Breno Caetano da Silva

**Utilização de um Sistema Multi-Agentes em
Redes de Comunicação para a Proteção
Digital de Distância Adaptativa**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de
São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte
dos requisitos para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Elétrica

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Po-
tência
Orientador: Prof. Dr. Mário Oleskovicz

São Carlos
2009

Sumário

Resumo	xiii
Abstract	xv
Lista de Figuras	xvii
Lista de Tabelas	xix
Lista de Abreviaturas e Siglas	xxi
Lista de Símbolos	xxv
1 Introdução	1
1.1 Participações em Congressos Decorrentes desta Pesquisa	3
1.2 Disposição Geral deste Documento	4
2 Revisão Bibliográfica	5
2.1 A Proteção Digital de Distância Adaptativa - PDDA	6
2.1.1 A Curva de Proteção Quadrilateral Tradicional e a Curva de Proteção Adaptativa	6
2.2 Sistemas Multi-Agentes	10
2.2.1 Inteligência Artificial	12
2.2.2 Agentes Inteligentes	14
2.2.3 Sistemas Multi-Agentes	20
2.2.4 Coordenação	21
2.2.5 Cooperação	23
2.2.6 Competição	30
2.2.7 Considerações para este Trabalho	32
2.3 O Contexto Atual da Pesquisa	33

3	Agentes Atuando na Proteção de Sistemas Elétricos de Potência	41
3.1	O Sistema Elétrico Analisado	42
3.1.1	O <i>software</i> ATP	43
3.1.2	Equivalente das Fontes	45
3.1.3	Modelagem da Linha de Transmissão	46
3.1.4	Transformadores de Corrente e de Potencial	50
3.1.5	Filtro Digital Passa-Baixa Butterworth	51
3.1.6	Digitalização dos Sinais de Tensão e Corrente	51
3.2	Geração das Curvas de Proteção Adaptativa	52
3.2.1	Condições Operacionais Consideradas	53
3.2.2	Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados - SGBD	54
3.3	Características Construtivas do SMA	56
3.3.1	JADE	56
3.3.2	Algoritmo de Cooperação Utilizado	57
3.3.3	Agentes Implementados	58
3.3.4	Protocolos de Comunicação e Troca de Mensagens (Interação)	60
4	Resultados dos Testes: Viabilidade Prática e Validação do SMA Implementado	65
4.1	Viabilidade Prática	66
4.1.1	Cenários e Tráfegos Aplicados	67
4.1.2	Medição Temporal da Atualização das CPAs	69
4.2	Validação do SMA Implementado	74
4.2.1	Sensibilidade	74
4.2.2	Confiabilidade	76
4.2.3	Redefinição da Zona de Proteção Primária da CPA	77
5	Conclusões	79
A	Código dos Agentes Implementados Utilizando o Framework JADE	81
A.1	Agente Servidor	81
A.2	Agente Sensor	84
A.3	Agente Executor	85
B	Código do Arquivo TCL Utilizado na Aferição dos Tempos de Atuali-	

zação das CPAs	89
Referências Bibliográficas	101

Dedicatória

*À minha esposa, Nadja, por sempre me apoiar,
em plena gravidez, nos momentos mais difíceis,
dedicando a mim paciência e auxílio incondicional.
Ao meu filho, João Pedro, que ainda está para nascer, por
me proporcionar uma alegria incalculável apenas por existir.*

Agradecimentos

A Deus inicialmente, por permitir e auxiliar a conclusão deste trabalho, além dos auxílios e consolações dedicadas a mim, incondicionalmente, em momentos difíceis de minha vida.

Aos meus pais, Valmir e Elizabete, por sempre acreditarem e investirem em mim. Aos meus irmãos, Wendell, Savina e Iago, por sempre terem contribuído, cada um à sua maneira, para o meu crescimento. À minha avó, Expedita, e tios que sempre me apoiaram em todos os momentos e decisões de minha vida. À todos os meus familiares por sempre terem acreditado em mim, nunca deixando de me incentivar nos momentos mais difíceis.

À minha família, Nadja e João Pedro, por serem as razões que me mantiveram de pé em momentos difíceis, por serem minhas alegrias, fornecendo forças para a realização deste trabalho.

Em especial ao Profº Dr. Mário Oleskovicz, primeiramente pela oportunidade a mim oferecida, pelo apoio e confiança depositada, pelos inestimáveis conselhos, pela amizade e por sua impecável orientação no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Profº Titular Denis Vinicius Coury, pela amizade, atenção, prontidão e acessibilidade, pelos auxílios e conselhos imprecindíveis ao desenvolvimento deste trabalho.

Ao Raphael Philipe Mendes, pela amizade, auxílios fornecidos e pela parceria no desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos Piauienses, que em momentos de trabalho ou descontração, nunca deixaram de me apoiar, fornecendo amizades raras de serem encontradas.

Ao Helson Mineiro pela amizade, por seus conselhos, pela ajuda nesta etapa final e pelo apoio demonstrado desde o início deste trabalho.

A todos os meus amigos e amigas que tive a honra de conhecer neste período, em especial aos integrantes do LSEE, pela ajuda em momentos difíceis, assim como pelos momentos de descontração e alegria.

Aos funcionários da USP, em especial aos lotados no departamento de engenharia elétrica, pela prontidão oferecida e por suas amizades.

À CAPES, pela bolsa de mestrado e pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa.

À FAPESP pelo apoio financeiro concedido para a realização deste trabalho.

*“in principio erat Verbum et Verbum
erat apud Deum et Deus erat Verbum”
São Paulo*

Resumo

Silva, B.C. Utilização de um Sistema Multi-Agentes em Redes de Comunicação para a Proteção Digital de Distância Adaptativa 2009. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

Esta pesquisa apresenta a implementação de um sistema de proteção digital de distância adaptativo dispondo de um sistema multi-agentes (SMA). Tal SMA trabalhará de forma distribuída, possuindo entidades especialistas (Agentes) inseridas em locais específicos e agindo de forma eficiente na solução de problemas locais. Espera-se pela aplicação deste SMA, atribuir aos relés de distância características desejáveis e difíceis de serem alcançadas pelas técnicas convencionais. Dentre as deficiências observadas nos sistemas de proteção convencionais, tem-se a não sensibilidade à dinâmica dos sistemas elétricos de potência em função das alterações nas condições operacionais. Logo, tem-se então a necessidade de um sistema de proteção mais flexível, seletivo e eficaz para assegurar a confiabilidade e a continuidade no suprimento da energia elétrica. Para desenvolver tal proposição, foram realizadas diversas e distintas simulações computacionais dispondo do *software* ATP (*Alternative Transients Program*) para a geração das prováveis curvas de operação adaptativa. Estas, quando inseridas em um banco de dados, serão representativas das esperadas alterações nas condições operacionais de um sistema elétrico em específico. Para a implementação e validação desta abordagem, diversos testes foram realizados, tendo como finalidade a comparação desta abordagem dispondo de SMA com a filosofia tradicional de proteção de distância. Os resultados obtidos são promissores e demonstram o alto grau de precisão e confiabilidade do método proposto.

Palavras–Chave: Sistema de Proteção Digital de Distância Adaptativo, Sistema Multi-Agentes, Agentes, Curvas de Operação Adaptativas

Abstract

Silva, B.C. Using a Multi-Agent System in Communication Networks for an Adaptive Digital Distance Protection System. 2009. 130p. Master Thesis. Engineering School of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2009.

This research presents the development of an adaptive digital distance protection system by a multi-agent system (MAS). This MAS will work in a distributed way, with expert entities (agents) inserted in specific places and acting efficiently in the solution of local problems. With the application of the MAS, the distance relays will have desirable characteristics, which are difficult to be reached by conventional techniques. Among the deficiencies observed in conventional protection systems, there is the insensitivity to the dynamics of the electrical power system due to changes in operating conditions. So, there is the necessity of a protection system which is more flexible, selective and efficient to assure reliability and continuity in the electricity supply. To improve these characteristics, several computational simulations were done using Alternative Transients Program (ATP) to generate the desirable adaptive operation curves. These curves, when inserted into a database, will represent the expected changes in the operating conditions of an electrical system. For the implementation and validation of this approach, several tests were done with the purpose of comparison of this approach (using MAS) to the traditional philosophy of distance protection. The results obtained are promising and demonstrate a highly satisfactory degree of accuracy and reliability of the proposed method.

Keywords: *Adaptive digital distance protection system, Multi-Agents system, Agents, Adaptive operation curves.*

Lista de Figuras

FIGURA 2.1	Região de abertura para uma determinada condição de operação de um sistema representada pela curva de proteção adaptativa e/ou pela curva de proteção tradicional.	7
FIGURA 2.2	Sistema de transmissão simulado dispondo do <i>software</i> ATP. . .	9
FIGURA 2.3	Curvas de abertura/operação em função da variação da tensão nos barramentos do sistema simulado.	10
FIGURA 2.4	Curvas de abertura/operação em função da variação do ângulo de transferência de potência entre as fontes do sistema simulado.	11
FIGURA 2.5	Curvas de abertura/operação em função da variação da capacidade das fontes do sistema simulado.	12
FIGURA 2.6	Representação de um agente básico utilizado neste trabalho. . . .	16
FIGURA 2.7	Ilustração das possíveis iterações que um agente pode realizar em um ambiente multi-agentes.	21
FIGURA 2.8	Etapas para a solução de problemas distribuídos.	25
FIGURA 2.9	Etapas da execução do protocolo RC.	28
FIGURA 2.10	Estrutura do protocolo quadro negro.	29
FIGURA 2.11	Decomposição espacial dispondo de quatro agentes.	31
FIGURA 2.12	Taxonomia da coordenação.	32
FIGURA 3.1	Sistema elétrico analisado.	42

FIGURA 3.2	Silhueta da torre da linha de transmissão utilizada para os estudos.	47
FIGURA 3.3	Representação de um trecho da linha por parâmetros distribuídos.	48
FIGURA 3.4	Representação da transposição de uma linha de transmissão qual- quer.	48
FIGURA 3.5	Rotina <i>Line Constants</i> utilizada para a obtenção dos parâmetros do sistema em análise.	49
FIGURA 3.6	Tabelas modeladas e implementadas utilizando o <i>SGBD mysql</i> .	55
FIGURA 3.7	Modelo entidade relacionamento utilizado neste trabalho	56
FIGURA 3.8	Decomposição espacial dispendo de três classes de agentes.	58
FIGURA 3.9	Sistema Multi-Agentes aplicado ao sistema de transmissão simu- lado.	59
FIGURA 3.10	Fluxograma relativo ao funcionamento do protocolo de interação utilizado.	62
FIGURA 4.1	Estudo de caso utilizado nas simulações de tráfego muito conges- tionado	68

Lista de Tabelas

TABELA 3.1	Valores dos parâmetros obtidos a partir da execução da rotina <i>Line Constants</i> do ATP.	50
TABELA 3.2	Intervalo de variação dos valores das grandezas observáveis nas barras dos geradores.	53
TABELA 4.1	Tempos de atualização do SMA sobre diversos cenários sem ano- malias.	71
TABELA 4.2	Tempos de atualização do SMA mediante a perda de um pacote contendo os valores atualizados das condições operacionais.	72
TABELA 4.3	Tempos de atualização do SMA mediante a perda de um pacote contendo a representação numérica da CPA.	72
TABELA 4.4	Tempos de atualização do SMA após a perda de pacotes de pe- dido de reenvio	73
TABELA 4.5	Sensibilidade das filosofias em estudo	75
TABELA 4.6	Confiabilidade das filosofias em estudo	76

Lista de Abreviaturas e Siglas

SMA Sistema Multi-Agentes

ATP *Alternative Transients Program*

SEP Sistema Elétrico de Potência

PDDA Proteção Digital de Distância Adaptativa

JADE *Java Agent DEvelopment Framework*

OPGW *Optical Ground Wire*

PA Proteção Adaptativa

SP Sistema de Proteção

CPQ Curva de Proteção Quadrilateral

CPA Curva de Proteção Adaptativa

IA Inteligência Artificial

IAD Inteligência Artificial Distribuída

RC Rede de Contrato

NS *Network Simulator*

GPS *Global Positioning System*

NS2 Network Simulator 2

RTI *Real Time Infrastructure*

RTMAP *Real Time Mobile Agent Plataform*

FIPA *Foundation for Intelligent Physical Agents*

ACL *Agent Communication Language*

EMTP *ElectroMagnetic Transient Program*

BPA *Bonneville Power Administration*

UBC *University of British Columbia*

LEC *Leuven EMTP Center*

CIGRÉ *Conseil International des Grands Réseaux Électriques*

IEEE *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

CESP *Companhia Elétrica de São Paulo*

CC *Corrente Contínua*

TC *Transformador de Corrente*

TP *Transformador de Potencial*

TPC *Transformador de Potencial Capacitivo*

CAD *Conversor Analógico/Digital*

AAF *Aplicador Automático de Falta*

TDF *Transformada Discreta de Fourier*

SGBD *Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados*

MER *Modelo Entidade Relacionamento*

CSELT *Telecom Italia*

LGPL *Library Gnu Public Licence*

SO Sistema Operacional

LT Linha de Transmissão

REALNS *REAL Network Simulator*

DARPA *Defense Advanced Research Projects Agency*

VINT *Virtual InterNetwork Testbed*

LBNL *Lawrence Berkeley National Laboratory*

PARC *Palo Alto Research Center*

UCB *University of California, Berkeley*

USC *University of Southern California*

ISI *Information Sciences Institute*

SAMAN *Simulation Augmented by Measurement and Analysis for Networks*

NSF *National Science Foundation*

CONSER *Collaborative Simulation for Education and Research*

LSEE Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica

Lista de Símbolos

G1 gerador 1

G2 gerador 2

Rg1 resistência equivalente do gerador 1

Rg2 resistência equivalente do gerador 2

Lg1 indutância equivalente do gerador 1

Lg2 indutância equivalente do gerador 2

R1 relé associado 1

R2 relé associado 2

Rf resistência de falta

Δx pequena porção da linha de transmissão

R Δx resistência associada a uma pequena porção da linha de transmissão

L Δx indutância associada a uma pequena porção da linha de transmissão

C Δx capacitância associada a uma pequena porção da linha de transmissão

e erro máximo obtido durante o processo de quantização

q intervalo entre dois níveis de quantização

V amplitude de representação do sinal durante o processo de quantização

Capítulo 1

Introdução

Os sistemas elétricos de potência (SEP) estão constantemente expostos a várias adversidades, as quais levam à necessidade de soluções que garantam uma adequada eficiência do sistema de proteção como um todo.

Em relação à proteção de distância, usualmente aplicadas às linhas de transmissão, Yang et al. (2006) afirmam que, atualmente, a detecção de situações de faltas está mais complexa de ser realizada, e, em consequência, constata-se certa dificuldade também em garantir um adequado funcionamento do sistema.

Pelo que é observado, um dos principais problemas relativos aos erros dos sistemas de proteção de distância está relacionado, muitas das vezes, ao método utilizado para o processamento das grandezas envolvidas quando da ocorrência de uma alteração na condição de operação do sistema. Normalmente, o procedimento padrão se baseia em uma representação estimada da condição estática de operação do sistema elétrico. Esta possui como indesejável característica a estaticidade temporal, ou seja, a característica se mostra imutável no decorrer do tempo. Dentre os grandes problemas no tocante a esta estaticidade, pode-se citar a não abertura em situações de falta e/ou aberturas indevidas dos disjuntores em situação contrária, além da impossibilidade de cobertura integral da linha de transmissão, em função do dinamismo operacional do sistema elétrico de potência que está sob proteção. Referente a esta última situação, como motivo principal, encontram-se os erros por sub ou sobre alcance. Estes erros são ocasionados pelo dinamismo e configuração do sistema elétrico, que podem acarretar em uma má representação da impedância

aparente, grandeza esta, elementar na proteção de distância. Visto que, do incorreto valor da impedância aparente, não há garantia quanto ao correto diagnóstico referente a qual zona de proteção a falta está inserida.

Como prática, para se sobrepor a este problema, normalmente se adota uma redução do alcance da atuação instantânea do sistema de proteção em questão. Esta redução garante que a situação de *trip*, ou de abertura instantânea do disjuntor, ocorra exclusivamente quando da ocorrência de uma falta incidente na linha de transmissão protegida, impossibilitando, ou ao menos dificultando, sua abertura pela ocorrência de uma falta sobre as adjacências do sistema protegido.

De uma maneira geral, pode-se então apontar que no tocante às aberturas indevidas, ou às não aberturas em situação de falta, os erros decorrentes da estaticidade da característica de abertura (operação) do relé são consideráveis e merecedores de uma atenção maior. Como apresentado, tais erros são ocasionados pela inadequada cobertura da região no plano complexo que representa a impedância observada frente as situações de faltas para uma determinada condição de operação do sistema.

No intuito de solucionar estes problemas foi proposta a proteção digital de distância adaptativa. Esta filosofia tem como foco a inserção da adaptabilidade ao sistema de proteção, a qual adequará a característica de abertura (operação) do relé de acordo com as condições de operação do sistema elétrico. Esta filosofia é defendida nos estudos apresentados neste documento, o qual mostra que uma variação na forma da característica de abertura do relé, para uma mesma condição de operação, alterando-se apenas um único parâmetro (o que ameniza o grau de variação), é bastante acentuada.

Neste trabalho, as condições de operação do sistema elétrico serão representadas por três grandezas inerentes ao mesmo, particularmente às linhas de transmissão. Tais grandezas observáveis são:

- as capacidades das fontes equivalentes do sistema;
- a tensão nos barramentos das fontes e
- o ângulo de transferência entre as mesmas.

Não é difícil prever que frente a simples combinação dentre as três variáveis representativas das condições de operação do sistema elétrico, inúmeras curvas desejáveis de operação podem ser formuladas.

No entanto, para uma adequada aplicação conceitual da proteção digital de distância adaptativa (PDDA), deve-se dispor de meios que garantam uma eficaz atualização das curvas de proteção adaptativas a serem disponibilizadas e consideradas pelos relés associados. Cabe adiantar que nesta pesquisa, como método de atualização das curvas de proteção adaptativas, fez-se uso dos Agentes de *software*, os quais compõe um Sistema Multi-Agentes (SMA). Esta escolha teve como princípio norteador a própria definição de Agentes como entidades autônomas e persistentes, a qual se encaixa nos principais aspectos do problema a ser solucionado.

Neste contexto, esta pesquisa apresenta a implementação de um sistema de PDDA dispondo de um SMA. Tal SMA trabalhará de forma distribuída, possuindo entidades especialistas (Agentes) inseridas em locais específicos e agindo de forma eficiente na solução de problemas locais. Para desenvolver tal proposição, foram realizadas diversas e distintas simulações computacionais dispondo do *software* ATP (*Alternative Transients Program*) para a geração das prováveis curvas de operação adaptativa. Estas, quando inseridas em um banco de dados, serão representativas das esperadas alterações nas condições operacionais de um sistema elétrico em específico. Para a implementação e validação desta abordagem, diversos testes foram realizados, tendo como finalidade a comparação desta abordagem dispondo de SMA com a filosofia tradicional de proteção de distância.

1.1 Participações em Congressos Decorrentes desta Pesquisa

Como consequência da realização e aceitação deste trabalho, artigos completos foram ou estão em vias de publicação em congressos nacionais.

A referência (Silva et al., 2008a) compreende um estudo da proteção digital de distância adaptativa utilizando um sistema multi-agentes em uma rede *intranet*, sendo o

mesmo apresentado no IX Seminário Técnico de Proteção e Controle (STPC), no ano de 2008. Na mesma linha de resultados, em (Silva et al., 2008b), encontra-se a utilização de um sistema multi-agentes em redes de comunicação para a proteção digital de distância adaptativa. Este trabalho foi apresentado no XVII Congresso Brasileiro de Automática (CBA), também em 2008.

Além destas duas participações, uma futura fonte para consulta serão os anais do XI SEPOPE - Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, a ser realizado em março de 2009.

1.2 Disposição Geral deste Documento

A disposição deste documento apresenta neste Capítulo 1 uma breve introdução sobre o problema abordado, e no que segue, uma apresentação das participações em congressos decorrentes desta pesquisa.

O Capítulo 2, inicialmente, comentará sobre a proteção digital de distância adaptativa, a qual deverá ser provida via SMA. Posteriormente será abordado toda a teoria de relevância utilizada para a construção do SMA proposto, além da apresentação dos conceitos utilizados neste documento. Por fim, será apresentada uma seção sobre o estado da arte no contexto aqui abordado.

O Capítulo 3 apresenta uma descrição detalhada do sistema elétrico analisado junto às considerações adotadas para caracterizar situações representativas de interesse sobre o sistema elétrico em estudo. Em seguida são apresentadas as características construtivas do sistema multi-agente aplicado.

Os resultados obtidos relativos aos testes de viabilidade prática e validação da proposta deste trabalho são apresentados no Capítulo 4, sendo as conclusões pertinentes apresentadas no Capítulo 5.

Por fim, nos apêndices A e B são apresentados os códigos dos Agentes implementados utilizando o *framework* JADE e o código utilizado pelo *network simulator 2*, respectivamente.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Recentemente, diversos trabalhos propuseram a aplicação de Agentes para a proteção de sistemas elétricos de potência. Devido às características intrínsecas destas entidades, como autonomia, comunicação, mobilidade, percepção, ação, compromisso e opinião, além da possibilidade de inserção de características inteligentes como raciocínio e aprendizagem, esta técnica é vista como uma ferramenta em potencial a ser aplicada em diversas funções de controle e proteção.

