível de Disparo** no limiar de ocorrência das VTCDs, o número de medidores necessários para monitorar todo um SEP será máximo.

Isto se deve ao fato de que, para algumas simulações de faltas, as tensões nas barras podem não sofrer variações muito intensas. Assim, estando o **Nível de Disparo** fixado em um valor diferente daquele referente ao limiar da ocorrência das VTCDs, ou seja, VTCDs mais severas; algumas simulações acabam sendo ignoradas pela metodologia na **Matriz de Observabilidade**, isto é, na linha da **Matriz de Observabilidade** referente a uma falta deste tipo, só haverá valores nulos.

Por exemplo, para uma determinada simulação de falta, as tensões de algumas barras podem assumir valores entre 0,9 e 0,8pu. Caso o **Nível de Disparo** para a avaliação de todo um sistema estiver fixado em 0,8pu, a linha correspondente a esse defeito na **Matriz de Observabilidade** apresenta apenas valores nulos, indicando que esse defeito não ocasionou VTCDs para a avaliação em questão. Dessa maneira, a monitoração desse

defeito não se torna necessária, contribuindo para que o número de medidores necessários para monitorar todo o SEP seja menor (no caso desse defeito ser decisivo para a instalação de um medidor de QEE).

Assim, alterando-se o **Nível de Disparo** do limiar de ocorrência de VTCDs, o número de defeitos que ocasionam VTCDs pode ser diminuído, diminuindo o número de medidores necessários para monitorar todo um SEP, com relação àquele necessário para monitorar o mesmo SEP, quando o **Nível de Disparo** é fixado no limiar de ocorrência de VTCDs.

Por esse motivo, as simulações realizadas nesta dissertação sempre consideraram o **Nível de Disparo** fixado no limiar de ocorrência de VTCDs.

4.2 REDE COM 7 BARRAS

A metodologia foi inicialmente aplicada para a rede da Figura 4.1.

Figura 4.1 – Rede com 7 barras

Para a montagem da **Matriz de Observabilidade** deste caso, foram feitas simulações de defeitos fase-terra francos, utilizando aplicativo de desenvolvimento próprio. Inicialmente, a fim de averiguar o correto funcionamento da metodologia, foram simulados defeitos apenas nas barras do sistema em questão. A **Matriz de Observabilidade** obtida para **Nível de Disparo** de 0,9pu é exibida na Tabela 4.1 apresentada na seqüência:

Tabela 4.1 – Matriz de Observabilidade

Tensão	Barra de Defeito						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1	1	1
6	0	0	0	0	0	1	0
7	0	0	0	0	0	0	1

A metodologia foi aplicada utilizando, inicialmente, a formulação ilustrada no item 3.3.1. Então, foi determinada a alocação de dois medidores nas barras 6 e 7, que são as barras que ficam logo após os transformadores da barra 5, uma vez que a chave existente entre elas foi considerada normalmente aberta. O **Vetor-Alocação** correspondente a essa configuração é ilustrado a seguir na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – **Vetor-Alocação**

Barra	1	2	3	4	5	6	7
Redundância	0	0	0	0	0	1	1

Observando a **Matriz de Observabilidade**, nota-se que a barra 6 percebe praticamente todos os defeitos no sistema, com exceção daquele simulado na barra 7. A situação análoga acontece para a barra 7. O **Vetor Redundância** obtido para esse caso é mostrado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – **Vetor-Redundância**

Barra	1	2	3	4	5	6	7
Redundância	2	2	2	2	2	1	1

As posições para instalação dos medidores (determinação do melhor indivíduo) foram determinadas utilizando 300 gerações, 200 indivíduos por população, probabilidade de cruzamento de 80% e probabilidade de mutação de 5%. Esses valores foram definidos, a fim de que a convergência dos resultados fosse garantida, permitindo, assim, avaliar a adequação do problema à metodologia proposta, bem como o impacto de possíveis adequações na modelagem no desempenho do AG.