Tais aplicações estão sendo possíveis em função da digitalização de subestações e da utilização dos cabos OPGW (*Optical Ground Wire*), que permitem a troca de informações, possibilitando um gerenciamento remoto do sistema elétrico de potência, reduzindo o tempo de extinção de faltas através da aplicação de técnicas mais robustas, além de possibilitar uma melhor localização, dentre outras aplicações.

Sendo assim, por este panorama, cria-se um ambiente adequado para inserção de Sistemas Multi-Agentes (SMA) aplicados à Sistemas Elétricos de Potência (SEP). Neste sentido, as seções que seguem abordam o conteúdo teórico utilizado para o desenvolvimento deste trabalho. Inicialmente serão apresentados fundamentos da filosofia da Proteção Digital de Distância Adaptativa (PDDA), a qual deverá ser provida via SMA. Posteriormente será abordado toda a teoria de relevância utilizada para a construção do SMA proposto. Por fim, será apresentada uma seção sobre o estado da arte no contexto aqui delineado.

2.1 A Proteção Digital de Distância Adaptativa - PDDA

A Proteção Adaptativa (PA) é uma filosofia que busca realizar ajustes dinamicamente no Sistema de Proteção (SP), permitindo um adequado desempenho deste, mesmo diante das condições variáveis de operação do SEP.

O principal argumento desta filosofia é a possibilidade de alteração dos parâmetros do SP, visando adequar a característica de tomada de decisão, tendo como base as alterações das condições de operação do SEP. Estas alterações são decorrentes, normalmente, dos chaveamentos sobre a rede, da dinâmica das cargas ou das situações de faltas incidentes sobre o SEP. Tais alterações podem ser observadas e representadas quando das mudanças no ângulo de transferência de potência, na capacidade das fontes e na tensão nos barramentos.

Devido à possibilidade de adaptação, a PA é vista como uma técnica em potencial a ser aplicada em diversas frentes, desde a realização de modificações nas topologias da rede, até as alterações operativas e/ou filosóficas da proteção para diversos equipamentos e elementos do SEP.

Na presente pesquisa propõe-se o uso da PA ao nível da transmissão, onde sobre as linhas constituintes do sistema pretende-se caracterizar uma adequada e pertinente PDDA.

2.1.1 A Curva de Proteção Quadrilateral Tradicional e a Curva de Proteção Adaptativa

Pelas observações práticas e com o intuito de incorporar várias e possíveis imprecisões, torna-se necessário definir uma região de operação e/ou não operação no plano complexo R-X (Resistência - Reatância), com uma área substancial que envolva as características da linha de transmissão a ser protegida (Couroy et al., 2007). Em certas aplicações, faz-se uso da característica quadrilateral devido à possibilidade de implementação em relés numéricos ou digitais comercialmente disponíveis. Uma Curva de Proteção Quadrilateral (CPQ) tradicional pode ser constituída por quatro sub-curvas tomadas de maneira a

representar, de um modo geral, as características operacionais do sistema (Figura 2.1).

Figura 2.1: Região de abertura para uma determinada condição de operação de um sistema representada pela curva de proteção adaptativa e/ou pela curva de proteção tradicional.

Contudo, a organização atual na qual o SEP se encontra, e sobre a qual as filosofias de proteção são definidas, ainda possui uma característica estática (pré-definida). Sobre esta configuração, muita das vezes, decorrente de uma correta e condizente parametrização do SP, consegue-se atender parte das situações as quais os SEPs estão sujeitos. Porém, vale alertar que esta configuração não provê um mecanismo eficaz frente às situações dinâmicas, as quais os SEPs estão constantemente expostos. Cabe colocar que da aplicação de uma CPQ, a qual possui uma característica fixa, que não venha a corretamente representar o dinamismo do sistema elétrico, situações indesejáveis e desastrosas podem vir a ocorrer, prejudicando o SEP como um todo. Dentre estas situações, tem-se a possibilidade de situações normais e esperadas de operação serem tratadas como uma ocorrência de falta, ou, por outro lado e de uma forma mais perigosa para o sistema, ocorrer situações de falta, as quais o sistema de proteção pode vir a caracterizar como uma condição normal de operação.

Vale colocar que muitos destes erros são provenientes da incapacidade do SP adaptar-se frente às alterações nas condições de operação do sistema elétrico, sendo assim necessária uma solução eficaz e capaz de suportar alterações no comportamento do sistema, imprimindo ao mesmo uma característica adaptativa. Tal método deve garantir uma atuação

eficaz do sistema de proteção ou ao menos reduzir a ocorrência destes possíveis erros na operação dos sistemas de proteção de distância.

Como alternativa, esta pesquisa propõe o uso da PDDA, tendo como meta a atualização da curva de proteção observada pelo relé digital associado. Espera-se pelo uso da PDDA um adequado desempenho e adaptação do SP, pois a cada alteração registrada nas condições de operação do SEP, a curva de operação do relé poderá ser adaptada à nova situação, mantendo o nível de confiabilidade exigido para a proteção. Esta atualização visa manter no relé uma curva de proteção que melhor represente o sistema frente à atual situação em que se encontra. Neste trabalho, a curva de proteção observada pelo relé será denominada Curva de Proteção Adaptativa (CPA).

Pelo contexto apresentado, justifica-se então o emprego da PDDA devido à dinâmica do sistema, alertando para a necessidade de uma parametrização e ajustes nos relés de forma *on-line*, de maneira a possibilitar um melhor nível de confiabilidade.

Uma representação de uma CPA é ilustrada na Figura 2.1. Esta é moldada pela composição de cada sub-curva a partir do cálculo da impedância aparente para diferentes variações na localização e resistência de falta, representadas sobre o plano R-X. Estas variações seguem a seguinte especificação (Coury et al., 2007):

- Curva I: corresponde a faltas francas em diferentes localizações da linha.
- Curva II: corresponde a faltas localizadas a 95% da linha, variando-se os valores de resistência de falta.
- Curva III: corresponde a faltas em diferentes localizações da linha com impedância de falta de $200\ \Omega$ (alta impedância).
- Curva IV: corresponde a faltas próximas ao relé, variando-se os valores de resistência de falta.

Como salientado, para a PDDA, o principal elemento no processo lógico é a definição da curva de abertura (operação) do relé digital associado, aqui caracterizada pela CPA. Dentre as possíveis variações no SEP, as diretamente associadas às alterações na forma

da curva de abertura do relé, têm-se as mudanças no ângulo de transferência de potência, a capacidade das fontes e a tensão nos barramentos.

Para ilustrar os efeitos da variação destes parâmetros no SEP, apresentam-se as Figuras 2.3, 2.4 e 2.5.

Na Figura 2.3, tomada sobre condições operativas simuladas sobre o sistema da Figura 2.2 (o qual será posteriormente apresentado), notam-se cinco curvas resultantes de variações distintas no valor da tensão nos barramentos (O e P), mantendo constante o ângulo de transferência de potência e a capacidade das fontes.

A Figura 2.4 é tomada sobre as mesmas condições da Figura 2.3. Contudo, por esta, têm-se cinco curvas resultantes de variações distintas no valor do ângulo de transferência de potência, mantendo constante a tensão nos barramentos (O e P) e a capacidade das fontes.

Na Figura 2.5, obtida nos moldes das ilustrações anteriores, notam-se três curvas resultantes de variações distintas no valor da capacidade das fontes, mantendo-se constantes o ângulo de transferência de potência e a tensão nos barramentos (O e P).

Figura 2.2: Sistema de transmissão simulado dispendo do *software* ATP.

Torna-se evidente pelas Figuras 2.3, 2.4 e 2.5 a influência de um único parâmetro na constituição estrutural da curva de abertura/operação. Enfatiza-se que em sistemas práticos, não apenas um, mas todos os parâmetros, ou uma composição destes, passam por variações. Sendo assim, as curvas representativas das atuais condições do sistema devem refletir tais alterações.

Figura 2.3: Curvas de abertura/operaco em funo da variao da tenso nos barramentos do sistema simulado.

2.2 Sistemas Multi-Agentes

Conforme apresentado por Weiss (1999), os Sistemas Multi-Agentes (SMAs) so apenas uma generalizao da tecnologia de Agentes. Sendo assim, deve-se realizar uma explorao detalhada sobre as caractersticas inerentes aos Agentes para, posteriormente, explorar as caractersticas de um SMA.

Geralmente, em ambientes fsicos ou lgicos, h a possibilidade da existncia de mltiplos agentes, dependentes ou no entre si, para o cumprimento de uma meta individual ou coletiva. De acordo com Weiss (1999), embora existam situaes onde um agente possa operar de uma forma til isoladamente, devido grande expanso das redes de computadores e sua possvel interconexo entre diversos dispositivos, esta situao cada vez mais inslita, sendo mais usual a aplicao de SMAs.

Desta maneira, para uma eficaz operacionalidade e uma interao produtiva entre as entidades constituintes de um SMA, deve-se fornecer um ambiente adequado provido de uma infra-estrutura computacional baseada em protocolos que venham a privilegiar a comunicao e interao desejadas.

Pelos protocolos de comunicao habilita-se os agentes a trocar e a compreender mensagens provenientes de outros agentes, especificando os tipos de mensagens que podem

ser trocadas entre as entidades.

Já os protocolos de interação, possibilitam a existência de conversações entre os agentes, a qual, neste trabalho, é definida como a troca estruturada de mensagens entre as entidades.

Figura 2.4: Curvas de abertura/operção em função da variação do ângulo de transferência de potência entre as fontes do sistema simulado.

A aplicação adequada dos protocolos de comunicação e interação possibilita a sistematização e automação de tarefas, onde estas podem ter um caráter intelectual. A área do conhecimento atual que trata destas questões, no intuito de caracterizar entidades inteligentes através da representação do comportamento humano e/ou racional, é a Inteligência Artificial (IA).

Para um perfeito entendimento das entidades envolvidas, deve-se então, explorar as particularidades oriundas da aplicação dos agentes, sua influência e colaboração para a IA. Neste sentido, as próximas seções tratarão sobre o papel dos agentes para a IA, além de explorar suas características para, por fim, poder-se tratar das particularidades dos SMAs.

Figura 2.5: Curvas de abertura/operacão em função da variação da capacidade das fontes do sistema simulado.

2.2.1 Inteligência Artificial

A definição de IA é bastante divergente do ponto de vista de diversos estudiosos da rea. Assim, para a definição deste termo, fez-se uma comparação entre as definições expostas por dois dos principais autores neste campo.

Primeiramente, Russell e Norvig (2003) não conceituam este termo diretamente, elucidando seu conteúdo semântico pela definição de outros autores da rea. As definições utilizadas pelos autores são as que seguem:

- Em Haugeland (1985) IA é definida como: “O novo e interessante esforço para fazer os computadores pensarem ...máquinas com mentes, no sentido total e literal.”
- Em Bellman (1978) a mesma é apresentada como: “Automatização de atividades que associamos ao pensamento humano, atividades como a tomada de decisões, a resolução de problemas, o aprendizado ...”
- Em Charniak e McDermott (1985) o termo é definido como: “O estudo das faculdades mentais pelo uso de modelos computacionais.”
- Em Winston (1992)  definida como: “O estudo das computações que tornam possível perceber, raciocinar e agir.”

- Em Kurzweil (1990) é especificado como: “A arte de criar máquinas que executam funções que exigem inteligência quando executadas por pessoas.”
- Em Poole et al. (1997) foi definido que “A inteligência computacional é o estudo do projeto de agentes inteligentes.”

A partir destas definições, Russell e Norvig (2003) resumem quatro categorias distintas.

A primeira categoria é composta pela definição inserida por Haugeland e Bellman, a qual relaciona a IA aos processos de pensamento e raciocínio, sendo seu desempenho medido em termos de fidelidade ao desempenho humano.

A segunda categoria, composta pela definição exposta por Charniak, McDermott e Winston, também relaciona IA a processos de pensamento e raciocínio. Entretanto, esta mede o desempenho de seus sistemas comparando-os a um conceito ideal de inteligência.

A terceira categoria é formada pela exposição feita por Kurzweil, que relaciona IA ao comportamento proveniente do sistema computacional, medindo seu sucesso em termos de fidelidade ao desempenho humano.

Por último, a quarta categoria é constituída pelas elucidações feitas por Poole. Esta categoria relaciona IA ao comportamento humano. Entretanto, a medida de sucesso é realizada pela comparação do resultado de seu sistema com um conceito ideal de inteligência.

Ressalta-se que Russell e Norvig (2003) caracterizam o conceito ideal de inteligência como racionalidade e afirmam que um sistema pode ser considerado racional se faz tudo certo com os dados que tem.

Como fato, a partir do exposto sobre as quatro categorias evidenciadas na literatura, duas abordagens distintas podem ser enfatizadas. A primeira abordagem seria aquela que toma o ser humano como foco, baseando-se em resultados obtidos empiricamente. Uma segunda abordagem toma a racionalidade como foco de estudo, envolvendo a aplicação de métodos numéricos e computacionais para a implementação de sistemas computacionais inteligentes.

Desta maneira, pode-se afirmar que a reflexão sobre o que é IA está relacionada à filosofia adotada, ou seja, à criação de modelos computacionais tomando-se como base o comportamento humano, ou trabalhando a partir de um padrão ideal. Na última referência citada tomou-se esta segunda abordagem como base para o desenvolvimento de sistemas computacionais dotados de IA. Mais especificamente, foi adotado que a inteligência está relacionada à capacidade de tomada de decisão de forma racional. Assim, em um caso ideal, um sistema computacional dotado de inteligência toma a melhor decisão possível frente a uma situação de prova. Esta afirmação nos remete ao que foi definido anteriormente como um sistema racional.

Por outro lado, Weiss (1999) caracteriza inteligência como o uso, por parte dos agentes, de certas características/habilidades que os possibilitam otimizar sua medida de desempenho, sendo assim, caracterizado um comportamento inteligente. Tais características incluem a resolução de problemas, planejamento de ações, tomada de decisão e aprendizado. A qualificação de inteligente indica que o agente busca seus objetivos e executa suas tarefas para otimizar uma medida de desempenho.

Vale colocar que classificar um agente como inteligente não significa dizer que este é onisciente ou onipotente, ou que nunca irá falhar. Esta indicação induz a um comportamento flexível e racional em diversas situações ambientais a partir de suas percepções.

Devido à indefinição do termo, Weiss (1999) ressalta que as características anteriormente citadas são apenas um agrupamento de comportamentos e habilidades, geralmente encontradas em trabalhos na literatura que por ventura qualificam seus agentes de inteligentes.

2.2.2 Agentes Inteligentes

A seção anterior caracterizou um sistema dotado de inteligência sobre o ponto de vista de alguns autores. Para esta pesquisa, o termo “sistema” aplicado anteriormente, o qual é detentor de inteligência, será sinônimo do termo “Agente”.

Para uma adequada construção de agentes inteligentes é necessária a implementação de um pequeno conjunto de princípios de projeto (Russell e Norvig, 2003). Estes princípios

permitem que sistemas operem em um ambiente de forma a obter sucesso em sua execução, além de caracterizar uma metodologia de desenvolvimento. Tais princípios são: função e programa de agente, medida de desempenho, racionalidade e aprendizado.

Entretanto, para dar início à exposição e caracterização dos princípios relacionados à qualificação de um agente como sendo inteligente, deve-se inicialmente realizar uma elucidação sobre o conceito de agente.

Para tal, fez-se um levantamento bibliográfico sobre a definição deste termo. Assim, seguem algumas das definições encontradas na literatura correlata sobre o que é um “Agente”.

Em Maes (1995), “agentes autônomos são sistemas computacionais que habitam algum ambiente complexo e dinâmico, percebem e atuam de forma autônoma neste ambiente para realizar um conjunto de metas ou tarefas para as quais eles foram projetados.”

Em Smith et al. (1994) foi definido agente “como uma entidade de *software* persistente, dedicada a um propósito específico.”

Por Hayes-Roth (1995), “agentes inteligentes executam três funções continuamente: percebem condições dinâmicas no ambiente; atuam para afetar as condições no ambiente; e raciocinam para interpretar percepções, resolver problemas, abstrair inferências e determinar ações.”

Em Wooldridge e Jennings (1995), agente é “um hardware ou (mais usualmente) sistema computacional de *software* que apresenta as seguintes propriedades:

- Autonomia: agentes operam sem a intervenção direta de humanos ou outros agentes, e têm algum tipo de controle de suas ações e estado interno;
- Habilidade social: agentes interagem com outros agentes (possivelmente humanos) via algum tipo de linguagem de comunicação;
- Reatividade: agentes percebem seu ambiente e respondem a mudanças que ocorrem neste ambiente;
- Pró-atividade: agentes não agem simplesmente em resposta ao seu ambiente, eles são capazes de apresentar um comportamento direcionado a metas tomando iniciativa.”

Em Brustoloni (1991), “agentes autônomos são sistemas capazes de realizar ações intencionais de forma autônomas no mundo real.”

Em Russell e Norvig (2003) “um agente é tudo o que pode ser considerado capaz de perceber seu ambiente por meio de sensores e de agir sobre esse ambiente por intermédio de atuadores.”

Em Weiss (1999) “um agente é um sistema computacional que está situado em um ambiente, e que é capaz de realizar ações autônomas neste ambiente para satisfazer seus objetivos.”

Em Woolridge e Wooldridge (2002) “um agente é um sistema computacional que é capaz de realizar ações, de forma independente, em nome de seu usuário ou proprietário. Em outras palavras, um agente pode descobrir por si mesmo o que tem que fazer, a fim de alcançar seus objetivos, em vez de receber orientações em um dado momento.”

Como se pode observar, existe uma grande divergência entre a definição do que é um agente. Entretanto, algumas características comuns aparecem na maioria das definições supracitadas. Dentre estas características cita-se a autonomia, a percepção e atuação sobre o ambiente no qual o agente esta inserido. Com base nestas características, para este trabalho, a definição de agente será a de uma entidade de *software* autônoma, que percebe alterações em seu ambiente por meio de seus sensores e atua neste através de seus atuadores, visando alcançar seus objetivos e metas. Uma representação do agente a ser utilizado neste documento é apresentada na Figura 2.6.

Figura 2.6: Representação de um agente básico utilizado neste trabalho.

Contudo, vale comentar que uma destas características, a autonomia, também não é bem definida pela literatura. Este fato torna a definição de agente ainda mais divergente

entre os especialistas da área, tornando sua acepção necessária de generalização.

Segundo Russell e Norvig (2003), para um agente ser considerado autônomo, “ele deve aprender o que puder para compensar um conhecimento prévio parcial ou incorreto”. Ou seja, se este agente se baseia no conhecimento inserido previamente por seu projetista e não em suas próprias percepções, diz-se que o agente não tem autonomia. Na prática, segundo o mesmo autor, dificilmente é exigida autonomia plena desde o início, sendo “aconselhável” ao agente com pouca experiência agir ao acaso, a não ser, que o projetista tenha dado a ele algum subsídio. Transcorrendo a aquisição de experiência suficiente sobre seu ambiente, o agente pode ter seu comportamento caracterizado como independente de seu prévio conhecimento. Com isso, a incorporação do aprendizado possibilita o projeto e implementação de um agente que terá sucesso em uma ampla variedade de ambientes. Esta incorporação, caracteriza um agente bem-sucedido, maximizando sua medida de desempenho, podendo ser assim chamado efetivamente de agente inteligente.

Para Weiss (1999), um agente ter autonomia significa que este é capaz de controlar seu comportamento, podendo agir sem a intervenção de seres humanos ou outros agentes. No entanto, devido a sua iteratividade, um agente pode ter seu comportamento afetado por outros agentes ou seres humanos.

Para Woolridge e Wooldridge (2002), assumir que um agente é autônomo é assumir que ele é capaz de tomar decisões, independente de outras entidades, para satisfazer seus objetivos.

Para o propósito desta linha de pesquisa, um agente autônomo será definido como sendo um agente apto a tomar decisões no intuito de controlar seu comportamento, para assim, alcançar seus objetivos sem a intervenção direta de outras entidades.

Critérios de construção de agentes inteligentes

Agora que uma definição adequada de agente foi dada, deve-se descrever cada critério de projeto especificado por Russell e Norvig (2003). Este conjunto de diretrizes foi escolhido devido à falta de informações concisas na literatura, não sendo possível especificar claramente os componentes de um agente inteligente.

Função de agente

Inicialmente, deve-se delinear o que significa a função de agente. Esta é especificada como sendo uma função que mapeia toda e qualquer percepção por parte do agente em uma ação apropriada, sendo considerada uma caracterização externa do agente. Dentre as possíveis abordagens de mapeamento tem-se a tabulação. Este mapeamento pode ser facilmente alcançado em ambientes que possuem poucas entradas perceptivas, o que não ocorre na maioria dos ambientes. Esta abordagem conduz à construção de um agente mal-sucedido quando aplicada a ambientes cuja dimensionalidade das percepções é alta, onde sua aplicabilidade se dá apenas através da delimitação das variáveis do ambiente. Para ambientes mais complexos deve-se prover uma função de agente mais adequada. Com isso, afirma-se a necessidade de construção de metodologias que consigam representar o comportamento do agente de um modo mais eficiente.