O gráfico da Figura 4.2 ilustra o comportamento dos indivíduos de cada geração frente o problema abordado neste trabalho. Ele é composto por curvas com os valores obtidos pela *Função-Avaliação* para o melhor indivíduo de cada geração (*Max*), para o pior indivíduo de cada geração (*Min*) e pela média dos valores da *Função-Avaliação* de todos os indivíduos de cada uma das gerações (*Med*). Também são apresentadas as curvas com os valores obtidos para a *Função-Objetivo* para o melhor indivíduo de cada

geração (*Alfa*), e a média dos valores obtidos pela *Função-Objetivo* para todos os indivíduos de cada uma das gerações (*Objetivo*).

A partir dele, observa-se que a convergência do problema é muito rápida e que cerca de 50 gerações já seriam suficientes para garantir que o melhor indivíduo fosse encontrado, representando a alocação ótima de medidores no sistema de 7 barras em avaliação.

Figura 4.2 – Gráfico de desempenho do AG para a Rede com 7 barras

4.3 REDE COM 60 BARRAS

O AG clássico apresentado no item 3.3.1 também foi aplicado para a rede de 60 barras, ilustrada na Figura 4.3, considerando o **Nível de Disparo** dos medidores em 0,9pu.

Nesta avaliação, foram feitas simulações de defeitos fase-terra e trifásico francos apenas nas barras do sistema utilizando aplicativo de desenvolvimento próprio, e foram consideradas apenas as contribuições do gerador de 5MW (barra 1332), uma vez que os outros geradores têm potência nominal pequena ou operam somente em situações de contingência. A metodologia foi aplicada utilizando 300 gerações, 200 indivíduos por população, probabilidade de cruzamento de 80% e probabilidade de mutação de 5%, a fim de garantir a convergência do algoritmo.

Para o primeiro caso, defeitos fase-terra, o número mínimo de medidores determinado foi 9. A possível configuração sugerida pelo AG determinou a instalação de equipamentos nas barras 1349, 1263, 1418, 1343, 1257, 1260, 1336, 1372 e 1253 do sistema. Essas barras estão identificadas na Figura 4.3 por círculos contínuos. Já para o caso de simulações de defeitos trifásicos, o número mínimo de medidores determinado foi 5. A possível configuração sugerida pelo AG determinou a instalação de equipamentos nas barras 1264, 1356, 1343, 1253, 1336. Essas barras estão identificadas na Figura 4.3 por retângulos tracejados.

Observou-se que, para uma rede desse porte, existe mais de uma disposição dos medidores que atende a restrição de minimização do número de equipamentos necessários. Logo, mais restrições podem ser implementadas de maneira a representar de forma mais fiel a realidade e de maneira a diminuir o universo de soluções.

Também pode-se observar a comprovação do defeito trifásio ser mais severo que o defeito fase-terra, pois o número de medidores necessários para monitorar o SEP em questão, considerando apenas defeitos trifásicos, é menor que necessário para monitorar defeitos fase-terra. Isto se deve ao fato de que um defeito trifásico, ocorrido em uma dada posição e com uma dada impedância de defeito, tem as suas conseqüências propagadas por mais barras do sistema que um defeito fase-terra, ocorrido nas mesmas condições. Logo, como mais barras são sensibilizadas por um defeito trifásico do que por um defeito fase-terra, em uma dada posição, o número de medidores necessários para monitorar o sistema com relação a defeitos trifásicos é menor que aquele necessário com relação a defeitos fase-terra.

A Figura 4.4 ilustra a evolução do AG para a resolução do problema de alocação considerando defeitos trifásicos. Nota-se que a convergência é rápida, sendo que 100 gerações já seriam suficientes para atingir a solução ótima.