Programa de agente

O programa de agente é a implementação da função de agente, sendo considerado a caracterização interna deste. Vale ressaltar que se deve ter uma clara distinção entre a função de agente (representação abstrata do agente) e o programa de agente (implementação da função de agente).

Medida de desempenho

Uma medida de desempenho se faz necessária para medir o sucesso do comportamento do agente atuando em seu ambiente. Sua implementação caracteriza o grau de habilidade do agente no cumprimento de sua função e sua adaptação ao ambiente ao qual está inserido, mensurando sua capacidade de alcançar seu objetivo adequadamente. Deve ficar claro que não existe uma medida de desempenho global que seja adequada a todos os agentes, sua definição depende fortemente de sua função e de seu ambiente. Para a construção de uma medida de desempenho adequada, deve-se projetá-la de acordo com o resultado desejado no ambiente e não de acordo com o comportamento esperado do agente. Esta assertiva informa que a medida de desempenho deve levar em consideração o estado esperado do ambiente pela atuação do agente e não o estado interno do agente quando aplicado ao ambiente.

Racionalidade

Dentre os princípios para a construção de agentes inteligentes, a racionalidade é verdadeiramente o primeiro deles a definir um caminho conciso e natural para a construção do que é um agente inteligente, sendo talvez o mais importante deles, pois a racionalidade é um pré-requisito para a construção de um agente bem-sucedido.

Segundo Russell e Norvig (2003) a definição do que é racional em um dado instante é composta por quatro fatores, conduzindo a uma especificação de um agente racional. Tais fatores são como os que seguem:

- o desempenho, que define o critério de sucesso;
- o conhecimento, que reflete o histórico anterior que o agente tem do ambiente;
- as ações, que caracterizam o que o agente pode executar e
- a seqüência de percepções do agente até o momento.

Aprendizado

O aprendizado inserido como uma característica de um agente, o transforma em um agente inteligente desde que este possibilite sua adaptação a novas condições operacionais, caso haja alguma mudança em seu ambiente (Russell e Norvig, 2003; Weiss, 1999).

Russell e Norvig (2003) informam que o aprendizado em agentes inteligentes pode ser resumido como um processo de alterações de cada componente do agente, a fim de levar estes componentes a um ajuste mais fino de acordo com as informações de realimentação disponível, melhorando assim o desempenho global do agente.

Em resumo, a composição destes princípios levaria à criação de agentes dotados de inteligência. Entretanto, como já comentado, a realização desta ação não é o único modo de prover inteligência a uma entidade. Diversos autores especificam e classificam seus agentes como inteligentes baseados em teorias que tentam conceber sistemas que possuam um comportamento similar ao de um ser humano, ou então, sistemas que possuam um comportamento adequado para uma determinada aplicação. Conforme observado em Russell e Norvig (2003) as duas abordagens vêm sendo vastamente utilizadas.

2.2.3 Sistemas Multi-Agentes

Agora que as definições dos principais componentes constituintes de um SMA foram explanadas, tem-se no momento, a base conceitual necessária para a caracterização do mesmo, elucidando suas principais características comportamentais para a realização de uma eficaz coordenação, seja ela por cooperação ou competição.

Segundo Weiss (1999), a inteligência artificial distribuída (IAD) é o estudo, construção e aplicação de SMAs, no qual vários agentes inteligentes interagem no sentido de alcançar um conjunto de metas executando certas tarefas. Seu objetivo é desenvolver mecanismos e métodos que não só habilitam a interação entre agentes, mas também fornecem a capacidade de entendimento do funcionamento de uma interação entre estes.

Das aplicações, tem-se que os SMAs podem diferir na natureza de seus indivíduos, métodos de interação e ambientes. Isto implica que um SMA não é necessariamente um sistema homogêneo, possuindo indivíduos com diferentes funções, métodos de observação do ambiente e, possivelmente, modos díspares de afetar o ambiente.

Além da distinção entre os agentes que constituem um SMA, os métodos de interação entre estes podem variar. Neste contexto, pode ocorrer uma situação onde um agente em específico precise de uma determinada informação e este não consiga interagir com o agente detentor da mesma. Como solução, este Agente deve requerer um mediador para que este obtenha a informação desejada em seu nome.

Por último, tem-se a possibilidade de construção de um SMA que possua os membros de sua sociedade inseridos em ambientes diversos, sendo talvez impossível a “sobrevivência” de cada agente no ambiente pertencente ao outro. A chave para a interação de um SMA é a coordenação orientada a metas e/ou tarefas, em situações cooperativas ou competitivas.

Uma representação de um SMA pode ser vista na Figura 2.7. Esta figura apresenta um ambiente contendo quatro agentes, onde cada um se encontra em estado de competição e cooperação com outros agentes. Este fato elucida o comportamento flexível do agente, onde este, visando alcançar seus objetivos, pode realizar iterações competitivas e cooperativas simultaneamente.

Dentre as vantagens alcançadas pelo uso de um SMA, Weiss (1999) ressalta o papel

Figura 2.7: Ilustração das possíveis iterações que um agente pode realizar em um ambiente multi-agentes.

chave em diversas soluções encontradas no campo da ciência da computação, além da facilidade proporcionada, como ferramenta, para o desenvolvimento e análise de modelos e teorias sobre a iteratividade em sociedades humanas.

O foco da aplicação de um SMA, geralmente, está relacionado à resolução de problemas, planejamento, busca, tomada de decisão e aprendizado, permitindo um comportamento flexível e racional, para a realização destas tarefas em ambientes multi-agentes. Para tal, deve-se prover um mecanismo onde os agentes possam interagir de forma eficiente e síncrona para alcançar seus objetivos, ou seja, deve-se garantir que o SMA tenha um nível aceitável de coordenação.

2.2.4 Coordenação

O propósito da coordenação é alcançar ou evitar estados que possam ser considerados desejáveis ou indesejáveis por um ou vários agentes, respectivamente. Em ambientes com recursos limitados, agentes devem coordenar suas atividades entre si para alcançar

um objetivo particular ou satisfazer metas globais. Para coordenar metas e tarefas, os agentes pertencentes a um SMA têm que, explicitamente, informar as dependências entre as atividades a serem coordenadas. Assim, para cada tarefa a ser executada, o agente deve informar o que é necessário para realizá-la.

Geralmente, em ambientes complexos ou cujos dados e informações se encontram distribuídas, cada agente passa a ter apenas uma representação parcial deste ambiente. A interação entre estas entidades se torna uma característica crucial no desenvolvimento de um adequado e eficaz SMA aplicado à solução de um determinado problema. Através desta interação, há a possibilidade de saber o estado de alguma variável ou informação localizada em uma região diferente à do agente. Estas iterações podem ocorrer indiretamente pela observação das mudanças ocorridas no ambiente no qual os agentes estão inseridos, ou diretamente, pelo compartilhamento de uma linguagem de comunicação em comum, possibilitando a troca de informação. A forma de interação normalmente adotada é a direta devido à sua clareza de desenvolvimento. A forma indireta, normalmente, é utilizada em ambientes onde cada agente atua de forma independente, e talvez, não possuam conhecimento da existência de outro agente no mesmo ambiente.

Para a implementação de uma interação direta, Russell e Norvig (2003) ressaltam a necessidade de decisão sobre a consideração de um agente como um agente de fato ou apenas como um objeto do ambiente que possui comportamento estocástico.

Neste sentido, para uma correta determinação do que, em seu ambiente, deve ser considerado um agente no projeto de construção de um agente racional, deve-se verificar se o comportamento desta entidade considerada “agente” influenciará diretamente no comportamento do agente a ser construído.

Este fato leva a duas abordagens. A primeira abordagem pode ser exemplificada tomando-se um ambiente ocupado por dois agentes: *A* e *B*. Neste contexto, um bom desempenho do agente *A* acarretará em um bom desempenho do agente *B*, e vice-versa. Esta abordagem nos remete ao conceito de cooperação. A segunda abordagem ocorre quando o bom desempenho do agente *A* é indesejável para o bom comportamento do agente *B*, nos levando à ocorrência de uma competição. Com isso, têm-se apenas duas abordagens, oriundas da coordenação, a serem consideradas no projeto de construção de

SMAs: a cooperação e a competição. Uma representação de uma possível cooperação entre agentes que estão competindo com outros agentes, e vice-versa, pode ser visualizada na Figura 2.7.

Vale ressaltar, que para este trabalho, a coordenação será alcançada apenas pela implementação de uma interação direta.

2.2.5 Cooperação

A cooperação é uma abordagem bastante utilizada na resolução de problemas de grande complexidade. Nesta, vários agentes trabalham juntos, compartilhando conhecimento e habilidades, para a resolução de problemas em comum. Nestes sistemas, os agentes se comportam como um “time” para resolver problemas de um modo rápido e eficaz, sendo sua maior incidência em problemas que podem ser muito onerosos ou impossíveis de serem resolvidos por um agente atuando isoladamente (Weiss, 1999). Ressalta-se que em sua aplicação, o sucesso alcançado é gozado por todos os indivíduos, assim como o será, quando da obtenção de resultados insatisfatórios.

Para a execução de uma eficiente cooperação, os agentes envolvidos devem seguir um padrão de atividades previamente concordado, evitando o que Woolridge e Wooldridge (2002) definem como uma difícil relação de coordenação - “*Handling hard coordination relationships*”. Uma difícil relação de coordenação ocorre no caso de alguma ação de um agente interferir ou evitar que uma determinada tarefa seja realizada com sucesso, sendo aconselhável, na sua ocorrência, a reorganização das tarefas atribuídas aos agentes.

Como solução para a determinação de um padrão de atividades a ser seguido, Russell e Norvig (2003) sugerem a criação de um plano conjunto, que determine uma ação a cada agente envolvido. Um plano conjunto é considerado uma solução se as ações reservadas a cada agente, após sua execução, resultarem no objetivo desejado. Deste modo, há possibilidade de se construir uma tabela contendo todos os possíveis planos conjuntos para o ambiente em questão e assim, escolher aquele que seja mais adequado para a execução. Os mesmos autores constatarem que esta estratégia tem um desempenho adequado quando aplicada a ambientes com poucas ações a serem tomadas e que possuam poucos agentes.

Em um ambiente com razoável quantidade de ações a serem tomadas e que possua alguns agentes, sua aplicação se torna indesejável devido ao grande tamanho da tabela gerada. Como exemplo, em um ambiente onde 20 ações podem ser tomadas e há a existência de 10 agentes, obtém-se uma tabela com 20^{10} entradas. Este exemplo nos reporta ao caso já mencionado da tabulação como mecanismo de representação da função de agente.

Algoritmos de cooperação

Uma estratégia básica, utilizada por muitos dos protocolos de cooperação, é a decomposição do problema principal em subproblemas e sua posterior distribuição entre as entidades pertencentes ao SMA. Por ser baseado na técnica “dividir para conquistar”, sua aplicação reduz a complexidade dos problemas a serem resolvidos, necessitando de agentes menos complexos.

Em suma, esta estratégia decompõe o problema a ser resolvido em subproblemas, e estes em outros subproblemas, e assim por diante, até se obter apenas unidades atômicas do problema principal, para posteriormente distribuir os subproblemas oriundos deste processo às entidades que são suficientemente capazes de resolvê-las. Esta abordagem nos leva à construção de agentes simples e capazes de realizar ações pontuais. Desta maneira, um agente passa a ser capaz, com o auxílio de outras entidades e por meio da cooperação, de resolver um problema cuja solução excede a suas capacidades. Esta facilidade tem um preço a ser pago pelo projetista do SMA e a mesma pode ser dispendiosa já que o processo de decomposição deve levar em consideração a capacidades de cada agente. Em alguns casos, para o gerenciamento destas atividades, há a necessidade da criação de algoritmos que realizem esta tarefa.

Em Woolridge e Wooldridge (2002), é esclarecido o processo de solução de problemas de forma distribuída, sendo o mesmo dividido em três etapas. Uma visualização destas três etapas pode ser observada na Figura 2.8.

As mesmas podem ser enumeradas como segue:

1. Processo de decomposição: etapa que trata apenas de como se dará a decomposição

Figura 2.8: Etapas para a solução de problemas distribuídos.

do problema e sua posterior distribuição.

2. Solução dos subproblemas: esta etapa aborda a solução dos subproblemas em sua última instância, ou seja, a solução das partes atômicas do problema. Nesta etapa, os agentes podem trocar informações de modo a interagir para resolver seus subproblemas.
3. Síntese das soluções: esta etapa versa sobre o processo de síntese das soluções encontradas pela etapa anterior. Assim, as soluções para os problemas individuais se integram formando ao final a solução para o problema geral.

Com base nestas etapas supracitadas, um algoritmo de cooperação pode ser projetado e implementado de modo a assegurar uma eficiente aplicação. Entretanto, deve-se salientar a necessidade de se evitar a redundância de recursos reservados à solução de uma única tarefa.

Geralmente, quando um agente quer garantir que uma tarefa seja cumprida, ele ordena que mais de um agente capaz de resolver este problema realize-a, sendo que, quando da ocorrência deste fato, há um desperdício de recursos. Em aplicações onde há poucos

recursos, esta situação se torna extremamente indesejável. Assim, há a necessidade de criação de algoritmos que garantam o cumprimento de todas as tarefas, gerenciando com uma maior sapiência os recursos do sistema. Deste modo, diversas alternativas foram propostas na literatura, sendo algumas comentadas por Weiss (1999). Dentre elas encontra-se a “Rede de Contrato”, o “Quadro-Negro” e a “Decomposição Espacial”.

Rede de Contrato

A rede de contrato (RC) é um protocolo de alto nível para alcançar uma eficiente cooperação através do compartilhamento de tarefas. Ela foi modelada de acordo com os mecanismos utilizados por empresas contratantes de bens e serviços. Neste método, os agentes passam a ser divididos em dois grupos:

- Gerente: agente que deseja que uma determinada tarefa seja realizada.
- Contratante: agente que se dispõe a cumprir a tarefa.

Segundo Weiss (1999), agentes dispendo deste protocolo devem ser implementados segundo duas diferentes perspectivas: a perspectiva do gerente e a perspectiva do contratante. Isto por que um agente pode atuar como um gerente realizando anúncios de tarefas a serem realizadas ou pode atuar como um contratante se candidatando à realização de uma tarefa, ou ambos. Neste último caso, por exemplo, um agente pode atuar como um contratante, candidatando-se a uma tarefa, e caso seja escolhido, ele pode atuar como um gerente, anunciando subtarefas.

Da perspectiva do gerente, o agente deve ser capaz de:

- Anunciar uma tarefa que necessita que seja executada.
- Receber e avaliar ofertas para o cumprimento desta tarefa oriundas de outros agentes que se acham capazes de cumpri-la.
- Escolher um contratante dentre os candidatos.
- Receber os resultados.

Da perspectiva do contratante, o agente deve ser capaz de:

- Receber anúncios de tarefas.
- Avaliar sua própria capacidade em resolver a tarefa anunciada.
- Responder se candidatando ou não à tarefa.
- Executar a tarefa caso seja aceito sua oferta.
- Retornar com os resultados encontrados.

Como exemplo, toma-se o agente **A** que deve realizar a tarefa **J**. Esta tarefa é essencial para o mesmo alcançar seu objetivo. Contudo, esta é uma situação impossível de ser atingida devido à sua falta de capacidade. Entretanto, o agente **A** dispõe do protocolo RC. Assim, ele pode anunciar a tarefa **J** aos demais agentes e aguardar alguma resposta. Feito isto, um agente **B** e um agente **C**, capazes de realizar a tarefa **J** recebem o anúncio e se colocam a disposição do agente **A** para realizar o solicitado. Para tanto, os agentes **B** e **C** enviam uma mensagem para o agente **A** informando suas capacidades para a solução/cumprimento da tarefa **J**. O agente **A** analisa e escolhe aquele agente que possui uma maior capacidade. Sendo o agente **C** escolhido, o agente **A** informa aos demais agentes, neste caso **B**, quem foi o escolhido, dispensando seus serviços. Agora **C**, o agente escolhido, toma para si a tarefa **J** e inicia sua execução. Ao final, o agente **C** retorna o resultado ao agente **A**, que pode agora, dar continuidade à sua própria execução.

Devido à sua simplicidade, este protocolo tem sido vastamente estudado e implementado. Para uma melhor compreensão do algoritmo, uma ilustração é apresentada na Figura 2.9.

Quadro negro

Segundo Woolridge e Wooldridge (2002), o protocolo quadro negro é caracterizado por dois principais atributos. Um conjunto de agentes, onde cada qual possui algum conhecimento especializado, e uma estrutura de dados compartilhada conhecida como quadro negro.

Neste protocolo, os agentes são capazes de escrever e ler o quadro negro. Sendo assim, cada agente o lê, verificando as dependências para o sistema atingir o objetivo, escrevendo nesta estrutura caso tenha alguma informação que auxilie na solução do problema. Uma

Figura 2.9: Etapas da execução do protocolo RC.

visualização deste protocolo é apresentada na Figura 2.10. Nesta, todos os agentes ficam observando o conteúdo do quadro negro, esperando um momento oportuno de contribuir com seu conhecimento.

Em uma implementação do protocolo quadro negro clássico, a estrutura de dados que forma o quadro funciona como um meio centralizado de comunicação, já que os agentes são capazes apenas de ler e escrever neste quadro. Quando de sua criação, era esperado que este protocolo fosse implementado em um sistema paralelo, pois vários agentes estavam trabalhando juntos para alcançar um mesmo objetivo. Entretanto, a base da arquitetura do quadro negro é o compartilhamento de uma estrutura de dados, onde cada agente pode acessá-la apenas se nenhum outro agente estiver acessando-a.

Em Weiss, são apresentadas algumas características necessárias para uma adequada construção deste protocolo, que seguem como encontrado:

- Independência de capacidade: os agentes não são treinados para trabalhar apenas com um único grupo de outros agentes. Nesta acepção, cada agente possui uma

Figura 2.10: Estrutura do protocolo quadro negro.

capacidade específica que poderá contribuir, em algum momento, para a solução do problema, não importando quantos outros agentes estão presentes e quais são as suas habilidades.

- Diversidade de técnicas para solucionar o problema: cada agente, possui uma implementação do mecanismo de inferência e representação de seu estado interno. Estas informações ficam protegidas por cada agente, não sendo possível acessá-las diretamente.
- Representação flexível das informações contidas no quadro negro: o protocolo quadro negro não impõe qualquer restrição sobre o que pode ser escrito.
- Linguagem de interação comum: agentes dispendo deste protocolo devem ser capazes de se compreender. Ou seja, a linguagem utilizada por todos os agentes deve ser a mesma, evitando que o sistema como um todo entre em colapso.
- Ativação por eventos: os agentes são ativados quando há alguma alteração na informação contida no quadro negro. Isto ocorre quando há o acréscimo de uma nova informação, uma alteração na informação previamente contida, ou a renovação da informação, sendo estas situações perceptíveis a todos os agentes. Isto ocorre para evitar que todos os agentes fiquem constantemente acessando o conteúdo do quadro negro.

- Necessidade de controle: em sua aplicação, deve existir alguma entidade externa que gerencie as informações inseridas no quadro negro, podendo neste caso ser chamado de entidade de controle. Esta entidade pode ser vista como um especialista, visando caminhar no sentido da solução para o problema. Sua responsabilidade está na avaliação da qualidade das informações enviadas pelos agentes. Cada agente quando cogita realizar uma contribuição, primeiramente, avalia a qualidade e importância de sua própria contribuição para em seguida enviá-la para a entidade de controle. Esta por sua vez, avalia a qualidade da contribuição enviada e o custo associado.
- Geração de soluções incrementais: durante o processo de contribuição, os agentes podem sugerir algumas alterações quando forem convenientes. Estas alterações podem redefinir ou ir de encontro à linha de raciocínio que está sendo seguida, ou podem iniciar uma nova linha de raciocínio.

Com estas características, pode-se prover uma implementação do protocolo quadro negro que atenda aos principais requisitos em uma implementação prática.

Decomposição espacial

Este protocolo de cooperação é extremamente simples. De acordo com Weiss (1999), a decomposição espacial se baseia na alocação de agentes de acordo com suas funcionalidades, pontos de decisão ou na forma das fontes de informação, alocando-os de acordo com suas capacidades/habilidades. Depois de realizada a decomposição, introduz-se os agentes em seus respectivos locais já reservados. A coordenação se faz pelo uso da comunicação entre as entidades. Uma melhor representação pode ser visualizada na Figura 2.11. Por esta, observa-se que o ambiente foi previamente dividido e posteriormente preenchido por agentes segundo suas capacidades/habilidades.

2.2.6 Competição

Em Weiss (1999), competição é descrita como um ambiente povoado por agentes que buscam obter aquilo que apenas um pode possuir. Nestes ambientes, cada agente busca maximizar sua medida de desempenho em detrimento da medida de desempenho dos outros agentes. Assim, o sucesso de um agente implica na falha dos demais. Na competição,

Figura 2.11: Decomposição espacial dispondo de quatro agentes.

os agentes constituintes de um SMA trabalham isoladamente para alcançar seus objetivos. Entretanto, quando um agente tenta maximizar sua medida de desempenho, estará inerentemente reduzindo a medida de desempenho dos demais agentes. Este fato caracteriza um ambiente multi-agente competitivo. Russell e Norvig (2003) definem algumas características que um agente, em um ambiente competitivo, deve possuir:

- Reconhecer a existência de outras entidades dividindo um mesmo ambiente.
- Tentar prever possíveis ações por parte dos outros agentes.
- Procurar visualizar a influência das ações tomadas pelos outros agentes nas suas próprias ações.
- Escolher uma ação a ser tomada, com base nos primeiros tópicos.

Com isso, consegue-se implementar agentes que disputem entre si, visando à otimização de suas medidas de desempenho.

Na visão de alguns autores ((Weiss, 1999), (Woolridge e Wooldridge, 2002)), a implementação da competição se dá por meio da negociação. No sentido estrito da palavra, a negociação é o ato de chegar a um ponto comum, por meio de um acordo, onde este seja “bom” para os lados da negociação. Isto nos remete a um ambiente competitivo, onde

cada agente busca otimizar sua medida de desempenho. Entretanto, em uma negociação, os agentes devem chegar a um acordo. Weiss (1999) define em poucas palavras o que deve ser considerado. Para ele, cooperação é a coordenação entre agentes não antagonistas e, negociação, é a coordenação entre agentes competitivos ou interessados unicamente em seu bom desempenho. Ressalta-se que estes últimos, agentes de auto-interesse, também são caracterizados, em certas situações, como agentes competitivos. Este fato é explicado pela característica intrínseca deste agente, pois como este está “preocupado” apenas em aumentar sua medida de desempenho, em algum momento poderia estar competindo por algum recurso, ignorando o fato que se ele obter tal recurso, outro agente terá sua medida de desempenho reduzida. Dispondo destas considerações, a coordenação pode ser expressa de uma maneira mais completa de acordo com o apresentado na Figura 2.12.

Figura 2.12: Taxonomia da coordenação.

2.2.7 Considerações para este Trabalho

A partir dos conceitos elucidados até o momento, deve-se então esclarecer quais destes foram utilizados para a construção efetiva do SMA. Inicialmente, vale relembrar que o conceito de agente, para este trabalho, é o de uma entidade de *software* autônoma, que percebe alterações em seu ambiente por meio de seus sensores e atua neste através de seus atuadores, visando alcançar seus objetivos e metas. Autonomia foi definida como sendo o ato de tomar decisões no intuito de controlar seu comportamento sem a intervenção direta

de outras entidades. Isto garante ao SMA completo domínio sobre suas ações, levando em consideração apenas as informações que lhe forem ditas úteis. Como mecanismo de coordenação foi escolhida a cooperação já que há apenas um único objetivo a ser alcançado, não sendo esperado a disputa por nenhum recurso ou funcionalidade. Como algoritmo de cooperação utilizou-se a decomposição espacial devido às características do problema a ser solucionado e sua simplicidade de implementação. Um maior detalhamento sobre os aspectos construtivos do SMA implementado é apresentado na seção 3.8.

2.3 O Contexto Atual da Pesquisa

Destaca-se inicialmente, referindo-se a aplicação de Agentes à sistemas de proteção, o trabalho de Yanxia et al. (2002) que aborda um estudo sobre a proteção de distância adaptativa utilizando a tecnologia multi-agente. Para tal, é desenvolvido um sistema de proteção cooperativo, baseado na tecnologia multi-agente em diversas camadas, utilizando uma arquitetura distribuída. Esta abordagem permite a coleta de dados localmente ou de forma distribuída, através da interação de um agente com outros dispositivos e/ou outros agentes, permitindo a cooperação entre vários equipamentos, viabilizando uma função de proteção adaptativa de forma automática e inteligente. O sistema de proteção cooperativo proposto tem a habilidade de perceber um escopo mais global do sistema e pode atuar em resposta às alterações sobre um ambiente não local através da troca de informações entre agentes. Segundo os autores, pela arquitetura proposta, devem ser observados os seguintes pontos:

- os métodos adaptativos inteligentes permitem que os dispositivos de proteção se adaptem às alterações nas condições do sistema;
- cada agente deve possuir somente uma visão local do sistema e
- a cooperação entre os agentes permite uma utilização flexível de todo o recurso de *hardware* por qualquer equipamento.

Além destas informações, evidenciam-se certas simulações para demonstrar o método proposto, ilustrando que o sistema de proteção cooperativo é capaz de melhorar o desem-

penho do sistema de proteção como um todo.

Coury et al. (2002) propõem a utilização de agentes sobre relés diferenciais dispondo de uma rede de comunicação do tipo *intranet*. Os agentes propostos neste trabalho são processos de *softwares* capazes de procurar por informações em redes, interagir com partes de equipamentos e executar tarefas em favor de seus proprietários (relés), além de serem detentores de autonomia e capacidade de cooperação. Entretanto, são ressaltadas algumas considerações adicionais de segurança relativas ao uso de agentes para tal propósito, como: definição do mecanismo de adição de agentes e atualização de parâmetros de configuração, meio pelo qual uma plataforma computacional ou um agente autentica mensagens de entrada, e de aplicações de restrição de recursos ao agente, como ciclos computacionais escassos, além da necessidade de sincronização dos dados enviados.

Os autores ressaltam que para avaliar o emprego de agentes e de uma rede de comunicação em proteção de sistemas elétricos de potência, deve-se conhecer os requisitos de latência e confiabilidade dos relés, determinando a viabilidade do uso de uma rede de comunicação. Para tanto, simularam uma rede de comunicação em diferentes cenários, dispondo do *software* NS (*Network Simulator*), buscando obter uma melhor representação do tipo de tráfego de dados que é necessário para atender os requisitos de latência e confiabilidade dos relés. Para solucionar o problema de sincronização, o trabalho abordado fez uso de GPS (*Global Positioning System*).

O método proposto foi baseado nos componentes modais de corrente e tensão. Outra novidade deste método, é o envio do fasor de corrente, em lugar dos valores amostrados, a uma frequência de 480Hz. Para realização dos testes, foram simulados relés diferenciais utilizando o *software* PSCAD/EMTDC, onde foram definidos três novos componentes refletindo os cenários simulados pelo NS. Subconjuntos representativos das condições do tráfego foram utilizados nestes componentes, informando quais pacotes eram perdidos durante a transmissão e quais eram efetivamente recebidos e utilizados pelo agente.

Os resultados evidenciam a impossibilidade de utilização de uma rede cujo tráfego e modo de operação se assemelhe à *Internet*, devido à falta de qualidade do serviço, necessária para aplicações de controle. Dentre as vantagens, são ressaltadas a detecção de falha de equipamentos, transferência de *trip* através da rede de comunicação e capacidade

de coleta de dados. Os autores também observam que uma rede de comunicação, do tipo *intranet*, dedicada com uma adequada largura de banda pode suprir os requisitos de confiabilidade e latência necessários a tal aplicação.

Em Hopkinson et al. (2003), os autores apresentam o desenvolvimento de uma plataforma de simulação denominada EPOCHS, a partir da junção de simuladores de transitórios eletromagnéticos, de um simulador de redes de comunicação e um ambiente unificado de agentes.

O diferencial desta plataforma é a possibilidade de troca de mensagens entre os diversos equipamentos constituintes de um sistema elétrico de potência. A motivação para a implementação desta característica se deve ao grande aumento na utilização de redes de comunicação por parte dos sistemas elétricos de potência, evidenciando a necessidade de construção de uma ferramenta que permita uma coerente simulação, mesclando um ambiente do sistema elétrico com um ambiente de comunicação. Neste sentido, torna-se necessário a construção de mecanismos adequados que englobem estas características para uma correta representação do comportamento do sistema elétrico analisado.

Para a construção do EPOCHS, foram selecionados simuladores considerados os melhores de cada área: PSCAD/EMTDC, PSFL e NS2 (*Network Simulator 2*). A junção destes simuladores é realizada utilizando uma infra-estrutura em tempo real (*Real Time Infrastructure - RTI*), responsável pelo sincronismo e roteamento das mensagens. A plataforma EPOCHS possibilita a leitura e escrita das variáveis da simulação através do AgentHQ. O AgentHQ é um módulo que proporciona um ambiente unificado para agentes, atuando como um *proxy* quando os agentes interagem com outros componentes do EPOCHS.

No intuito de verificar a aplicabilidade da plataforma desenvolvida, os autores realizaram um estudo de caso sobre a instabilidade do sistema elétrico de potência quando da perda de sincronização da geração. Os resultados mostram que a plataforma foi capaz de manter o sistema elétrico de potência estável, além de manter sua frequência acima de um limiar predefinido por meio de uma rápida rejeição de geração.

Em Giovanini et al. (2006) é apresentado a utilização de um sistema baseado em agentes para coordenação da proteção primária e de retaguarda utilizando a plataforma

EPOCHS. Agentes são usados para dar a cada componente de proteção capacidade de controle, além da habilidade de comunicação, permitindo a busca por informações relevantes junto a outros agentes. Estas informações podem ser utilizadas para detecção de faltas em zona primária ou em situação remota, falhas de relés e disjuntores, dentre outras. Nesta implementação, os agentes são responsáveis pela proteção de linhas de transmissão, recebendo informações de tensão e corrente dos dispositivos inteligentes locais ou remotos.

Nesta linha de pesquisa, foram definidos três tipos de agentes: agente primário, agente de retaguarda (*backup*) e agente de carga (*load*), onde os dois primeiros seguem a filosofia diferencial. Em cada passo de tempo definido pela plataforma EPOCHS, o valor do fasor de corrente local é obtido e enviado a cada agente pertencente à sua zona de proteção. Uma vez recebidos os fasores de corrente referentes à sua zona de proteção, o agente responsável calcula a corrente diferencial e decide sobre a existência da falta.

Para comprovação da eficiência desta abordagem, um estudo de caso foi simulado e dividido em duas categorias contemplando o desempenho da rede de comunicação e do sistema de proteção. Para a verificação do desempenho da rede de comunicação foram simuladas diversas situações de tráfego e perdas de *links* de comunicação. Por estas, ficou evidenciada a capacidade de tolerância à falhas quando da perda de alguns *links* de comunicação, e da impossibilidade de comunicação, quando da inexistência dos mesmos. Nesta última situação, o sistema de proteção deve alternar para o sistema de proteção primária *standalone*. Este fato enfatiza que a capacidade do *link* de comunicação pode ter um grande impacto na operação do sistema elétrico. Para a verificação do desempenho do sistema de proteção foram realizados quatro distintos testes, verificando a eficácia da proteção primária, a tolerância a falhas pela perda de *links* de comunicação, pela falha do agente responsável pela proteção primária e pela falha dos disjuntores associados.

Os resultados destes testes mostraram que o sistema de proteção utilizando desta abordagem consegue se sobrepôr com eficiência a estes distúrbios, sendo mais rápido e confiável que quando comparado às alternativas tradicionais.

Tomita et al. (1998) propõe o conceito de “agentes relés” para implementar um sistema de proteção cooperativo, consistindo na combinação de equipamentos distribuídos e uma rede de comunicação, permitindo a realização de funções de proteção adaptativas. No

modelo proposto, alguns agentes relés permanecem em um único lugar e coletam informações locais do sistema elétrico, enquanto outros agentes relés habilitam uma cooperação entre diferentes equipamentos, movendo-se entre estes e podendo fazer uso de dados e funções distribuídas sobre o sistema elétrico de potência. A cooperação dos agentes relés foi simulada para as funções de proteção primária, proteção secundária e funções de proteção adaptativas. Os resultados das simulações mostram que esta abordagem permite ao sistema de proteção manter uma mínima zona isolada mediante quaisquer mudanças nas condições do sistema de potência, além de assegurar uma alta confiabilidade com menos hardware redundante.

Shono et al. (2002) apresentam um método para a realização de operações remotas e aplicações de monitoramento do sistema elétrico de potência pelo emprego da tecnologia de agentes sobre a *Internet*. Os autores aplicaram a tecnologia de agentes móveis no desenvolvimento de um sistema de proteção e controle. Foi proposta uma plataforma de agentes móveis em tempo real (*Real Time Mobile Agent Platform* - RTMAP) para o provimento de funções mais eficazes na sincronização entre entidades e fornecimento de redundância. Estas funções são necessárias para se sobrepor às possíveis falhas nos *links* de comunicação, possibilitando a realização de operações em tempo real e mantendo a confiabilidade necessária para um eficaz funcionamento do sistema de proteção e controle. A plataforma proposta possui ainda funções de controle das prioridades, recuperação de faltas, controle de compartilhamento de dados e monitoramento comportamental dos agentes. A aplicação de agentes neste processo se mostrou útil para a automatização de tarefas como a configuração de equipamentos, coleta de dados em diversos equipamentos separados geograficamente, dentre outras aplicações. Outra vantagem exposta é a viabilidade de inserção de novas funcionalidades pela simples alteração no modo de execução dos agentes já inseridos. Sua aplicação se mostrou adequada ao monitoramento e execução de operações em tempo real.

Em Yang et al. (2006), os autores propõem um sistema de proteção controlado por agentes como uma alternativa ao sistema convencional. Isto é motivado pela baixa capacidade de cooperação entre os relés de proteção, capacidade reduzida na troca de informações em tempo real, além da dificuldade e demora na atualização das funções lógicas (de conhecimento) dos relés. Conforme colocado, afirma-se que a detecção de situações de

falta em linhas de transmissão está mais difícil de ser realizada devido ao incremento na complexidade nestas infra-estruturas, acarretando em um aumento no tempo de eliminação das mesmas sobre o sistema elétrico. Observando este fato, juntamente com o grande número de ocorrências de faltas em linhas de transmissão, conclui-se que a prerrogativa de proteção sobre o isolamento da menor parte do sistema sob falta não pode ser garantida. Focados neste ponto, os autores introduzem uma nova abordagem, denotando um sistema de proteção controlado por agentes.

Os agentes foram inseridos na infra-estrutura do sistema de proteção e utilizando como meio de comunicação uma rede IP. Por meio da coordenação entre as entidades, pontos de faltas puderam ser detectados. Conforme colocado, esta informação é trocada rapidamente entre os agentes para tomar as devidas ações. Para a implementação dos agentes, dispôs-se da plataforma JADE (*Java Agent DEvelopment Framework*). Os agentes foram distribuídos de acordo com suas habilidades na realização de determinadas tarefas. Esta aplicação possui ainda um repositório ontológico que serve como uma base de conhecimento do sistema, provendo um fundamento semântico para a comunicação entre as entidades. O repositório ontológico provê um serviço de banco de dados dinâmico, sendo gerenciado por um agente. Sua implementação se fez pelo uso da plataforma Jena (Jena, 2009).

Dentre as vantagens relatadas pela utilização da proposta apresentada, ressalta-se o aumento na coordenação do sistema, redução no tempo de atuação da proteção de retaguarda e um aperfeiçoamento na operação. Como mecanismos de comunicação, foram implementados duas abordagens. Uma utilizando mensagens FIPA ACL (*Foundation for Intelligent Physical Agents - Agent Communication Language*), e outra utilizando agentes móveis.

No intuito de validar a proposta, um estudo de caso foi simulado e observado. Neste, inicialmente se aplicou uma falta entre os dois disjuntores analisados. Com isso, foi encadeado um conjunto de ações (troca de mensagens) utilizando o FIPA ACL com o propósito de isolar a zona do sistema faltoso. Alternativamente, a troca de mensagens foi substituída pelo uso de um agente móvel como meio de troca de informações. Estas abordagens se mostraram eficazes no isolamento da zona faltosa pela atuação da proteção primária.

Para a validação da proteção de retaguarda é simulada a falha de um dos disjuntores. Neste contexto, o agente responsável pelo disjuntor que falhou envia uma mensagem de falha para o agente responsável pelo disjuntor de retaguarda. Esta mensagem informa a falha da proteção primária, exigindo a abertura imediata do disjuntor de retaguarda. Outros testes foram realizados para mensurar o tempo de resposta da proteção de retaguarda dispondo de diversos cenários.

Dos resultados, conclui-se que a utilização da abordagem apresentada neste trabalho (troca de mensagens ou agentes móveis) se mostrou mais veloz em comparação à técnica tradicional. Contudo, os autores colocam que a utilização de agentes móveis traz um retardo para a abertura do disjuntor, causado devido ao *overhead* trazido por sua aplicação.

Do que foi exposto neste segundo capítulo, espera-se ter revisado e repassado os conceitos iniciais e básicos, que serão necessários para formular e melhor explicitar o trabalho desenvolvido que será detalhado nos capítulos que seguem.

Capítulo 3

Agentes Atuando na Proteção de Sistemas Elétricos de Potência

Na prática, o sistema de proteção digital de distância deverá atuar após observar um valor de impedância aparente, que quando sobreposta ao plano R-X, esteja localizada dentro da curva de abertura observada pelo relé. Somando-se a esta idéia, tem-se que a natureza dos SEPs e a filosofia da proteção adaptativa tornam o uso de Agentes de *software* uma alternativa atraente em relação às técnicas de proteção tradicionais. Tal afirmação se baseia na necessidade de atualização da curva de abertura de modo a garantir que, quando da ocorrência de uma falta, a curva observada pelo relé seja a mais adequada para o momento.

Como solução a este problema, este trabalho traz uma proposta dispondo de um sistema multi-agentes (SMA). Esta escolha tem como base a definição de agentes, a qual se encaixa nos principais aspectos do problema a ser solucionado. Assim, fazendo-se uma associação entre cada característica explicitada na definição do que é um agente e as especificidades do problema, consegue-se realizar uma perfeita correlação entre a ferramenta proposta e o problema a ser resolvido. Neste contexto, os tópicos seguintes apresentam o sistema elétrico em análise, ressaltando-se todas as suas características, além ilustrar a geração das curvas de proteção adaptativas (CPAs). Por fim serão apresentadas as características construtivas referentes ao SMA implementado.

3.1 O Sistema Elétrico Analisado

Esta seção tem por objetivo apresentar o sistema elétrico em análise, o qual servirá como base de estudo para a criação das curvas de proteção adaptativas.

Cabe adiantar que este sistema será submetido a diversas e distintas situações de faltas sobre diferentes condições de operação. Para cada condição de operação, será caracterizada uma curva de operação que será moldada em função das impedâncias aparentes decorrentes das diversas situações de faltas aplicadas sobre o sistema. Esta curva de operação será então armazenada em um banco de dados e disponibilizada aos relés associados. Desta maneira, o objetivo principal é o de formular possíveis curvas representativas da operação que o sistema possa vir a enfrentar e disponibilizá-las de uma forma dinâmica e flexível ao sistema de proteção.

A metodologia proposta busca representar o sistema elétrico em análise por um conjunto de linhas de transmissão adjacentes e fontes equivalentes, conforme visualizado na Figura 3.1.

Figura 3.1: Sistema elétrico analisado.

Devido à impossibilidade de realização da pesquisa utilizando-se de dados reais, registrados em campo, fez-se uso de um simulador de transitórios eletromagnéticos, reconhecido mundialmente como ATP (*Alternative Transients Program*) (EEUG, 1987). Sendo assim, esta seção está estruturada de modo a fornecer ao leitor os aspectos básicos necessários para uma correta caracterização de um sistema elétrico dispondo do *software* ATP.

Inicialmente são colocadas algumas considerações sobre o *software* empregado. Posteriormente, os tópicos inerentes ao processo de simulação de um sistema elétrico, tais como, a modelagem da linha de transmissão, os transformadores de corrente e de potencial, a obtenção dos parâmetros do sistema, o filtro passa-baixa, além da digitalização dos sinais

de tensão e corrente, serão abordados.

3.1.1 O *software* ATP

Os sistemas elétricos de potência são planejados para disponibilizar energia com qualidade, confiabilidade e continuidade. No entanto, os SEPs estão constantemente expostos às várias contingências, tais como, descargas atmosféricas e outras intempéries, curtos-circuitos, falhas na operação e dispositivos (geradores, transformadores, cabos, disjuntores, chaves de manobra, barramentos, relés e motores, entre outros). Das consequências, tais contingências podem prejudicar tanto o sistema local, como também os demais sistemas interligados.

Neste contexto, torna-se necessário a execução de um prévio estudo dos possíveis transitórios que podem ocorrer em um sistema elétrico. Este estudo poderá ter o intuito, tanto para a definição de uma adequada especificação e/ou parametrização dos dispositivos de proteção, quanto para se determinar os motivos que ocasionaram uma anomalia comportamental do sistema elétrico (Amon Filho e Pereira, 1996).

Dentre os mecanismos existentes para a realização de tal estudo, os simuladores digitais têm se mostrado uma ferramenta em potencial devido ao aumento no poder de processamento dos computadores atuais. Pela referência anteriormente citada, afirma-se que não existem relevantes limitações no ato de modelar qualquer componente do sistema elétrico em programas digitais. Devido ao seu rápido avanço e aos baixos custos envolvidos, os computadores são vistos, hoje, como a nova tendência no que tange o desenvolvimento dos simuladores de transitórios em SEP.

Um dos simuladores digitais mais utilizados é o EMTP (*ElectroMagnetic Transient Program*) da *Bonneville Power Administration* (BPA). Este foi desenvolvido com base no trabalho de Frey e Althammer, por Herman W. Dommel, na década de 60 em Munique, Alemanha (Amon Filho e Pereira, 1996). Inicialmente, o programa possibilitava a modelagem de circuitos monofásicos, contendo uma chave e uma fonte de excitação, por modelos de indutâncias, capacitâncias, resistências e linhas sem perdas.

Com a ida de Herman W. Dommel para a *University of British Columbia* (UBC),

a coordenação do projeto de desenvolvimento do simulador ficou sob responsabilidade de Scott Meyer. Com isso, deu-se início a um processo de desenvolvimento coordenado, tornando o simulador uma ferramenta muito poderosa.