Figura 4.4 – Gráfico de Desempenho do AG para Rede de 60 Barras – Defeitos Trifásicos

Considerando as simulações de defeitos fase-terra, observou-se que o número de gerações para se atingir a convergência foi próximo do limite utilizado para as gerações do AG, conforme ilustrado pela Figura 4.5. Sendo assim, nesse caso, o desempenho do AG básico é prejudicado pela sua própria simplicidade frente ao modelamento do problema proposto, isto é, para redes com muitas barras, a dimensão da string torna-se demasiadamente grande, aumentando a complexidade do problema, e requerendo refinamento no algoritmo.

Evolução dos parâmetros

Figura 4.5 – Gráfico de Desempenho do AG para Rede de 60 Barras – Defeitos Fase-Terra

Dessa forma, a fim de contornar essa dificuldade, foram aplicadas as técnicas de seleção por *Torneio* e de *Re-escalamento* da avaliação. Observou-se, de acordo com a Figura 4.6, que a solução ótima foi encontrada em menos de 50 gerações, mostrando-se mais apropriado para problemas dessa magnitude.

Figura 4.6 – Gráfico de Desempenho do AG para Rede de 60 Barras – Defeitos Fase-Terra – com *Seleção por Torneio* e *Re-escalamento*

4.4 REDE COM 154 BARRAS

Depois da comprovação do funcionamento da metodologia para redes menores, a mesma foi empregada em uma rede com 154 barras, de forma a averiguar a validade da mesma para um caso mais complexo e próximo da realidade em que a mesma deve ser aplicada. A rede utilizada é ilustrada nas Figuras 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10 exibidas a seguir (no ANEXO I são apresentados os diagramas de impedâncias das mesmas).

Figura 4.7 – Rede de transmissão utilizada – 1ª parte

Figura 4.8 – Rede de transmissão utilizada – 2ª parte

Figura 4.9 – Rede de transmissão utilizada – 3ª parte

Figura 4.10 – Rede de transmissão utilizada – 4ª parte

4.4.1 VETOR-ALOCAÇÃO BINÁRIO

Para a montagem da **Matriz de Observabilidade** foram simulados defeitos fase-terra com impedância de 5Ω . O **Nível de Disparo** dos medidores considerado foi de 0,9pu (limiar da ocorrência do Afundamento de Tensão [05]).

Os defeitos foram simulados em todas as barras do sistema e a cada 10% do comprimento de cada um dos trechos do mesmo. Isso foi feito, pois assim, julgou-se que a representação do desempenho frente as possíveis perturbações transitórias, passíveis de ocorrerem na rede elétrica em avaliação estaria suficientemente completa, retratando a realidade do sistema, para a realização da Alocação Ótima de Medidores de Qualidade de Energia. Ou seja, a matriz de tensões obtidas com as simulações desses defeitos, do ponto-de-vista da metodologia, estaria ilustrando os valores das tensões de todas as barras do sistema para grande parte dos defeitos passíveis de ocorrerem no SEP em avaliação. As simulações foram executadas através de aplicativo específico para a simulação de curtos-circuitos (ANAFAS), totalizando 2143 defeitos.

A opção por essa configuração dos parâmetros referentes a essa simulação foi feita por ser conservativa. Isso porque o defeito fase-terra, em geral, é o menos severo. Isto é, a área de influência de um defeito desse tipo, em um determinado ponto de um sistema de potência qualquer, tende a ser menor que para qualquer outro tipo de defeito aplicado no mesmo ponto.

Assim, a fim de garantir ***Grau de Observabilidade*** máximo para o sistema, o número de medidores necessários para monitorar um sistema qualquer frente a defeitos fase-terra é maior do que para os outros tipos de defeitos.

No entanto, nada impede a extensão da aplicação da metodologia, considerando os outros tipos de defeitos possíveis (trifásico, dupla-fase e dupla-fase terra).