Após a saída de Scott Meyer da coordenação do projeto na BPA, foi criada uma nova versão do EMTP pelo LEC (*Leuven EMTP Center*) na Bélgica, baseada na versão M39. Esta nova versão é conhecida como ATP. A distribuição do programa ficou centralizada até 1992, momento em que a BPA e Scott Meyer voltaram a trabalhar em conjunto.

Atualmente, o ATP possibilita a utilização de configurações arbitrárias em simulações de transitórios eletromagnéticos em redes polifásicas. Além destas, outras características constituem o grupo de definições passíveis de utilização, tais como não-linearidades, elementos com parâmetros concentrados e distribuídos, diversos tipos de chaves, transformadores e reatores, dentre outros.

Vale frisar que por ser um programa digital, pelo ATP não é possível se obter uma resposta contínua no tempo, sendo assim, caracterizada por valores a intervalos de tempo discretos. Entretanto, este fato não reduz a precisão nos resultados obtidos pelo ATP. Este *software* apresenta precisão suficiente para ser utilizado em diversas categorias de estudos. Conforme pode ser comprovado, realizando-se uma comparação dos resultados obtidos pela utilização do ATP com dados reais, percebe-se uma boa correlação entre os mesmos (Amon Filho e Pereira, 1996).

Contudo, a documentação do *software* ATP consiste basicamente de um manual (ATP *Rule Book*), o qual possui todas as informações sobre os modelos disponíveis. Cabe colocar que a utilização do ATP abrange tanto a área acadêmica quanto empresarial (Souza, 2008). Os resultados apresentados por sua utilização possuem uma elevada aceitação e validação, o que pode ser verificado, por exemplo, por sua grande utilização em trabalhos publicados nos periódicos e anais de eventos do CIGRÉ (*Conseil International des Grands Réseaux Électriques*) e do IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*).

3.1.2 Equivalente das Fontes

Para a modelagem do equivalente das fontes (G1 e G2), Figura 3.1, utilizou-se de elementos R-L com acoplamento entre fases. Os valores dos parâmetros R e L de sequência zero e positiva das fontes são obtidos pelo método a seguir, conforme apresentado por Amon Filho e Pereira (1996).

Segundo os autores, a relação entre as reatâncias de sequência positiva e zero do sistema equivalente (gerador) podem ser definidas como:

$$\frac{X_+}{X_0} = 4,41 \quad (3.1)$$

Já o fator de qualidade, pode ser definido por:

$$Q = \frac{X}{R} = 11,4 \quad (3.2)$$

Sendo assim, a reatância de sequência positiva do gerador pode ser calculada como:

$$X_+ = \frac{V^2}{S_g} \quad (3.3)$$

Onde V é a tensão e S_g é a potência aparente do gerador.

Para a obtenção das indutâncias de sequência positiva e zero, deve-se lembrar que a frequência angular é dada por:

$$\omega = 2 * \pi * f \quad (3.4)$$

Onde f é a frequência da rede e a reatância indutiva é dada por:

$$X_L = \omega L \quad (3.5)$$

Assim, tem-se que a indutância de sequência positiva pode ser obtida por:

$$L_+ = \frac{X_+}{\omega} \quad (3.6)$$

A indutância de sequência zero pode ser obtida de modo análogo.

Da equação 3.2, as resistências de sequência positiva e zero podem ser obtidas a partir dos dados já conhecidos.

Deve-se lembrar que umas das grandezas observáveis, dentre as quais das que sofrem alterações para a geração das CPAs, tem-se a capacidade das fontes. Este valor é utilizado para o cálculo da reatância de sequência positiva do gerador (equação 3.3) a qual influe diretamente nos valores de indutância e resistência de sequência positiva e zero da geração como supracitado.

3.1.3 Modelagem da Linha de Transmissão

O comportamento dos níveis de tensão e corrente em regime permanente e em situações de faltas depende fortemente das características físicas e parâmetros elétricos das linhas de transmissão. Neste trabalho se fez uso da modelagem de uma linha de transmissão de 440kV típica da CESP (Companhia Elétrica de São Paulo). A silhueta da torre de transmissão utilizada é apresentada na Figura 3.2. No que segue, apresentam-se as suas principais características, além da resistividade do solo considerada no estudo. Ressalta-se que os valores a seguir foram considerados para caracterizar as três linhas de transmissão compreendidas entre os barramentos O e P, conforme ilustradas pela Figura 3.1.

Condutor de fase: Cabo Grosbeak

- raio externo do condutor: 12,57 mm;
- raio interno do condutor: 4,635 mm;
- resistência em corrente contínua: 0,08998 Ω /km.

Cabos Pára-raios: OPGW

- raio externo do condutor: 7,15 mm;
- resistência em corrente contínua: 0,3261 Ω/km .

Resistividade do solo

- R_{solo} : 1000 $\Omega.\text{km}$

Flecha a meio vão

- fase: 13,43 m
- pára-raios: 6,4 m

Figura 3.2: Silhueta da torre da linha de transmissão utilizada para os estudos.

Considerações em Relação às Características das Linhas de Transmissão

Para a realização de uma adequada simulação, diversas considerações devem ser tomadas em relação às características das linhas de transmissão, no que diz respeito aos

condutores que formam o circuito trifásico e suas respectivas disposições geométricas, conforme apresentado na Figura 3.2. A consideração da disposição espacial dos parâmetros de uma linha de transmissão como distribuída é, segundo Souza (2008), a melhor representação a ser seguida para simulações de linhas que possuam um grande comprimento. Neste sentido, deve-se abstrair a representação de um Δx em um esquema monofásico do sistema elétrico, composto por valores dos parâmetros de $R\Delta x$, $L\Delta x$, e $C\Delta x$. Os valores de indutância e capacitância são determinados pelos valores de reatância e susceptância obtidos a partir da execução da rotina *Line Constants* do ATP. Uma representação deste esquema é apresentada na Figura 3.3.

Figura 3.3: Representação de um trecho da linha por parâmetros distribuídos.

Outra consideração foi com relação à transposição das linhas de transmissão. Esta decisão se deve pelo fato da transposição realizar uma compensação entre os desequilíbrios dos campos magnéticos entre fases, cabo de cobertura, ferragens e solo sob a linha de transmissão. De acordo com Stevenson Jr (1974), o uso da transposição acarretará em uma indutância média para cada condutor. A transposição de uma linha de transmissão qualquer é ilustrada na Figura 3.4.

Figura 3.4: Representação da transposição de uma linha de transmissão qualquer.

Rotina *Line Constants*

A rotina *Line Constants* trata de um processo auxiliar para o cálculo dos parâmetros das linhas de transmissão em uma determinada frequência. Os resultados obtidos de seu processamento são utilizados na construção do arquivo principal de dados a ser repassado e executado pelo *software* ATP.

BEGIN NEW DATA CASE							
LINE CONSTANTS							
METRIC							
BRANCH	PA	BUSTA	PB	BUSTB	PC	BUSTC	
C Condutores da primeira fase							
1	.316	.0899	4	2.514	-9.67	23.67	10.20
1	.316	.0899	4	2.514	-9.67	24.47	11.04
1	.316	.0899	4	2.514	-8.87	24.47	11.04
1	.316	.0899	4	2.514	-8.87	23.67	10.20

C Condutores da segunda fase							
2	.316	.0899	4	2.514	-0.40	27.27	13.84
2	.316	.0899	4	2.514	-0.40	28.07	14.64
2	.316	.0899	4	2.514	0.40	28.07	14.64
2	.316	.0899	4	2.514	0.40	27.27	13.84
C Condutores da terceira fase							
3	.316	.0899	4	2.514	8.87	23.67	10.20
3	.316	.0899	4	2.514	8.87	24.47	11.04
3	.316	.0899	4	2.514	9.67	24.47	11.04
3	.316	.0899	4	2.514	9.67	23.67	10.20
C Condutores dos cabos pára-raios							
0.5	4.188	4	0.914	-7.51	35.00	28.60	
0.5	4.188	4	0.914	7.51	35.00	28.60	
BLANK card ending conductor cards within "LINE CONSTANTS" data							
1000.	60.00		1	1	0		0
BLANK card ending frequency cards of "LINE CONSTANTS" data							
BLANK card ending "LINE CONSTANTS" data cases							
BLANK card ending all EMTP cases							

Figura 3.5: Rotina *Line Constants* utilizada para a obtenção dos parâmetros do sistema em análise.

Como parâmetros de entrada desta rotina, relativo a cada condutor de cada fase associada ao sistema elétrico, temos: o efeito *skin* ou pelicular, a resistência em corrente contínua (CC), o diâmetro externo, a distância horizontal, a altura vertical, além da resistividade do solo, frequência em que os parâmetros estão sendo calculados, condições da linha (com ou sem transposição) e características dos cabos pára-raios referentes ao

sistema como um todo. Na Figura 3.5 é apresentado o arquivo de entrada da rotina *Line Constants*, o qual descreve a topologia do sistema elétrico em análise.

Dos resultados obtidos pela execução desta rotina, os dados que serão utilizados posteriormente na construção do arquivo principal de simulação do sistema elétrico são: valores de sequência positiva e zero das grandezas referentes às susceptâncias, reatâncias e resistências. Particularmente, as susceptâncias e as reatâncias serão usadas para a obtenção dos valores de indutância e capacitância de sequência zero e positiva das linhas. Estes valores são apresentados na Tabela 3.1.

Com isso, de posse dos dados resultantes da aplicação da rotina *Line Constants*, o arquivo principal de simulação deverá levar em consideração as demais características descritas até o momento. Ressalta-se que a composição espacial distribuída dos parâmetros do sistema elétrico é da forma (R, L, C).

Tabela 3.1: Valores dos parâmetros obtidos a partir da execução da rotina *Line Constants* do ATP.

Seq.	Resis. (Ω/km)	Susc. (S/km)	Reat. (Ω/km)	Ind. (mH/km)	Cap. ($\mu\text{F}/\text{km}$)
Zero	1,84743E-001	3,40495E-006	8,65849E-001	2,29680	9,03217E-003
Positiva	2,30176E-002	5,93202E-006	2,7966E-001	7,41843E-001	1,57356E-002

3.1.4 Transformadores de Corrente e de Potencial

Como parte da modelagem da linha de transmissão utilizada, faz-se necessário incorporar ao sistema as características dos transformadores de corrente (TCs) e de potencial (TPs). Estes transformadores têm a função de reproduzir de forma fiel e em escala reduzida os valores de corrente e tensão da linha de transmissão, adequando-os aos utilizados pelos sistemas de medição, controle e proteção.

Com relação ao tipo do TP utilizado, optou-se pelo transformador de potencial capacitivo (TPC). Esta escolha foi motivada pela alta tensão do sistema em análise e em simulação, não sendo adequada a utilização de um TP eletromagnético devido à sua classe de isolamento, a qual acarretaria em dimensões impraticáveis (Kinderman, 1999). Cabe co-

localar que a modelagem do TPC empregada nesta pesquisa seguiu os moldes transcritos em (Oleskovicz, 2001) e em (Silva, 2008).

No tocante ao TC, para efeito de simplificação, este não fora o foco de grandes considerações durante sua implementação. Para a atenuação das amplitudes do sinal de corrente analisado, apenas a relação de transformação do TC foi considerada, sem haver uma preocupação com seu efeito de saturação.

3.1.5 Filtro Digital Passa-Baixa Butterworth

Segundo SERRA (1993), “os filtros têm por finalidade principal a função de permitir a passagem dos componentes do sinal na faixa selecionada de frequências, rejeitando ou atenuando os componentes indesejados...”. De um modo prático, estas palavras representam a eliminação dos possíveis ruídos no sinal amostrado. Em SEPs, sua aplicação é reforçada pela necessidade de redução das componentes harmônicas de alta frequência do sinal amostrado, evitando o indesejável efeito *aliasing* (sobreposição de espectros). Phadke e Thorp (1988) enfatizam a necessidade de implementação de um filtro digital passa-baixa *Butterworth* com este objetivo.

Neste trabalho, um filtro *Butterworth* de segunda ordem foi implementado utilizando a linguagem JAVA, com uma frequência de corte de 500 Hz.

3.1.6 Digitalização dos Sinais de Tensão e Corrente

Após a obtenção dos sinais de tensão e corrente, na forma discreta pelo *software* de simulação, deve-se considerar o processo de digitalização pela aplicação de um Conversor Analógico/Digital (CAD).

No tocante à amostragem do sinal, deve-se observar o teorema da amostragem (teorema de *Nyquist*), cujo conteúdo informa que a taxa de amostragem da amplitude de um sinal analógico deve ser, no mínimo, igual a duas vezes a frequência máxima contida neste sinal. Obedecendo este teorema, a metade da taxa de amostragem (frequência de *Nyquist*), corresponde ao limite máximo da frequência do sinal que pode ser reproduzido (Delmont Filho, 2007). Por fim, deve-se realizar a quantização do sinal e sua respectiva

representação digital. Contudo, tal aproximação introduz um erro de quantização, o qual é definido sobre os níveis de quantização, que corresponde à diferença entre o valor numérico real e o valor passível de representação binária, sendo o erro máximo representado por:

$$e = \pm \frac{q}{2} \quad (3.7)$$

Onde e representa o erro máximo obtido para cada amostra e q o intervalo entre dois níveis de quantização. A variável q , por sua vez, pode ser expressa pela fórmula 3.2:

$$q = \frac{V}{2^n - 1} \quad (3.8)$$

Onde V é a amplitude passível de representação do sinal. Ou seja, é o módulo da diferença entre o valor mínimo e o valor máximo passível de ser representado pelo sinal a ser digitalizado e n é o número de bits utilizado pelo conversor. Observa-se que o número de bits utilizado pelo conversor influi diretamente no erro máximo caracterizado pelo CAD. Nesta pesquisa um CAD de 16 bits foi implementado utilizando a linguagem JAVA.

Utilizando-se das considerações apresentadas nesta seção, acredita-se que os valores das impedâncias aparentes obtidas após a aplicação das situações faltosas sobre o sistema elétrico de interesse se mostrem fiéis quando comparadas aos valores encontrados na prática. Tal prerrogativa tornará, com certeza, os resultados e conclusões apresentados, em seus respectivos capítulos, mais confiáveis.

3.2 Geração das Curvas de Proteção Adaptativa

Para a compilação das prováveis curvas de operação sobre um SEP, fez-se uso de simulações computacionais sobre o SEP apresentado na Figura 3.1, dispondo do *software* ATP. Tais simulações foram realizadas de forma automática pela implementação de um aplicador automático de falta (AAF) dispondo da linguagem JAVA. O AAF modifica, a

cada simulação, o arquivo principal do ATP, variando os valores de resistência e distância de falta. Após a simulação, o AAF realiza uma análise sobre o arquivo de saída do ATP, identificando o início da falta, aplicando em seguida a transformada discreta de Fourier (TDF) sobre uma janela de dados de um ciclo de valores de tensão e corrente pós-falta. Com os fasores de tensão e corrente resultantes, obteve-se a impedância aparente. O valor da impedância aparente foi então inserido no banco de dados, passando a ser parte de uma CPA. Afirma-se que as formas de ondas geradas (tensões e correntes trifásicas) pela simulação dispondo do *software* ATP caracterizam por completo todas as informações relativas à situação evidenciada.

No tocante ao processo de geração da curva de proteção, as impedâncias aparentes obtidas, relativas às situações de falta simuladas, correspondem aos pontos das curvas I, II, III e IV (Figura 2.1) que, agregadas, delimitam a zona da proteção adaptativa.

3.2.1 Condições Operacionais Consideradas

Referente às condições operacionais do SEP, segue na Tabela 3.2 uma representação de todas as situações consideradas. Nesta tabela, a primeira coluna apresenta o intervalo de variação dos valores de tensão em p.u., a qual foi variada a um passo de 0,1 p.u.. A segunda coluna representa o intervalo de valores atribuídos ao ângulo de transferência de potência em graus, variado a um passo de 1 grau. A terceira coluna apresenta o intervalo de variação dos valores da capacidade das fontes em GVA, caracterizada por um passo de 5GVA. Ressalta-se que estes valores se referem a medições nos barramentos O e P da Figura 3.1.

Tabela 3.2: Intervalo de variação dos valores das grandezas observáveis nas barras dos geradores.

Tensão (p.u.)	Ângulo (θ)	Capacidade (GVA)
0,9 – 1,1	2 – 20	5 – 15

Com os valores expressos pela Tabela 3.2, realizou-se uma combinação de todas as possibilidades a partir destes, chegando a um total de 4.275 curvas de proteção geradas. Ressalta-se que cada curva é constituída por 36 pontos de impedância aparente, sendo

cada sub-curva constituída por 9 pontos. Sendo assim, da combinação entre as variáveis apresentadas na Tabela 3.2 e o número de 36 pontos necessários para gerar cada curva, foram necessárias 153.900 simulações de situações representativas de falta sobre o sistema elétrico em análise. Vale destacar que cada um destes 9 pontos é obtido, a um passo constante, seguindo as orientações expostas em Coury et al. (2007), de maneira a melhor caracterizar as quatro curvas apresentadas anteriormente. Neste caso, onde uma sub-curva é composta por 9 pontos, o tamanho do passo ou é $\frac{1}{9}$ da distância total da linha de transmissão e/ou é $\frac{1}{9}$ da resistência máxima de falta considerada. A escolha de uma ou outra opção irá depender de qual sub-curva estará em evidência no processo de geração.

3.2.2 Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados - SGBD

Para que as curvas de proteção sejam armazenadas de forma ordenada, foi modelado e implementado um banco de dados utilizando o SGBD (Suehring, 2002). A modelagem foi realizada utilizando o conceito de modelo entidade relacionamento (MER) (Silberschatz et al., 2006). Uma representação do MER modelado e da base de dados implementada são apresentadas, respectivamente, nas Figuras 3.6 e 3.7.

A base de dados apresentada na Figura 3.6 possui 4 tabelas, definidas abaixo:

- Zona: Representa uma zona de proteção (ID, Ângulo, C1, C2, TG1, TG2), onde ID é a chave primária, a qual identifica cada zona em específico, Ângulo representa o ângulo de transferência de potência e C1, C2, TG1 e TG2 ilustram os valores das capacidades das fontes e tensões nos barramentos da geração 1 e 2, respectivamente.
- Limite: representa um limite. Como foi mostrado anteriormente, existem quatro limites por zona (ID, Lado, ID_Zona). Onde ID é a chave primária, Lado representa qual curva (curva I, curva II, curva III, curva IV) os pontos estarão se referindo e ID_Zona é a chave estrangeira que indica qual CPA o ponto está representando.
- Limite_ponto: representa uma ligação entre um ponto e um limite. Relaciona a qual limite o ponto está relacionado (ID, ID_Limite, ID_Ponto). Nesta tabela, ID é a chave primária e ID_Limite é uma chave estrangeira que indica qual ponto está

sendo referido ao limite especificado. ID_Ponto é uma chave estrangeira que aponta a qual limite o ponto está se referindo.

- Ponto: Representa um ponto de falta (ID, Resistência, Distância, Real, Imaginária, Ângulo). Onde ID é a chave primária desta tabela. Resistência e Distância, representam respectivamente os valores de resistência e distância de falta utilizados para obter o valor da impedância aparente. Real representa o valor da parte real e Imaginária ilustra o valor da parte imaginária do fasor da impedância aparente obtida.

A tabela Zona possui a representação de uma zona de proteção. Com base em seus campos, é possível retratar todas as condições operacionais que se deseja ilustrar. A tabela Limite define a qual sub-curva um ponto pertence. A tabela Limite_Ponto realiza a ligação entre os pontos armazenados e a CPA a ser representada, indicando ainda, a qual sub-curva este ponto está relacionado. Por fim, a tabela Ponto descreve o ponto (impedância aparente) armazenado.

Figura 3.6: Tabelas modeladas e implementadas utilizando o *SGBD mysql*.

Referente à Figura 3.7, a qual representa o modelo entidade relacionamento utilizado, percebe-se a correlação entre este modelo e a base de dados implementada.

A escolha por este banco de dados se deve a diversas vantagens, como as citadas por (Suehring, 2002):

- Portabilidade
- Compatibilidade
- *Software* livre

Figura 3.7: Modelo entidade relacionamento utilizado neste trabalho

- Bom desempenho e estabilidade

Com sua aplicação, cada curva de proteção é adequadamente armazenada e pode ser, quando conveniente ao sistema, recuperada, representando o SEP para a específica condição de operação, refletindo o ângulo de transferência de potência, a capacidade das fontes e a tensão nos barramentos em questão.

3.3 Características Construtivas do SMA

Nesta seção serão apresentadas as características construtivas do SMA proposto. Será apresentada a ferramenta utilizada para implementação do SMA, o algoritmo de coordenação utilizado, além das características funcionais de cada Agente implementado e o protocolo de comunicação e troca de mensagens utilizado.

3.3.1 JADE

Como ferramenta escolhida para a implementação dos Agentes tem-se a plataforma JADE (*Java Agent DEvelopment framework*). Esta teve início em 1998 através de um esforço da CSELT (*Telecom Italia*). Seu desenvolvimento foi motivado pela necessidade de uma validação das especificações da FIPA (*Foundation for Intelligent, Physical Agents*). JADE se tornou uma plataforma de código aberto em 2000 e foi distribuída pela *Telecom Italia* sobre a licença LGPL (*Library Gnu Public Licence*). Ela é uma plataforma que provê

certas funcionalidades, as quais são independentes da aplicação, simplificando a realização de aplicações distribuídas que explorem a utilização de agentes de *software*. Por serem construídos sobre a plataforma JAVA, os Agentes implementados utilizando o *framework* JADE podem ser executados sobre qualquer sistema operacional (SO), característica que torna sua utilização ideal em ambientes onde não é possível obter qualquer informação sobre qual SO está sendo utilizado. Além desta característica, o *framework* JADE, através de suas funcionalidades, permite o rápido desenvolvimento de Agentes, permitindo um controle via uma interface gráfica. Estas particularidades, as quais diferenciam-na de outros *softwares* similares, foram tomadas em consideração em sua escolha como plataforma de desenvolvimento do SMA.

3.3.2 Algoritmo de Cooperação Utilizado

Como algoritmo de cooperação, escolheu-se a decomposição espacial. Este protocolo de cooperação é extremamente simples, tendo como base a alocação de Agentes de acordo com suas funcionalidades, pontos de decisão ou na forma das fontes de informação, alocando-os de acordo com suas capacidades/habilidades. Depois de realizada a decomposição, introduz-se os agentes em seus respectivos locais já reservados. A coordenação se faz pelo uso da comunicação entre as entidades. Para uma melhor visualização tem-se a Figura 3.8. Esta Figura ilustra a decomposição espacial aplicada ao ambiente do SMA. Como critério para definição das áreas a serem decompostas, analisou-se atentamente o problema e observou-se a existência de três áreas cujas características são extremamente distintas. Tais áreas (funcionalidades) são:

- medição dos valores das grandezas observáveis;
- inserção de novas curvas de aberturas nos relés associados e
- gerenciamento destas tarefas e armazenamento das CPAs previamente geradas.

Com base nesta análise, um número suficiente de Agentes foram implementados, sendo divididos em três classes de acordo com suas atribuições.

3.3.3 Agentes Implementados

Agente Servidor

O Agente Servidor é o responsável pelo acesso ao banco de dados, respondendo pelas requisições dos Agentes Sensores, enviando a CPA mais próxima e adequada da requisitada aos Agentes Executores.

Para o provimento desta funcionalidade foi modelado e implementado um banco de dados utilizando o SGBD (MySQL, 2007). Neste banco de dados, são armazenadas todas as CPAs geradas, as quais representam situações distintas de operação do sistema elétrico. Esta metodologia garante um adequado modelo de armazenamento das curvas de abertura através das funcionalidades e vantagens oferecidas pelo SGBD utilizado, além de viabilizar uma fácil obtenção, inserção, atualização e exclusão de uma CPA pelo uso dos comandos SQL *select*, *insert*, *update* e *delete*, respectivamente.

Figura 3.8: Decomposição espacial dispo de três classes de agentes.

O Agente Servidor pode ser considerado o núcleo do sistema proposto, visto que nele estão concentradas todas as funcionalidades mais complexas, como o armazenamento e busca das CPAs, além do encaminhamento destas aos Agentes responsáveis pela atuali-

zação dos relés. Como outra funcionalidade pode-se citar a observação do sincronismo entre as mensagens provenientes dos Agentes Sensores. Isto se faz necessário, pois o sistema elétrico pode estar sob efeito de um conjunto de distúrbios, tendo como resultado a variação nas condições de operação em pequenos intervalos de tempo. Este fato, aliado à possibilidade de perda de informação pelo uso de redes de comunicação, nos traz uma possibilidade de recebimento de mensagens não correlatas, acarretando em uma interpretação errônea pelo sistema.

Agentes Executores

Agentes Executores, os quais residem nos barramentos **N** e **M** (Figura 3.9), são responsáveis por alimentar os relés com as CPA requisitadas pelos Agentes Sensores.

Figura 3.9: Sistema Multi-Agentes aplicado ao sistema de transmissão simulado.

Fundamentalmente, estes Agentes ficam quase que ociosos durante todo seu período de execução. Seu comportamento é caracterizado pela espera constante de mensagens oriundas do Agente Servidor, as quais conterão novas curvas de operação a serem inseridas nos relés associados. Quando do recebimento destas mensagens, os Agentes Executores irão atualizar a curva de abertura observada pelo relé, garantindo ao sistema de proteção uma maior confiabilidade de execução, já que desta atualização, resultará a atual condição de operação enfrentada pelo relé associado.

Agentes Sensores

Agentes Sensores, residentes na geração (barramentos **O** e **P**), representada na Figura 3.9 por seus equivalentes, são os responsáveis por processar as medições sobre os valores relativos à tensão no barramento, à capacidade das fontes e do ângulo de transferência de potência.

Diferentemente dos Agentes Executores, estes Agentes possuem uma alta taxa de processamento. Esta característica é essencial, pois são estes Agentes os “sensores” do sistema multi-agentes. Cabe ressaltar que apenas estes Agentes possuem a capacidade de observar valores do mundo real, enquanto os demais têm seus sensores voltados para mensagens internas ao sistema. Na prática, tais Agentes devem observar, em intervalos de tempo discretos, as alterações nos valores das grandezas desejadas. Quando observado alguma alteração significativa nestes valores, os Agentes Sensores devem enviar mensagens para o Agente Servidor contendo os valores medidos.

O modelo proposto para a proteção de linhas de transmissão (LT) utilizando o SMA desenvolvido, guiado por um banco de dados de zonas de proteção em uma rede do tipo *Intranet* é apresentado na Figura 3.9. Nesta ilustração, pode ser visualizada a localização espacial de cada Agente supracitado no sistema elétrico em questão.

A implementação dos Agentes aqui tratados pode ser visualizada no Apêndice A. Neste é ilustrado o código fonte dos Agentes utilizando o *framework* JADE.

3.3.4 Protocolos de Comunicação e Troca de Mensagens (Interação)

Com o intuito de garantir uma forma efetiva de operação, possibilitando uma interação produtiva, é necessária a definição de um protocolo de comunicação e interação. Com isto, quer-se dizer que é preciso prover mecanismos para a interação e coordenação destas entidades, já que cada uma possui um conjunto de capacidades específicas, bem como seus próprios objetivos em relação aos estados do ambiente que querem atingir.

Cabe esclarecer que os protocolos de comunicação possibilitam a troca de mensagens

entre agentes, enquanto que protocolos de interação habilitam os agentes a terem uma “interoperabilidade”.

Uma fundamental decisão para a interação entre agentes é a separação entre as semânticas do protocolo de comunicação e do conteúdo da mensagem. O protocolo de comunicação deve ser universalmente compartilhado por todos os agentes, sendo conciso e constituído por um número limitado de primitivas de comunicação.

Foundation for Intelligent, Physical Agents - FIPA

FIPA é um padrão desenvolvido pelo IEEE *Computer Society* para permitir o desenvolvimento de tecnologias baseadas em Agentes e a interoperabilidade entre estas com outras tecnologias. FIPA foi aceito pelo 18º comitê de padrões do IEEE em 2005. Sua principal função é fornecer um padrão de organização para Agentes heterogêneos e interativos. O conjunto de especificações FIPA, desde sua criação, tem influenciado fortemente o setor, sendo que muitos dos seus preceitos são empregados atualmente (FIPA, 2009). Seguindo as especificações FIPA, foram desenvolvidas as mensagens ACL (*Agent Communication Language*). Estas mensagens trazem em sua construção a metodologia imposta pela FIPA, sendo inseridos em sua estrutura os atributos requeridos pelos padrões FIPA. Assim, de acordo com as especificações FIPA, as mensagens ACL permitem uma intercomunicação entre Agentes, possibilitando uma comunicação assíncrona. Por ser um padrão reconhecido mundialmente, além de ser o protocolo padrão do *framework* JADE, o protocolo de comunicação escolhido, para este trabalho, foi o FIPA ACL (Bellifemine et al., 2007).

Protocolo de troca de mensagens (Interação)

Para a automação deste processo, foi definido um protocolo de troca de mensagens, o qual visa facilitar a troca de informações entre os Agentes que compõe o SMA. Além de sua simplicidade, uma característica importante é a garantia de sincronismo entre as mensagens recebidas pelo Agente Servidor, eliminando grande parte dos problemas referentes à sua aplicação.

Neste protocolo os Agentes Sensores constantemente verificam se há variações nos

valores observáveis. Da ocorrência de uma variação significativa, estes enviam os dados processados, os quais representam a nova condição de operação, para o Agente Servidor, que os analisa. Entretanto, há a possibilidade de perda de dados, sendo necessário o controle do sincronismo entre as mensagens. Caso apenas uma mensagem chegue ao seu destino (Agente Servidor), este deve encaminhar uma requisição para todos os Agentes Sensores envolvidos no processo, requerendo os valores das atuais condições de operação. Com a confirmação de sincronismo entre as mensagens recebidas, o Agente Servidor irá buscar no banco de dados a CPA mais próxima ao funcionamento atual do sistema e por fim, as envia aos Agentes executores, os quais irão atualizar as zonas de proteção nos relés associados. Tal funcionamento é representado pela Figura 3.10, onde cada fase supracitada, de um modo geral, é apresentada.

Figura 3.10: Fluxograma relativo ao funcionamento do protocolo de interação utilizado.

Pelo que foi exposto, espera-se que todas as características inerentes ao processo de aplicação de um sistema multi-agente para o provimento da proteção digital de distância

adaptativa tenham sido consideradas, tornando a proposta viável e justificável. Ressalta-se que o fluxograma ilustrado pela Figura 3.10 foi completamente implementado utilizando o *Network Simulator 2* (ns-2), que será apresentado no capítulo de resultados. O código desta implementação é apresentado no Apêndice B deste documento.

Capítulo 4

Resultados dos Testes: Viabilidade Prática e Validação do SMA Implementado

Para a aplicação da abordagem proposta neste trabalho, alguns aspectos devem ser elucidados, de modo a refletir características que apontem a viabilidade prática desta proposta, assim como ressaltar o adequado comportamento do SMA aplicado ao problema abordado.

Neste sentido, são apontados dois pontos a serem satisfeitos. O primeiro a ser abordado trata da viabilidade de utilização de redes de domínio público pelo SMA. A utilização deste tipo de rede é relevante devido à digitalização de vários equipamentos ligados ao sistema elétrico, o que possibilita o uso de tais redes para troca de informações. Isto garante uma maior confiabilidade na realização de determinadas tarefas, como a atuação do sistema de proteção.

O segundo ponto abordado é relativo à validação do SMA. Vários testes foram realizados visando aferir se o SMA proposto, juntamente com as CPAs, são capazes de garantir uma melhor execução do sistema de proteção, adicionando uma menor taxa de erros por parte deste, além de uma maior confiabilidade.

Deste modo, diversos testes foram realizados visando a verificação dos pontos supra-

citados. Além destes testes, um outro foi realizado visando a implementação prática do SMA proposto utilizando uma rede de comunicação, a qual utiliza a pilha de protocolos TCP/IP, disponível e vastamente utilizados em uma rede de domínio público. Os resultados de tais testes são abordados nas seções que seguem.

4.1 Viabilidade Prática

Com o desenvolvimento tecnológico, novos métodos e meios de comunicação surgiram. Segundo Tanenbaum (2003), a inserção de comunicação aos ambientes computadorizados contribuiu fortemente para a organização das redes de computadores encontradas atualmente.

Com o crescimento exponencial da complexidade das redes de comunicação, o que é resultado do grande aumento do número de dispositivos capazes de trocar informações entre si, torna-se necessário a criação de ambientes de simulação de tais redes. Estes ambientes são necessários para que o desenvolvimento de novos protocolos de comunicação não demande a criação de equipamentos físicos para a realização de testes, bem como a verificação da viabilidade de sua utilização.

Para a realização desta tarefa, diversos simuladores estão disponíveis, onde os que mais se destacam em ambientes corporativos e acadêmicos, respectivamente, são o OPNET e o *Network Simulator 2* (NS-2).

O OPNET agrega flexibilidade ao projeto e estudo de redes de comunicação, dispositivos, protocolos e aplicações. Devido à sua interface amigável ao usuário, sua precisão e funcionalidades, este simulador tem sido muito utilizado em ambientes corporativos. Entretanto, sua utilização se restringe a este meio devido ao seu alto custo (OPNET, 2009).

Do outro lado, encontra-se o NS-2. Este teve início como uma variante do REAL Network Simulator (REALNS) em 1989 e em poucos anos recebeu um desenvolvimento substancial. Em 1995, seu desenvolvimento foi apoiado pela DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*) através do projeto VINT (*Virtual InterNetwork Testbed*) entre LBNL (*Lawrence Berkeley National Laboratory*), Xerox PARC (*Palo Alto Research*

Center), UCB (*University of California, Berkeley*) e USC/ISI (*University of Southern California / Information Sciences Institute*). Atualmente, o desenvolvimento do NS-2 é suportado pela DARPA através do SAMAN (*Simulation Augmented by Measurement and Analysis for Networks*) e pela NSF (*National Science Foundation*) através da CONSER (*Collaborative Simulation for Education and Research*) (NS-2, 2009).

O NS-2 é um simulador baseado em eventos discretos aplicado em pesquisas relacionadas a redes de comunicação. Este provê suporte para simulações de protocolos TCP, de roteamento, *multicast*, etc. Dentre as configurações destas redes, pode-se utilizar redes cabeadas ou *wireless* em ambientes locais ou via satélites. O NS-2 é vastamente utilizado por pesquisadores devido à sua distribuição gratuita e ao seu código aberto. Este último fato, em particular, possibilita com muita flexibilidade a criação e teste de novos algoritmos e funcionalidades.

Devido às características comentadas, o NS-2 foi escolhido nesta pesquisa para a realização das simulações relativas ao uso do SMA para o provimento da PDDA. Através de seu uso, tornou-se possível observar o tempo demandado para que uma nova curva de proteção adaptativa seja inserida nos relés associados. Esta informação pode acusar em quais condições operacionais de uma rede de comunicação é praticável a implementação do SMA proposto. Neste sentido, foram realizados diversos testes, os quais serão apresentados nas seções a seguir, no intuito de afirmar se é possível ou não sua aplicação em redes de comunicação de domínio público.

4.1.1 Cenários e Tráfegos Aplicados

Para a realização dos testes, fez-se uso da metodologia empregada em Coury (2002). Nesta, é proposta a aplicação de um tráfego de dados cujos pacotes tenham o tamanho especificado pela aplicação a ser analisada, ou seja, o tamanho dos pacotes desta aplicação serão os mesmos a serem enviados pelo SMA. Este tráfego de dados será aplicado juntamente a outros tráfegos em diversos cenários, onde cada cenário representa peculiaridades referentes aos *links* de comunicação.

A rede de comunicação utilizada é apresentada na Figura 4.1. Todos os *links* utilizam

Figura 4.1: Estudo de caso utilizado nas simulações de tráfego muito congestionado

a pilha de protocolos TCP/IP amplamente difundida e empregada pela *Internet*. Estes foram definidos com valores idênticos em sua largura de banda a partir de um conjunto previamente escolhido, sendo este conjunto composto pelos seguintes valores: 1Mbits/s, 2Mbits/s, 5Mbits/s, 10Mbits/s, 15Mbits/s e 20Mbits/s. Estes valores foram escolhidos de modo a representar diversas características do enlace de dados utilizado, o que pode ser traduzido como uma melhor representação de um ambiente a ser aplicado o SMA. Na Figura 4.1 podem ser visualizados os dados referentes a um tráfego muito congestionado (um dos cenários utilizados), cuja definição será abordada posteriormente, além de informações sobre o tamanho dos pacotes enviados pelos Agentes Sensores (12 bytes) e Agentes Servidores (144 bytes).

Cada nó apresentado pela Figura 4.1 representa um barramento (0, 1, 2, 3 e 4), onde os Agentes Sensor (0 e 3), Executor (1 e 2) e Servidor (4), constituintes do SMA proposto, estarão inseridos, ou fontes de tráfego de dados (5, 6, 7, 8, 9 e 10). Para a geração de uma simulação que represente adequadamente as necessidades da aplicação proposta, criou-se tráfegos de dados cujos valores foram utilizados por Coury et al. em 2002. Estes foram divididos em cenários, sendo um cenário mais sobrecarregado composto por tráfegos de dados constantes, onde os *links* 5-0, 7-4, 8-3 e 10-4 foram definidos com uma frequência de 2000 pacotes (1024 bytes) por segundo. Enquanto que os tráfegos sobre os *links* 6-0, 7-4,

9-3 e 10-4 foram definidos com uma frequência de 833 pacotes (284 bytes) por segundo. Para a configuração de um tráfego leve, todos os tráfegos foram desconsiderados, exceto aquele representativo da aplicação a ser analisada. No intuito de caracterizar um cenário mediano, foram criados tráfegos de dados constantes, onde os *links* 5-0, 7-4, 8-3 e 10-4 foram definidos com uma frequência de 250 pacotes (1024 bytes) por segundo. Enquanto que os *links* 6-0, 7-4, 9-3 e 10-4 foram definidos com uma frequência de 333 pacotes (284 bytes) por segundo.

Posteriormente, definiu-se os tamanhos dos pacotes a serem utilizados pelo SMA. O tamanho dos pacotes utilizados pelos Agentes Sensores ao enviar as novas condições operacionais ao Agente Servidor (*links* 0-4 e 3-4) foi especificado com o tamanho de 52 bytes, dos quais 12 bytes são referentes à utilização de 3 números do tipo Float, onde cada um representa uma grandeza observável. Além de 20 bytes referentes ao cabeçalho IPv4 e 20 bytes referentes ao cabeçalho TCP. Em seguida, definiu-se o tamanho dos pacotes enviados pelo Agente Servidor aos Agentes Executores (*links* 4-1 e 4-2) contendo a nova CPA a ser utilizada pelos relés associados. O tamanho definido foi de 184 bytes, dos quais 144 bytes são representativos da CPA, 20 bytes referentes ao cabeçalho IPv4 e 20 bytes referentes ao cabeçalho TCP. Por fim, foi especificado um pacote de 50 bytes utilizado em ocasiões específicas, sendo 10 bytes de possíveis informações, 20 bytes referentes ao cabeçalho IPv4, 20 bytes referentes ao cabeçalho TCP. Tais ocasiões se referem à necessidade de pedido de reenvio de informações por parte dos Agentes , caso seja necessário.

Ressalta-se que para simplificação da modelagem e simulação, não há perdas de pacotes durante a transmissão sobre os links. As únicas perdas observadas são relativas ao congestionamento ou quando o teste realizado exige a perda de algum pacote.

4.1.2 Medição Temporal da Atualização das CPAs

Com base nos dados ilustrados na seção anterior, configurou-se o sistema apresentado pela Figura 4.1 utilizando o simulador NS-2. Esta implementação pode ser vista no Apêndice B. Com isso, foi possível realizar a medição temporal da atualização das CPAs mediante alguma alteração nas condições operacionais. Para esta tarefa, foram definidas algumas configurações e situações do sistema de comunicação. Foram avaliadas tanto

situações normais de operação, ou seja, situações onde não há perda de pacotes pela queda dos links de comunicação, como situações detentoras de anomalias. Tais anomalias podem ser caracterizadas pela perda de pacotes cujo conteúdo seja de extrema importância para a conclusão da atualização. As anomalias aqui tratadas são as que seguem:

- Anomalia 1: perda dos pacotes contendo os valores atualizados das condições operacionais do sistema elétrico.
- Anomalia 2: perda dos pacotes contendo a representação numérica da CPA atualizada.
- Anomalia 3: perda dos pacotes utilizados para pedidos de reenvio de dados.

Assim, para a realização dos testes de viabilidade prática, inicialmente configurou-se o sistema de comunicação de modo a não apresentar as anomalias supracitadas. As larguras de banda de todos os *links* foram ajustadas com os valores já descritos. Sobre cada nova configuração, caracterizada pela alteração nos valores da largura de banda, o tempo gasto para a atualização das CPAs sobre os relés associados foi mensurado. Ressalta-se que, a medição aqui realizada, toma como base o tempo gasto para cumprimento do fluxograma apresentado na Figura 3.10 após uma alteração nas condições operacionais do SEP analisado. Os resultados desta etapa são apresentados na Tabela 4.1, onde a primeira coluna representa a largura de banda, em Mbits/s, utilizada pelos *links* de comunicação. A segunda, terceira e quarta coluna representam, respectivamente, os tempos, em segundos, de atualização das CPAs quando o cenário é configurado como leve, médio e pesado. Cabe observar que os valores omitidos na quarta coluna se referem a tempos de atualização superiores a 20s, valor este definido empiricamente como limite para uma possível atualização das CPAs. Esta definição será utilizada em todas as tabelas desta seção. Afirma-se que para valores superiores aos 20s, pela lógica apresentada dispondo do protocolo TCP, não foi possível caracterizar um tempo de atualização das CPAs como desejado.

Pela Tabela 4.1, pode-se inferir que o SMA, aqui apresentado, atuando num sistema de comunicação cujo tráfego é caracterizado por um cenário leve e ausente de anomalias é capaz de atualizar os relés de proteção associados à linha de transmissão a ser protegida

Tabela 4.1: Tempos de atualização do SMA sobre diversos cenários sem anomalias.