Neste trabalho, os mesmos não foram simulados, pois se optou por limitar os tipos de defeitos simulados, a fim de garantir uma simplicidade na avaliação das alocações, e orientar a busca pela solução que melhor satisfizesse as restrições do problema da Alocação Ótima de Medidores de Qualidade de Energia. Essa restrição faz-se pertinente, uma vez que o universo de soluções do mesmo mostrou-se demasiadamente extenso (por se tratar de uma rede com 154 barras, o universo de soluções é da ordem de $2^{154} \approx 10^{50}$ possíveis soluções).

Foi com o mesmo intuito de representar adequadamente a realidade das possíveis condições transitórias a que um determinado SEP pode ser submetido, que foram simulados defeitos ao longo dos trechos e com impedância de defeito não-nula, pois na realidade os mesmos são os mais comuns de ocorrerem nas redes elétricas.

As simulações iniciais da metodologia desenvolvida neste trabalho, para a rede em questão, utilizaram a modelagem clássica do AG descrita no item 3.3.1. Porém os resultados encontrados com a mesma não se mostraram satisfatórios, uma vez que o AG sugeria a instalação de aproximadamente 40 medidores, representando uma relação entre número de medidores e número de barras muito superior ao apresentado pelas duas redes anteriores. A partir da análise dos valores das Funções Objetivo, de Penalização e de Avaliação, percebeu-se que os mesmos passaram a apresentar um comportamento que não favorecia a convergência do AG.

Para contornar essa dificuldade, aplicou-se a Teoria dos Conjuntos Fuzzy, conforme descrito no item 3.3.2, de forma que o comportamento das Funções Objetivo, de Penalização e de Avaliação pudesse ser mais bem controlado e parametrizado, de acordo com os interesses da avaliação.

Além disso, também devido a elevada extensão do universo de soluções, foi implementada a manutenção do melhor indivíduo da população de uma determinada geração, na população da geração posterior, a fim de evitar que o algoritmo não convergisse (Elitismo).

Outro diferencial na implementação do AG para resolver o problema em questão foi a interferência no sorteio da população inicial. Uma vez que o algoritmo clássico sugere a completa aleatoriedade para a determinação dos valores de cada uma das posições dos **Vetores-Alocação**

dos indivíduos da população inicial (50% de chance para sortear-se o valor “1”; 50% de chance para sortear-se o valor “0”). Com isso, para o problema abordado nesta dissertação, os indivíduos apresentariam uma configuração em que o número de **1’s** (uns) médio nos respectivos **Vetores-Alocação** seria de 77 ($154\text{barras}/2 = 77$). Assim, a convergência do problema seria prejudicada, uma vez que os possíveis indivíduos iniciais teriam avaliações muito ruins. A fim de contornar essa dificuldade, fixou-se a probabilidade de sorteio do valor **1** para cada posição do **Vetor-Alocação** em 10%, fazendo com que o número de **1’s** (uns) médio nos respectivos **Vetores-Alocação** de cada um dos indivíduos em questão fosse 15, próximo ao número máximo de medidores que se pretenderia alocar para monitorar a rede em avaliação com **Grau de Observabilidade** máximo.

Dessa forma, foi possível gerar uma população inicial suficientemente diversificada, na qual cada um dos indivíduos sugerisse para a instalação um número de medidores adequado. Assim sendo, o operador *Cruzamento* do AG ficou responsável por encontrar a melhor combinação dos loci dos indivíduos da população inicial.

O operador *Mutação* também foi alterado, a fim de favorecer a convergência do AG para uma solução satisfatória. Dessa forma, como o objetivo do trabalho é minimizar o número de medidores necessários para monitorar completamente um SEP (e, para isso, determinam-se quais são as posições em que os mesmos devem ser instalados, a Alocação Ótima dos

mesmos), foi estabelecido que a probabilidade de mutação de um bit unitário da string de cada indivíduo seria o dobro da probabilidade de mutação de um bit nulo. Assim, praticamente, a *Mutação* averiguaria a necessidade da instalação de cada medidor sugerido no **Vetor-Alocação** de cada indivíduo

Sendo assim, fixando-se uma taxa de cruzamento de 80% e uma taxa de mutação de 20%, e fixando o parâmetro *NIM* em 90 medidores; o algoritmo sugeriu a alocação de medidores em 23 pontos do sistema. Os mesmos são destacados por elipses pretas tracejadas nas Figuras, que ilustram a rede utilizada no trabalho.