Largura de Banda	Cenários		
	Leve	Médio	Pesado
1Mbits/s	0,053640s	0,879640s	————
2Mbits/s	0,052320s	2,739800s	————
3Mbits/s	0,052213s	0,052213s	————
5Mbits/s	0,052128s	0,053128s	————
10Mbits/s	0,052064s	0,052064s	3,0110700s
15Mbits/s	0,052043s	0,052043s	0,0900430s
20Mbits/s	0,052032s	0,052032s	0,052032s

em um tempo satisfatório. Alterando-se o tráfego para um cenário médio, os tempos de atualização sofrem um pequeno acréscimo, principalmente quando as larguras de banda são configuradas a baixos valores. Entretanto, à medida que eleva-se os valores das larguras de banda, os tempos de atualização tendem a cair e se aproximar dos valores obtidos em um tráfego leve. A ocorrência deste fato é sustentada, pois à medida que a largura de banda de um *link* de comunicação passa a suportar o tráfego incidente, ocorre a redução na perda de pacotes na fila do *buffer* do roteador. Assim, no momento que um determinado pacote é disponibilizado para transmissão, esta ocorre quase que imediatamente. Entretanto, vale lembrar que quando os links foram configurados a uma largura de banda de 2Mbits/s sobre um cenário mediano, o tempo de atualização foi maior do que aquele observado quando os links estavam a 1Mbits/s. Este fato deve ter ocorrido devido às peculiaridades dos protocolos utilizados, fazendo parte de casos isolados. No entanto, valores similares podem ocorrer em qualquer cenário e em qualquer largura de banda utilizada. Sobre um cenário constituído por um tráfego pesado, um comportamento similar à utilização de um tráfego mediado ocorre, passando a apresentar um tempo de atualização similar ao cenário leve para valores mais elevados de largura de banda.

Adicionalmente a este teste, foram realizadas simulações contendo perda de pacotes essenciais para a atualização das CPAs. Seguindo a apresentação destas anomalias já descritas anteriormente, apresenta-se os resultados relativos a cada problema abordado. Assim, inicialmente, estudou-se os efeitos que a perda dos pacotes contendo os valores atualizados das condições operacionais (Anomalia 1) do sistema elétrico acarretaria no

tempo de atualização. O resultado deste estudo é apresentado na Tabela 4.2, onde a primeira coluna representa a largura de banda utilizada, em Mbits/s, pelos links do sistema de comunicação. A segunda, terceira e quarta coluna, respectivamente, apresentam o tempo, em segundos, de atualização quando há a perda de um pacote contendo os valores atualizados das condições operacionais do SEP em análise.

Tabela 4.2: Tempos de atualização do SMA mediante a perda de um pacote contendo os valores atualizados das condições operacionais.

Largura de Banda	Cenários		
	Leve	Médio	Pesado
1Mbits/s	0,263640s	0,939390s	———
5Mbits/s	0,262128s	0,265128s	11,55420s
15Mbits/s	0,262043s	0,262043s	1,49904s

Em seguida, analisou-se situações apresentando perda dos pacotes contendo a representação numérica da CPA atualizada (Anomalia 2). O resultado deste teste é apresentado na Tabela 4.3, onde a primeira coluna representa a largura de banda utilizada pelos links de comunicação em Mbits/s. A segunda, terceira e quarta coluna apresentam o tempo, em segundos, demandado para atualização das CPAs sobre os cenários leve, médio e pesado, respectivamente.

Tabela 4.3: Tempos de atualização do SMA mediante a perda de um pacote contendo a representação numérica da CPA.

Largura de Banda	Cenários		
	Leve	Médio	Pesado
1Mbits/s	0,253640s	1,081470s	———
5Mbits/s	0,252128s	0,253366s	11,55680s
15Mbits/s	0,252043s	0,252043s	5,44406s

Por fim, analisou-se situações apresentando perda dos pacotes utilizados para pedidos de reenvio de dados (Anomalia 3). Tais pacotes são utilizados para enviar pedidos de reenvio de dados pelo SMA implementado. O resultado deste teste é apresentado na Tabela 4.4, onde a primeira coluna representa a largura de banda utilizada pelos links de comunicação em Mbits/s. A segunda, terceira e quarta coluna apresentam, respectivamente,

os tempos, em segundos, de atualização das CPAs quando o sistema está agindo sobre cenários de tráfego leve, médio e pesado.

Com base nas Tabelas 4.2, 4.3 e 4.4, observa-se que as anomalias apresentadas influem fortemente no tempo de atualização das CPAs. Este aumento ocorre devido às características de reenvio de pacotes por parte do protocolo TCP, além do tempo de transmissão necessário para que o pacote alcance seu destino. Ressalta-se que nestas condições, caso a perda do pacote tenha ocorrido pela perda do link de comunicação, a existência e aplicação de algoritmos de roteamento são necessários. Tais algoritmos são vastamente utilizados em redes de comunicação, permitindo a “descoberta” de uma nova rota entre a origem e o destino dos dados. Obviamente que sua execução acaba por aumentar o tempo demandado para enviar informações. Entretanto, sua aplicação adiciona ao sistema uma característica de tolerância a falha, ou seja, mesmo ocorrendo a perda de um link de comunicação, as informações ainda poderão ser entregues a seu destino.

Tabela 4.4: Tempos de atualização do SMA após a perda de pacotes de pedido de reenvio

Largura de Banda	Cenários		
	Leve	Médio	Pesado
1Mbits/s	1,849640s	———	———
5Mbits/s	1,846130s	1,849350s	14,39510s
15Mbits/s	1,846040s	1,846040s	5,309040s

Para uma melhor elucidação, pode-se tomar como exemplo a troca de informações entre os nós 0 e 4, (Figura 4.1), sob condições normais de operação do sistema de comunicação. Neste caso, os dados enviados tendem a ir diretamente do nó 0 ao nó 4, já que todos os links de comunicação possuem o mesmo tempo de transmissão e largura de banda. Entretanto, caso o link 0-4 seja perdido, os dados provenientes do nó 0 deverão seguir inicialmente para o nó 1 e em seguida, ao nó 4. Neste exemplo fica claro o novo caminho a ser traçado, visto que são considerados poucos nós. Entretanto, em uma troca de arquivos via Internet, o número de opções é muito maior, o que leva à necessidade de algoritmos de roteamento robustos e sofisticados. Ressalta-se que todos os testes cujo objetivo era o de verificar o desempenho do SMA pela inserção das anomalias supracitadas se utilizaram do algoritmo de roteamento *rt-proto*, oferecido pelo NS-2.

4.2 Validação do SMA Implementado

Com o intuito de validar o SMA proposto, foram realizados testes visando aferir adequadamente o comportamento do mesmo.

Neste teste foram simuladas diversas situações para se verificar a eficácia do SMA proposto, comparando-o à filosofia tradicional. Para tanto, foram aplicadas distintas situações de faltas fase-terra, por serem mais frequentes, sobre o SEP da Figura 3.9, com valores da resistência variando de 0Ω a 200Ω (com um passo de 5Ω) e distâncias que compreendem de 1% a 99% da linha de transmissão caracterizada entre os barramentos **M** e **N** (com um passo de 1%), tomando como referência o barramento **M**.

As faltas foram aplicadas sobre diferentes condições operacionais do SEP. Nestas condições os valores das tensões nos barramentos e a capacidade dos geradores foram fixados em 1 p.u. e 10GVA, respectivamente, sendo o valor do ângulo de transferência variado entre 2^0 e 20^0 , a um passo de 1^0 .

Enfatiza-se que a CPA utilizada para esta fase foi simulada variando-se os valores de distância de aplicação da falta até 80% do comprimento da LT (barramentos **M** e **N**), proporcionando um ambiente equivalente para uma efetiva comparação desta com a quadrilateral convencional. A esta idéia, além de distinguir entre situações normais e faltosas apresentadas, relembra-se que como ponto inicial, o SMA deve reconhecer ou estar sensível às mudanças de operações do sistema. Logo, quando da mudança entre as diversas situações, houve o acompanhamento das informações repassadas entre os Agentes (Figura 3.9), até se chegar ao apontamento/escolha da CPA que melhor representasse o SEP, e da aplicação destas aos relés associados nas barras **M** e **N** do sistema em análise.

Dos testes, foram realizadas análises quanto algumas das características inerentes ao sistema de proteção. Tais análises serão explicitadas a seguir.

4.2.1 Sensibilidade

Para quantizar a eficácia do método proposto quanto à sensibilidade mediante variações nas condições de operação do SEP, foi realizado uma bateria de testes simulando

prováveis alterações nas grandezas envolvidas. Para tanto, o SEP foi configurado com os valores de diversas situações. As faltas foram aplicadas a todas as situações, medindo-se o desempenho das filosofias em estudo e, conseqüentemente, sua sensibilidade em função da variação dos parâmetros de operação do SEP. Vale lembrar que as situações em análise trazem como padrão os valores de 1 p.u. e 10GVA para as variáveis que representam as tensões nos barramentos e as capacidades das fontes, enquanto que o ângulo de transferência de potência sofre uma variação de 2^0 a 20^0 a um passo de 1^0

Os resultados obtidos estão dispostos na Tabela 4.5. Nesta, a primeira coluna expõe a numeração da situação tratada. A segunda coluna descreve os valores do ângulo de transferência de potência em graus. A terceira e quarta coluna apresentam os percentuais de acerto quando do uso da filosofia quadrilateral e adaptativa respectivamente.

Tabela 4.5: Sensibilidade das filosofias em estudo

Situação	Ângulo de Transferência (Graus)	Filosofias	
		Tradicional Quadrilateral	Quadrilateral Adaptativa
Sit.1	2	45,69%	99,23%
Sit.2	3	47,81%	98,51%
Sit.3	4	50,17%	97,59%
Sit.4	5	52,81%	97,69%
Sit.5	6	55,65%	97,56%
Sit.6	7	58,66%	97,49%
Sit.7	8	62,10%	97,19%
Sit.8	9	65,73%	96,76%
Sit.9	10	69,59%	95,69%
Sit.10	11	72,25%	95,00%
Sit.11	12	74,32%	94,25%
Sit.12	13	76,58%	93,63%
Sit.13	14	79,29%	92,76%
Sit.14	15	79,57%	92,26%
Sit.15	16	77,90%	91,66%
Sit.16	17	75,66%	90,89%
Sit.17	18	73,05%	90,19%
Sit.18	19	70,31%	89,37%
Sit.19	20	67,47%	88,23%
Média		66,032%	94,523%
Desvio padrão		11,164%	3,3718%

Relembra-se que as duas filosofias (quadrilateral convencional e CPA) foram moldadas

para uma cobertura de até 80% do comprimento da LT definida entre os barramentos **M** e **N**. Observa-se que mesmo após a alteração nas condições de operação do SEP, a filosofia adaptativa manteve um comportamento mais rígido, evidenciando a sua menor sensibilidade em relação à mudança nos valores dos parâmetros observados.

4.2.2 Confiabilidade

No tocante à verificação do atendimento à confiabilidade, foi realizada uma análise sobre o número de atuações corretas ocorridas tanto da filosofia empregando a curva quadrilateral convencional quanto da CPA. Os valores da distância de falta e da resistência de falta sofreram uma variação conforme descrito no início da seção 4.2.

Tabela 4.6: Confiabilidade das filosofias em estudo

Situação	Ângulo de Transferência (Ω)	Sem abertura		Aberturas Indevidas	
		Quadrilateral	Adaptativa	Quadrilateral	Adaptativa
Sit.1	2	60,78%	0,72%	33,19%	0,95%
Sit.2	3	57,85%	1,43%	33,72%	1,70%
Sit.3	4	54,67%	2,08%	34,04%	3,50%
Sit.4	5	51,12%	1,76%	34,36%	4,14%
Sit.5	6	47,25%	1,89%	34,89%	4,24%
Sit.6	7	43,09%	1,98%	35,63%	4,24%
Sit.7	8	38,57%	2,31%	35,74%	4,45%
Sit.8	9	33,63%	2,76%	36,37%	4,77%
Sit.9	10	28,29%	3,35%	37,33%	7,42%
Sit.10	11	23,93%	3,61%	40,19%	9,54%
Sit.11	12	20,23%	3,80%	43,48%	12,09%
Sit.12	13	16,98%	4,20%	44,43%	13,47%
Sit.13	14	15,25%	4,85%	38,49%	15,06%
Sit.14	15	16,85%	5,20%	32,13%	16,01%
Sit.15	16	20,81%	5,76%	26,30%	16,76%
Sit.16	17	24,81%	6,54%	22,80%	17,50%
Sit.17	18	28,94%	7,64%	20,47%	16,86%
Sit.18	19	32,91%	8,91%	19,19%	16,22%
Sit.19	20	36,98%	10,73%	18,03%	15,16%
Média		34,3652%	4,185%	32,672%	9,688%
Desvio padrão		14,598%	2,722%	7,7937%	6%

Os resultados observados são evidenciados na Tabela 4.6. A primeira coluna representa

a situação em foco, enquanto que a segunda apresenta o valor do ângulo de transferência de potência utilizado em cada situação. A terceira, quarta, quinta e sexta coluna apresentam as taxas de atuações incorretas do SP, respectivamente, quando:

- a) Terceira e quarta coluna: o SEP está sob situação de falta e as duas filosofias devem indicar a necessidade de atuação do sistema de proteção e;
- b) Quinta e sexta coluna: o SEP está em condição normal de operação e as duas filosofias devem reconhecer tal situação e não permitir a atuação do sistema de proteção.

Dos resultados apresentados na Tabela 4.6, evidencia-se que a filosofia adaptativa, a qual utiliza a CPA, errou menos frente a estas indicações em detrimento da filosofia quadrilateral convencional. Tais resultados conferem uma maior confiabilidade do SP quando este se utiliza da CPA. Observando os valores medianos, tem-se que em situações onde não houve abertura, a filosofia utilizando a CPA teve um resultado mais adequado, obtendo a taxa de 3,61% de respostas incorretas, enquanto que a filosofia tradicional obteve uma taxa de 32,21% de respostas incorretas. Adicionalmente, tendo em foco as situações normais de operação em que houve atuação indevida do SP, a filosofia adaptativa apresentou uma taxa de 9,54% respostas incorretas, enquanto que a filosofia tradicional apresentou uma taxa de 34,36% de erro nestas situações.

4.2.3 Redefinição da Zona de Proteção Primária da CPA

Para verificar a possibilidade de redefinição da zona de proteção primária, configuraram-se novas CPAs, estendendo a cobertura para até 95% do comprimento da LT entre os barramentos **M** e **N**. Uma extensiva rotina de testes foi executada, considerando-se a resistência de falta variando de 0Ω a 200Ω , a um passo de 10Ω , e distâncias de aplicação com relação ao barramento **M**, de 1% a 99% da LT, a um passo de 1%. Pode-se afirmar pelos resultados observados que mesmo até 95% do comprimento da LT, a CPA veio a proporcionar uma efetiva proteção ao SEP, atingindo uma taxa de acerto de 97% para todo o conjunto de situações consideradas. Para os casos aonde erroneamente a filosofia veio a caracterizar a sua resposta, estes estavam associados ou a percentagens de 95% do

comprimento da LT, ou a resistências de faltas extremas (0Ω ou 200Ω). Por estes testes, pode-se indicar a possibilidade de uma extensão da zona de proteção primária muito além dos 80% fixos e aplicados às filosofias convencionais.

Capítulo 5

Conclusões

O trabalho desenvolvido teve como meta uma melhor aplicação da proteção digital de distância adaptativa, tendo como motivação o uso de um sistema multi-agentes advindo da inteligência artificial. Este foi apresentado e aplicado, juntamente a uma rede de comunicação dedicada, do tipo *Intranet*. Pela abordagem apresentada, buscou-se permitir ajustes adaptativos aos relés associados à função de proteção digital de distância, imprimindo à mesma, características flexíveis e difíceis de serem alcançadas pelas técnicas convencionais.

Dos testes relativos à verificação dos tempos de atualização das curvas de proteção adaptativas, observou-se que em redes de comunicação sobre um tráfego leve, sua aplicação é praticável considerando os baixos tempos obtidos.

Tempos similares também foram obtidos quando o sistema foi submetido a cenários de tráfego médio e pesado a partir da definição das larguras de banda dos *links* de comunicação com valores de no mínimo 3Mbits/s e 15MBtis/s, respectivamente. Isto permitiu concluir que a aplicação do SMA proposto é viável em qualquer circunstância de tráfego, desde que haja largura de banda suficiente. Contudo, cabe colocar que o valor da largura de banda para que haja esta suficiência não é facilmente definida. Entretanto, levando em consideração a disponibilidade de links de banda larga via Internet a cabo ou operadoras de telefonia, as quais colocam a disposição do assinante uma largura de banda constante, mesmo sobre um tráfego sobrecarregado, a aplicação do SMA proposto neste trabalho se torna viável.

A partir da definição da provável estrutura do SMA a ser implementado, uma criteriosa análise do problema abordado foi então realizada. Como conclusão desta análise, verificaram-se áreas específicas, as quais estavam localizadas espacialmente em regiões distintas do sistema elétrico. Este fato foi decisivo para a escolha da técnica de coordenação (decomposição espacial) utilizada. Com isso, para cada área específica denotada, foi desenvolvido um Agente de *software* cujas funções foram adequadas à solução do problema local.

Ressalta-se que a escolha da tecnologia de Agentes como ferramenta para o provimento da solução ao problema abordado se fez pela adequada correlação entre as características inerentes aos Agentes, evidenciadas em seu conceito, e as funções a serem realizadas para uma eficaz aplicação da proteção digital de distância adaptativa.

Diversos testes foram realizados visando à obtenção de dados relativos às vantagens da aplicação da proteção digital de distância adaptativa em comparação à proteção de distância convencional. Dos resultados observados, conclui-se que um sistema de proteção dispondo da abordagem apresentada se mostra mais eficiente, garantindo uma melhor flexibilidade e confiabilidade, evitando atuações indevidas, as quais podem causar grandes e inconvenientes prejuízos tanto às concessionárias de energia elétrica quanto aos consumidores finais.

Diante dos resultados apresentados para análise da eficácia da aplicação de um sistema multi-agente para o provimento da proteção digital de distância adaptativa, fica evidente que esta metodologia é recomendável. Por esta metodologia, evidencia-se um alto nível de flexibilidade e de confiança quanto ao desempenho do sistema de proteção. Dos testes, pôde-se observar uma melhora em algumas características inerentes ao SP dispondo da CPA em relação a um SP utilizando CPQ. Dentre as observações realizadas, tem-se uma grande redução de sensibilidade no tocante à variação nas condições de operação, tornando o SP muito mais constante e eficiente frente ao dinamismo dos SEPs. Cabe colocar que pela utilização da PDDA, possibilitou-se também aumentar o alcance da proteção instantânea até um limar de 95% do comprimento da linha de transmissão, valor este impraticável para sistemas de proteção tradicionais.