4.4.2 VETOR-ALOCAÇÃO INTEIRO

O último recurso utilizado para aprimorar a metodologia desenvolvida neste trabalho foi a modificação no **Vetor-Alocação**. Seguindo conceitos definidos em [12], o **Vetor-alocação Inteiro** passou a ser utilizado no lugar do **Vetor-Alocação Binário**. As modificações necessárias no AG para adaptar a metodologia desenvolvida ao novo **Vetor-Alocação** foram descritas ao longo do próprio capítulo anterior.

Para validar a metodologia, a simulação final foi realizada considerando defeitos fase-terra, dupla fase-terra e trifásico, todos com impedância de defeito de 5Ω . Os defeitos foram simulados a cada 10% de cada trecho do SEP, sendo simuladas faltas em 2143 pontos diferentes, para cada tipo de defeito. Além da avaliação individual para cada tipo de

defeito, foi feita uma avaliação conjunta dos defeitos. Assim, agregando-se os três tipos de feitos, a matriz de tensões de falta totalizava 6429 linhas (sendo 2143 linhas referentes a cada um dos três defeitos).

As simulações foram executadas considerando 500 gerações e 200 indivíduos por geração, a fim de garantir que a convergência fosse atingida. As taxas de cruzamento e mutação foram fixadas em 70% e 5%, respectivamente. Os resultados encontrados são apresentados na Tabela 4.3. Nas Figuras 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10 anteriores, ilustrou-se as alocações de medidores sugerida pelos **Vetores-Alocação** obtidos para cada tipo de curto-circuito. Os pontos determinados pelo **Vetor-Alocação** referente aos defeitos trifásico foram destacados por retângulos verdes, para os defeitos dupla fase-terra por retângulos vermelhos, para os defeitos fase-terra por retângulos azuis e os referentes pontos determinados pelo **Vetor-Alocação** encontrado considerando os três tipos de defeitos simultaneamente foram ilustrados por retângulos amarelos.

Tabela 4.3 – Números de Medidores por Tipo de Defeito

Tipo Defeito	Nº. de Medidores
Fase-Terra	23
Dupla Fase-Terra	19
Trifásico	17
Todos	23

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E FUTUROS DESENVOLVIMENTOS

No capítulo em questão é exposta a contribuição acadêmica que a presente dissertação buscou preencher. Também são apresentadas as conclusões tiradas após a análise dos resultados das simulações realizadas. O capítulo é encerrado apontando as possíveis continuidades do trabalho realizado.

5.1 CONCLUSÕES

Com a metodologia desenvolvida foram obtidos resultados promissores, que permitem orientar o engenheiro do planejamento de redes na aquisição de equipamentos de medição, de forma a atender necessidades conflitantes e comuns encontradas na sua atividade: *“Maximizar a Capacidade de Monitoração sobre a Rede”* e *“Atender os Limites Orçamentários da Empresa”*, uma vez que, pelo trabalho desenvolvido, averiguou-se que, para monitorar completamente uma determinada rede, o número de equipamentos necessários para a completa monitoração gira em torno de 20% dos pontos da mesma (para a 1ª simulação exibida no item 4.2, para uma rede de 7 barras a metodologia sugeriu a instalação de 2 medidores, correspondendo a aproximadamente 30% dos pontos da rede; para a 2ª simulação exibida no item 4.3, para uma

rede de 60 barras a metodologia sugeriu a instalação de 9 medidores, no caso mais conservativo, correspondendo a aproximadamente 15% dos pontos da rede; e para a 3ª simulação exibida no item 4.4, para uma rede de 154 barras a metodologia sugeriu a instalação de 23 medidores, correspondendo a aproximadamente 15% dos pontos da rede). Obviamente, esta porcentagem pode variar com as características do sistema elétrico, tais como intensidade e diversidade dos níveis de curto-circuito nas barras do sistema.

Lembrando ainda que um **Vetor-Alocação** sugere uma alocação de medidores, na qual pelo menos um monitora cada um dos “possíveis” casos de ocorrência de VTCD no SEP em questão; observou-se que a determinação dos pontos onde os mesmos vão ser instalados não é tão significativa como a quantidade de instrumentos a serem utilizados. Isto é, enquanto a quantidade de equipamentos a serem utilizados apresenta uma variação relativamente baixa, a posição em que os mesmos devem ser instalados varia, uma vez que isso está vinculado com a combinação da capacidade de **Observabilidade** de cada ponto do SEP que se deseja monitorar.

Isso é claramente ilustrado pelo resultado obtido na última simulação, na qual, considerando as duas formas de modelagem da metodologia (**Vetor-Alocação Binário** e **Vetor-Alocação Inteiro**), foi determinada a

instalação de 23 medidores no SEP, para o caso da avaliação considerando apenas defeitos fase-terra.

Outro ponto que favorece essa argumentação é o fato de que o número de medidores determinados para a avaliação de cada tipo de defeito variou menos de 26%; e, para a simulação considerando os três tipos de defeitos simultaneamente, também foi determinada a instalação de 23 medidores, conforme foi determinado para o defeito fase-terra individualmente. Isso só, por sua vez, ilustra o fato de que a consideração de defeitos fase-terra apenas foi suficiente para a aplicação da metodologia no caso em questão.

A implementação de outras restrições para estabelecer critérios que diferenciem a instalação de medidores entre os pontos de um SEP se fazem necessárias, a fim de determinar exatamente os locais em que os mesmos devem ser instalados.

Além disso, a metodologia, devido a sua flexibilidade, apresenta um potencial ainda maior, uma vez que ela poderá ser ampliada para permitir considerar particularidades também muito comuns no cotidiano do planejamento de redes, como a impossibilidade de instalação de equipamentos em determinados pontos do sistema, ou a necessidade de se garantir a monitoração de determinados pontos com uma redundância pré-estabelecida.

Dessa forma, a metodologia pode promover a alteração dos conceitos comumente utilizados no estabelecimento das premissas relativas à obtenção de parâmetros que permitam averiguar o desempenho dos SEPs, pois ela estabelece que a monitoração completa de um sistema pode ser executada sem a necessidade de se instalar equipamentos com essa finalidade em cada uma das barras de um SEP qualquer, ou seja, que indicadores locais, devido às características topológicas do próprio SEP, podem ser ampliados para outros locais, sem comprometimento do significado das informações de medição. Isso, dessa maneira, amplia a funcionalidade de um sistema de monitoração sobre um determinado sistema de potência, transformando a combinação das posições de instalação dos equipamentos em um parâmetro importante para a monitoração de todo um sistema de potência.

Para as empresas concessionárias de energia elétrica, essa metodologia representa uma alternativa atraente para a monitoração das suas redes, pois ela permite considerar, além das limitações orçamentárias, as limitações de acesso e instalação, e a priorização de pontos de instalação. Com isso o processo de aquisição de um sistema de monitoração passa a considerar as dificuldades pelas quais as empresas estão sujeitas, adequando-o à realidade do setor elétrico.

Para o órgão regulador, essa metodologia fornece uma flexibilização com relação ao estabelecimento de limites e critérios de

fornecimento de energia a serem respeitados pelas concessionárias. Ela permite a exigência do respeito aos mesmos, já que a viabilização de um sistema de monitoração que permita o acompanhamento do desempenho das redes é facilitada, pois, através da utilização da própria topologia de cada um dos sistemas, determina-se os pontos do sistema com comportamentos semelhantes frente às possíveis perturbações que o sistema pode vir a sofrer.