Apêndice A

Código dos Agentes Implementados Utilizando o FrameWork JADE

A.1 Agente Servidor

```
import java.io.IOException;

import jade.core.AID;

import jade.core.Agent;

import jade.core.behaviours.CyclicBehaviour;

import jade.domain.FIPAAgentManagement.ServiceDescription;

import jade.lang.acl.ACLMessage;

import jade.lang.acl.UnreadableException;

public class AgenteServidor extends Agent {

    private boolean a1,a2;

    private Dados d1,d2;

    private AID executor1,executor2;

    public void setup(){
```

```
executor1=UtilClass.getService(this,"executor1");

executor2=UtilClass.getService(this,"executor2");

System.out.println(executor1);

System.out.println(executor2);

ServiceDescription sd = new ServiceDescription();

sd.setName(this.getLocalName());

sd.setType("servidor");

UtilClass.register((Agent)this,sd);

this.addBehaviour(new BehaviorServidor());

Manipulador.conectar();

a1=false;

a2=false;

}

class BehaviorServidor extends CyclicBehaviour{

public void action(){

    ACLMessage msg = receive();

    if(msg!=null){

        try{

            Datos d =(Datos) msg.getContentObject();

            System.out.println("Angulo : "+d.getAngulo());

            System.out.println("Nummedidor :"+d.getNumMedidor());

            if(d.getNumMedidor()==1){

                d1=d;

                a1=true;

            }else if(d.getNumMedidor()==2){
```

```
d2=d;

a2=true;

}

if(a1 && a2){

a1=false;

a2=false;

Poligono pols[];

pols=Manipulador.getFormaZona(Math.abs(d1.getAngulo()-d2.getAngulo()), d1.getTensao(),d2.getTensao(),
d1.getCapacidade(),d2.getCapacidade()); ACLMessage msge ;

try{

System.out.println("Enviou dados"); msge = new ACLMessage(ACLMessage.INFORM);

msge.addReceiver(executor1);

msge.setContentObject(pols[0]);

send(msge);

msge = new ACLMessage(ACLMessage.INFORM); msge.addReceiver(executor2);

msge.setContentObject(pols[1]);

send(msge);

}catch(IOException ex){

System.out.println("Erro ao serializar objetos");

ex.printStackTrace();

}

}

}

catch(UnreadableException ex){

System.out.println("Erro ao ler objeto");
```

```
ex.printStackTrace();  
  
}  
  
}  
  
block();  
  
}  
  
}  
  
}
```

A.2 Agente Sensor

```
import java.io.IOException;  
  
import jade.core.AID;  
  
import jade.core.Agent;  
  
import jade.gui.GuiAgent;  
  
import jade.gui.GuiEvent;  
  
import jade.lang.acl.ACLMessage;  
  
public class AgenteMedidor extends GuiAgent {  
  
    AID servidor;  
  
    AgenteMedidorGui gui;  
  
    int num;  
  
    public static final int MANDA=100;  
  
    public void setup(){  
  
        Object args[] = getArguments();  
  
        servidor = UtilClass.getService(this, "servidor");  
  
        gui = new AgenteMedidorGui(this);
```

```
num = Integer.valueOf((String)args[0]);

}

protected void onGuiEvent(GuiEvent arg0) {

switch (arg0.getType()){

case AgenteMedidor.MANDA :

    ACLMessage msg = new ACLMessage(ACLMessage.INFORM);

    msg.setContent("enviou o objeto");

    Dados d =(Dados) arg0.getParameter(0);

    d.setNumMedidor(num);

    try{

        msg.setContentObject(d);

    }catch(IOException ex){

        System.out.println("Erro ao serializar");

    }

    msg.addReceiver(servidor);

    this.send(msg);

}

}

}
```

A.3 Agente Executor

```
import java.awt.BorderLayout;

import javax.swing.JFrame;

import jade.core.Agent;
```

```
import jade.core.behaviours.CyclicBehaviour;

import jade.domain.FIPAAgentManagement.ServiceDescription;

import jade.lang.acl.ACLMessage;

import jade.lang.acl.UnreadableException;

public class AgenteExecutor extends Agent {

    private int num;

    private TelaZona tz;

    public void setup(){

        Object args[] = getArguments();

        num = Integer.valueOf((String)args[0]);

        ServiceDescription sd = new ServiceDescription();

        sd.setName(getLocalName());

        sd.setType("executor"+num);

        UtilClass.register(this, sd);

        JFrame jf = new JFrame();

        jf.getContentPane().setLayout(new BorderLayout());

        tz = new TelaZona("Agente "+num,400,400,10,10);

        jf.getContentPane().add(tz,BorderLayout.CENTER);

        jf.setSize(600,400);

        jf.setTitle(this.getLocalName());

        jf.setVisible(true);

        this.addBehaviour(new BehaviorExecutor());

    }

    class BehaviorExecutor extends CyclicBehaviour{

        public void action(){
```



```
ACLMessage msg = receive();

if(msg!=null){

    Poligono pol;

    System.out.println("Recebido o poligono");

    try{

        pol=(Poligono)msg.getContentObject();

        tz.LimpaTela();

        tz.addPoligono(pol);

    }catch(UnreadableException ex){

        System.out.println("Erro ao ler objeto");

        ex.printStackTrace();

    }

    }block();

}

}
```


Apêndice B

Código do Arquivo TCL Utilizado na Aferição dos Tempos de Atualização das CPAs

O código abaixo trata de umas das simulações realizadas, a qual caracteriza um tráfego leve, sendo os links de comunicação configurados com uma largura de banda de 1Mbps/s:

```
set ns [new Simulator]

$ns rtproto DV

set tf [open tcpTeste.tr w]

$ns trace-all $tf

set nf [open tcpTeste.nam w]

$ns namtrace-all $nf

#constantes

set delay10 10ms

set delay50 50ms

set delay100 100ms

set delay150 150ms
```

```
set delay200 200ms

set delay250 250ms

set larguraBanda 1Mb

set trafMaior 1024

set trafMenor 284

# pedido de reenvio

set trafProtPed 10

# Trafego Sensor -> Servidor:  $3*4(4==float) + 20 (ipv4) + 20 (tcp)$ 

set trafSensorServ 12

# Trafego Servidor -> Executor:  $36*4(4==float) + 20 (ipv4) + 20 (tcp)$ 

set trafServExec 144

set flagTest 0

set flagTest2 0

set tempoMaximo 1.5

set tempoMaxSinc 1.0

#Open the output files

#bandwidth total link 0-4

set f0 [open outbw0.tr w]

#bandwidth 1024 link 0-4

set f1 [open outbw1.tr w]

#bandwidth 284 link 0-4

set f2 [open outbw2.tr w]

#bandwidth 40 (protocolo) link 0-4

set f3 [open outbw3.tr w]

#bandwidth total link 4-2
```

```
set f4 [open outbw4.tr w]

#bandwidth 1024 link 4-2

set f5 [open outbw5.tr w]

#bandwidth 284 link 4-2

set f6 [open outbw6.tr w]

#bandwidth 1324 (protocolo) link 4-2

set f7 [open outbw7.tr w]

proc finish

global ns nf tf

$ns flush-trace

close $nf

close $tf

exec nam tcpTeste.nam &

exit 0

proc fowardPacket

global sink1 ftp0 ftp1 ftp2 ftp3 ftp4 ftp5 flagTest flagTest2 tempoMaximo tempoMax-
Sinc

set ns [Simulator instance]

set time 0.001

set c [$sink1 set flagS]

set fs [$sink1 set flagSinc]

set t1 [$sink1 set tempoSend1]

set t2 [$sink1 set tempoSend2]

set flagDiffFunc [$sink1 set flagDifNodeFunc]

set r0 [$sink1 set ret0]
```

```
set r1 [$sink1 set ret1]

set now [$ns now]

set deltat1 0

set deltat2 0

if [expr $t1 > 0]

set deltat1 [expr $now-$t1]

else

set deltat1 0

if [expr $t2 > 0]

set deltat2 [expr $now-$t2]

else

set deltat2 0

if [expr [ expr $deltat1 > $tempoMaximo] || [expr $deltat2 > $tempoMaximo] ] then

$sink1 set ret0 1

$sink1 set ret1 1

$sink1 set tempoSend1 -1

$sink1 set tempoSend2 -1

$ns at [expr $now + $time] "$ftp3 producemore 1"

$ns at [expr $now + $time] "$ftp4 producemore 1"

elseif [expr [ expr $t1 > 0 ] && [ expr $t2 > 0 ] ]

if [expr abs([expr $t1 - $t2]) > $tempoMaxSinc]

$sink1 set ret0 1

$sink1 set ret1 1

$sink1 set tempoSend1 -1

$sink1 set tempoSend2 -1
```

```

$ns at [expr $now + $time] "$ftp3 producemore 1"

$ns at [expr $now + $time] "$ftp4 producemore 1"

else

$sink1 set ret0 3

$sink1 set ret1 3

$sink1 set tempoSend1 -1

$sink1 set tempoSend2 -1

$ns at [expr $now+$time] "$ftp2 producemore 1"

$ns at [expr $now+$time] "$ftp5 producemore 1"

#Estes metodos servem para retransmitir caso apenas um pacote seja recebido ou
estejam dessincronizados

if $r0==0

$ns at [expr $now + $time] "$ftp0 producemore 1"

$sink1 set ret0 3

if $r1==0

$ns at [expr $now + $time] "$ftp1 producemore 1"

$sink1 set ret1 3

$ns at [expr $now+$time] "fowardPacket"

proc inicializacao

global sink0 sink1 sink2

$sink0 set flagLocal 0

$sink1 set flagLocal 0

$sink2 set flagLocal 1

$sink1 set ret0 3

$sink1 set ret1 3

```

\$sink1 set Serv 4

\$sink1 set Exec2 2

\$sink1 set Exec1 1

\$sink1 set Sensor2 3

\$sink1 set Sensor1 0

set n0 [\$ns node]

set n1 [\$ns node]

set n2 [\$ns node]

set n3 [\$ns node]

set n4 [\$ns node]

set n5 [\$ns node]

set n6 [\$ns node]

set n7 [\$ns node]

set n8 [\$ns node]

set n9 [\$ns node]

set n10 [\$ns node]

\$ns duplex-link \$n10 \$n4 \$larguraBanda 10ms DropTail

\$ns duplex-link \$n8 \$n3 \$larguraBanda 10ms DropTail

\$ns duplex-link \$n9 \$n3 \$larguraBanda 10ms DropTail

\$ns duplex-link \$n5 \$n0 \$larguraBanda 10ms DropTail

\$ns duplex-link \$n6 \$n0 \$larguraBanda 10ms DropTail

\$ns duplex-link \$n7 \$n4 \$larguraBanda 10ms DropTail

\$ns duplex-link \$n10 \$n4 \$larguraBanda 10ms DropTail

\$ns duplex-link \$n0 \$n1 \$larguraBanda 10ms DropTail

\$ns duplex-link \$n0 \$n4 \$larguraBanda 10ms DropTail

```

$ns duplex-link $n1 $n2 $larguraBanda 10ms DropTail
$ns duplex-link $n2 $n3 $larguraBanda 10ms DropTail
$ns duplex-link $n3 $n4 $larguraBanda 10ms DropTail
$ns duplex-link $n1 $n4 $larguraBanda 10ms DropTail
$ns duplex-link $n2 $n4 $larguraBanda 10ms DropTail

$ns duplex-link-op $n10 $n4 orient down

$ns duplex-link-op $n8 $n3 orient left-down

$ns duplex-link-op $n9 $n3 orient left-up

$ns duplex-link-op $n7 $n4 orient left-up

$ns duplex-link-op $n10 $n4 orient right-up

$ns duplex-link-op $n5 $n0 orient right-down

$ns duplex-link-op $n6 $n0 orient right-up

$ns duplex-link-op $n1 $n2 orient right

$ns duplex-link-op $n0 $n4 orient right

$ns duplex-link-op $n3 $n4 orient left

$ns duplex-link-op $n0 $n1 orient right-up

$ns duplex-link-op $n3 $n2 orient left-up

$ns duplex-link-op $n4 $n2 orient right-up

$ns duplex-link-op $n4 $n1 orient left-up

#agentes utilizados pelo protocolo

set tcp0 [new Agent/TCP]

$ns attach-agent $n0 $tcp0

$ tcp0 set fd_ 2

$tcp0 set packetSize_ $trafSensorServ

set sink0 [new Agent/TCPSink]

```

```
$ns attach-agent $n4 $sink0

$ns connect $tcp0 $sink0

set tcp1 [new Agent/TCP]

$ns attach-agent $n3 $tcp1

$tcp1 set fid_ 1

$tcp1 set packetSize_ $trafSensorServ

set sink1 [new Agent/TCPSink]

$ns attach-agent $n4 $sink1

$ns connect $tcp1 $sink1

set tcp2 [new Agent/TCP]

$ns attach-agent $n4 $tcp2

$tcp2 set fid_ 1

$tcp2 set packetSize_ $trafServExec

set sink2 [new Agent/TCPSink]

$ns attach-agent $n2 $sink2

$ns connect $tcp2 $sink2

set tcp3 [new Agent/TCP]

$ns attach-agent $n4 $tcp3

$tcp3 set fid_ 2

$tcp3 set packetSize_ $trafProtPed

set sink3 [new Agent/TCPSink]

$ns attach-agent $n0 $sink3

$ns connect $tcp3 $sink3

set tcp4 [new Agent/TCP]

$ns attach-agent $n4 $tcp4
```

```
$tcp4 set fid_ 2

$tcp4 set packetSize_ $trafProtPed

set sink4 [new Agent/TCPSink]

$ns attach-agent $n3 $sink4

$ns connect $tcp4 $sink4

set tcp5 [new Agent/TCP]

$ns attach-agent $n4 $tcp5

$tcp5 set fid_ 2

$tcp5 set packetSize_ $trafServExec

set sink5 [new Agent/TCPSink]

$ns attach-agent $n1 $sink5

$ns connect $tcp5 $sink5

#fim dos agentes utilizados pelo protocolo

#geradores de tráfico utilizados pelo protocolo

set ftp0 [new Application/FTP]

$ftp0 attach-agent $tcp0

set ftp1 [new Application/FTP]

$ftp1 attach-agent $tcp1

set ftp2 [new Application/FTP]

$ftp2 attach-agent $tcp2

set ftp3 [new Application/FTP]

$ftp3 attach-agent $tcp3

set ftp4 [new Application/FTP]

$ftp4 attach-agent $tcp4

set ftp5 [new Application/FTP]
```

\$ftp5 attach-agent \$tcp5

#fim dos geradores de trafego utilizados pelo protocolo

#agentes de trafegos

set udp5 [new Agent/UDP]

\$ns attach-agent \$n5 \$udp5

\$udp5 set fid_ 2

set null5 [new Agent/LossMonitor]

\$ns attach-agent \$n4 \$null5

\$ns connect \$udp5 \$null5

set udp6 [new Agent/UDP]

\$ns attach-agent \$n6 \$udp6

\$udp6 set fid_ 2

set null6 [new Agent/LossMonitor]

\$ns attach-agent \$n4 \$null6

\$ns connect \$udp6 \$null6

set udp8 [new Agent/UDP]

\$ns attach-agent \$n8 \$udp8

\$udp8 set fid_ 2

set null8 [new Agent/LossMonitor]

\$ns attach-agent \$n4 \$null8

\$ns connect \$udp8 \$null8

set udp9 [new Agent/UDP]

\$ns attach-agent \$n9 \$udp9

\$udp9 set fid_ 2

set null9 [new Agent/LossMonitor]

```
$ns attach-agent $n4 $null9

$ns connect $udp9 $null9

set udp7 [new Agent/UDP]

$ns attach-agent $n7 $udp7

$udp7 set fid_ 2

set null7 [new Agent/LossMonitor]

$ns attach-agent $n2 $null7

$ns connect $udp7 $null7

set udp10 [new Agent/UDP]

$ns attach-agent $n10 $udp10

$udp10 set fid_ 2

set null10 [new Agent/LossMonitor]

$ns attach-agent $n1 $null10

$ns connect $udp10 $null10

#fim de agentes de trafegos

#geradores de trafegos

#pesados

set cbr0 [new Application/Traffic/CBR]

$cbr0 set packetSize_ $trafMaior

$cbr0 set interval_ 0.0005

$cbr0 attach-agent $udp5

set cbr2 [new Application/Traffic/CBR]

$cbr2 set packetSize_ $trafMaior

$cbr2 set interval_ 0.0005

$cbr2 attach-agent $udp8
```

```
set cbr4 [new Application/Traffic/CBR]
```

```
$cbr4 set packetSize_ $trafMaior
```

```
$cbr4 set interval_ 0.0005
```

```
$cbr4 attach-agent $udp10
```

```
#leves
```

```
set cbr1 [new Application/Traffic/CBR]
```

```
$cbr1 set packetSize_ $trafMenor
```

```
$cbr1 set interval_ 0.0005
```

```
$cbr1 attach-agent $udp6
```

```
set cbr3 [new Application/Traffic/CBR]
```

```
$cbr3 set packetSize_ $trafMenor
```

```
$cbr3 set interval_ 0.0005
```

```
$cbr3 attach-agent $udp9
```

```
set cbr5 [new Application/Traffic/CBR]
```

```
$cbr5 set packetSize_ $trafMenor
```

```
$cbr5 set interval_ 0.0005
```

```
$cbr5 attach-agent $udp7
```

```
#fim geradores de trafegos
```

```
$ns at 0.0 "$ftp0 producemore 1"
```

```
$ns at 0.0 "$ftp1 producemore 1"
```

```
$ns at 20.0 "finish"
```

```
$ns at 0.0 "inicializacao"
```

```
$ns at 0.0 "forwardPacket"
```

```
$ns run
```

Referências Bibliográficas

- Amon Filho, J. e M. Pereira (1996). *ATP Alternative Transient Program: curso básico sobre a utilização do ATP*. CLAUE - Comitê Latino Americano de Usuários do EMTP/ATP.
- Bellifemine, F., G. Caire, D. Greenwood, e I. NetLibrary (2007). *Developing Multi-agent Systems with JADE*. Springer.
- Bellman, R. (1978). *An Introduction to Artificial Intelligence: Can Computers Think?* Thomson Course Technology.
- Brustoloni, J. (1991). Autonomous Agents: Characterization and Requirements. *Computer Science Technical Report*, 91–204.
- Charniak, E. e D. McDermott (1985). *Introduction to artificial intelligence*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc. Boston, MA, USA.
- Coury, D., M. Oleskovicz, e R. Giovanini (2007). *PROTEÇÃO DIGITAL DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA: dos relés eletromecânicos aos microprocessados inteligentes*. EESC-USP, São Carlos, SP.
- Coury, D., J. Thorp, K. Hopkinson, e K. Birman (2002). An agent-based current differential relay for use with a utility intranet. *Power Delivery, IEEE Transactions on* 17(1), 47–53.
- Delmont Filho, O. (2007). *Um algoritmo para detecção, localização e classificação de distúrbios na qualidade da energia elétrica utilizando a transformada wavelet*. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

- EEUG (1987). *Alternative Transients Program Rule Book*. LEC.
- FIPA (2009). The foundation for intelligent physical agents. Disponível em <http://www.fipa.org>.
- Giovanini, R., D. Coury, K. Hopkinson, e J. Thorp (2006). A primary and backup cooperative protection system based on wide area agents. *IEEE Transactions on Power Delivery* 21(3), 1222–1230.
- Haugeland, J. (1985). *Artificial Intelligence: The Very Idea*. MIT Press.
- Hayes-Roth, B. (1995). An architecture for adaptive intelligent systems. *Artificial Intelligence* 72(1-2), 329–365.
- Hopkinson, K., K. Birman, R. Giovanini, D. Coury, X. Wang, e J. Thorp (2003). EPOCHS: integrated commercial off-the-shelf software for agent-based electric power and communication simulation. *Simulation Conference, 2003. Proceedings of the 2003 Winter 2*.
- Jena (2009). A semantic web framework for java. Disponível em <http://jena.sourceforge.net>.
- Kinderman, G. (1999). Proteção de Sistemas Elétricos de Potência, Volume 1, Edição do Autor. *Links*.
- Kurzweil, R. (1990). *The age of intelligent machines*. MIT Press.
- Maes, P. (1995). Artificial life meets entertainment: lifelike autonomous agents. *Communications of the ACM* 38(11), 108–114.
- MySQL (2007). *MySQL - Manual de Referência do MySQL 4.1*. Mysql.
- NS-2 (2009). The network simulator 2. Information Sciences Institute. Disponível em <http://isi.edu/nsnam/ns/>.
- Oleskovicz, M. (2001). *Aplicação de redes neurais artificiais na proteção de distância*. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

-
- OPNET (2009). Opnet technologies. Disponível em <http://www.opnet.com>.
- Phadke, A. e J. Thorp (1988). *Computer relaying for power systems*.
- Poole, D., A. Mackworth, e R. Goebel (1997). *Computational intelligence: a logical approach*. Oxford University Press Oxford, UK, UK.
- Russell, S. e P. Norvig (2003). *Artificial Intelligence: a modern approach*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA.
- SERRA, C. (1993). *Teoria e Projeto de Filtros*.
- Shono, T., K. Sekiguchi, T. Tanaka, e S. Katayama (2002). A remote supervisory system for a power system protection and control unit applying mobile agent technology. *Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES 1*.
- Silberschatz, A., H. Korth, S. Sudarshan, L. de Souza, e D. Vieira (2006). *Sistema de banco de dados*. Elsevier Campus.
- Silva, B., R. Silva, M. Oleskovicz, e D. Coury (2008a). Proteção Digital de Distância Adaptativa Utilizando um Sistema Multi-Agentes em uma Rede Intranet. *IX Seminário Técnico de Proteção e Controle, Belo Horizonte (MG)*.
- Silva, B. C., R. F. M. d. Silva, M. Oleskovicz, e D. V. Coury (2008b). Utilização de um Sistema Multi-Agentes em Redes de Comunicação para a Proteção Digital de Distância Adaptativa, XVII CBA. *Congresso Brasileiro de Automática, Juiz de Fora, MG*.
- Silva, M. (2008). *Implementação de um localizador de faltas híbrido para linhas de transmissão com três terminais baseado na Transformada Wavelet*. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Smith, D., A. Cypher, e J. Spohrer (1994). KidSim: programming agents without a programming language. *Communications of the ACM* 37(7), 54-67.
- Souza, S. A. d. (2008). *Algoritmos genéticos aplicados à proteção e estimação de harmônicos em sistemas elétricos de potência*. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

- Stevenson Jr, W. (1974). Elementos de Análise de Sistemas de Potência. *Ed. McGraw-Hill do Brasil, Rio de Janeiro.*
- Suehring, S. (2002). *MySQL Bible*. Wiley.
- Tanenbaum, A. (2003). *Redes de Computadores, Ed. Campus-Tradução da Terceira Edição*, Rio de Janeiro.
- Tomita, Y., C. Fukui, H. Kudo, J. Koda, e K. Yabe (1998). A cooperative protection system with an agent model. *Power Delivery, IEEE Transactions on* 13(4), 1060–1066.
- Weiss, G. (1999). *Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*. MIT Press.
- Winston, P. H. (1992). *Artificial Intelligence*. Addison-Wesley , Massachusetts.
- Wooldridge, M. e N. Jennings (1995). Agent Theories, Architectures, and Languages: A Survey. *Intelligent Agents* 22.
- Woolridge, M. e M. Wooldridge (2002). *Introduction to Multiagent Systems*. John Wiley & Sons, Inc. New York, NY, USA.
- Yang, Z., Z. Lu, C. Ma, e Q. Wu (2006). Improving Control Ability of Relay Protection System with Intelligent Agents. *International Conference on Power System Technology*.
- Yanxia, C., Y. Xianggen, Z. Zhe, C. Deshu, e Z. Xiangjun (2002). Research on protective relaying systems based on multi-agent system. *Power System Technology, 2002. Proceedings. PowerCon 2002. International Conference on* 2.