5.2 FUTUROS DESENVOLVIMENTOS

A evolução natural deste trabalho seria a Alocação Ótima de medidores considerando os demais fenômenos de Qualidade de Energia (Desequilíbrio de Tensão, Flutuação de Tensão – Flicker, Distorção Harmônica de Tensão e Nível de Tensão). A dificuldade se ateria na busca por uma Alocação que atendesse tanto a monitoração dos fenômenos que se enquadram dentro da classificação de regime permanente, quanto a monitoração das VTCDs, que se enquadram dentro da classificação de fenômenos intempestivos. Para isso, conceitos diferentes de monitoração, oriundos das características de cada um dos fenômenos (os fenômenos intempestivos têm característica aleatória, enquanto que os de regime permanente são monitorados continuamente) seriam tratados conjuntamente, de forma a permitir a convergência para uma solução comum.

Além disso, os custos das configurações de instalação dos equipamentos podem ser levantados, de forma que a metodologia estaria apta a lidar diretamente com a realidade do processo de aquisição de um sistema de monitoração.

BIBLIOGRAFIA

- [01] KAGAN, Nelson. **Configuração de Redes de Distribuição Através de Algoritmos Genéticos e Tomada de Decisão Fuzzy**. São Paulo: Tese de Livre Docência, EPUSP, 1999.
- [02] AMMER, C.; RENNER, H. **Determination of the Optimum Measuring Positions for Power Quality Monitoring**. New York: ICHQP, 2004.
- [03] KAGAN, Nelson; OLIVEIRA, Carlos César Barioni de. **Fuzzy Decision Model for the Reconfiguration of Distribution Networks Using Genetic Algorithms**. In: POWER SYSTEMS COMPUTATION CONFERENCE, 12., Trodheim, 1999. PSCC: Proceedings. Zurich : PSCC, 1999. n. p.
- [04] GOLBERG, D. E. **Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning**. New York: Addison-Wesley, 1989.
- [05] IEEE Std. 1346. **IEEE Recommended Practice for Evaluating Electric Power System Compability with Electronic Process Equipment**. New York: 1998.

- [06] GALLEGO, R. A.; MONTICELLI, A. J.; Romero, R. **Optimal Capacitor Placement in Radial Distribution Networks**. New York: IEEE Transactions on Power Systems, vol. 16, nº. 4, November 2001.
- [07] OLGUIN G.; BOLLEN, M. H. J. **Optimal Dips Monitoring Program for Characterization of Transmission System**. IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2003.
- [08] ELDERY, M. A.; EL-SAADANY, E. F.; SALAMA, M. M. A. **Optimum Number and Location of Power Quality Monitors**. New York: ICHQP, 2004.
- [09] BOLLEN, M. H. J.; QADER M. R.; ALLAN, R. N. **Stochastic Prediction of Voltage Sags in a Large Transmission System**. New York: IEEE Transactions on Industry Applications, Jan/ Feb 1999.
- [10] OLGUIN, G. **Stochastic Assessment of Voltage Dips Caused by Faults in a Large Transmission System**. Sweden, Göteborg: Thesis for the Degree of Licentiate of Engineering, Department of Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology, 2003.
- [11] BOLLEN, M. H. J.; QADER M. R.; ALLAN, R. N. **Stochastic and Statistical Assessment of Voltage Dips**. IEE Colloquium, Tools and Techniques for Dealing with Uncertainty (Digest No. 1998/200).

- [12] BOLLEN, M. H. J. **Understanding Power Quality Problems: voltage sags and interruptions**. New York: IEEE Press Series on Power Engineering, 2000.

- [13] OLGUIN, G. **Voltage Dip (Sag) Estimation in Power Systems based on Sthocastic /assessment and Optimal Monitoring**. Sweden, Göteborg: PhD Thesis, Department of Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology, 2003.

ANEXO I

DIAGRAMA DE IMPEDÂNCIAS – REDE DE 154 BARRAS