



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

TESE DE DOUTORADO

**ESTRATÉGIAS BASEADAS EM ANÁLISE MULTICRITÉRIO PARA
SELEÇÃO DE TECNOLOGIA DE ACESSO DE PRIMEIRA MILHA EM
PADRÃO ISDB-T**

MARCOS CÉSAR DA ROCHA SERUFFO

BELÉM/PA

2012



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MARCOS CÉSAR DA ROCHA SERUFFO

**ESTRATÉGIAS BASEADAS EM ANÁLISE MULTICRITÉRIO PARA
SELEÇÃO DE TECNOLOGIA DE ACESSO DE PRIMEIRA MILHA EM
PADRÃO ISDB-T**

Tese de doutorado apresentada como exigência para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica, elaborada sob a orientação do Prof. Dr. Carlos Renato Lisboa Francês.

BELÉM/PA

2012

**ESTRATÉGIAS BASEADAS EM ANÁLISE MULTICRITÉRIO PARA SELEÇÃO DE
TECNOLOGIA DE ACESSO DE PRIMEIRA MILHA EM PADRÃO ISDB-T**

MARCOS CÉSAR DA ROCHA SERUFFO

Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica, e aprovada na sua forma final, pela banca examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, do Instituto de Tecnologia, da Universidade Federal do Pará, em 23 de Novembro de 2012.

Prof. Dr. Carlos Renato Lisboa Francês (PPGEE - UFPA) - ORIENTADOR

Prof. Dr. Guido Lemos de Souza Filho (LAVID – UFPB) – MEMBRO EXTERNO

Prof. Dr. Celso Massaki Hirata (IEC-ITA) - MEMBRO EXTERNO

Prof. Dr. Nandamudi Lankalapalli Vijaykumar (LAC-INPE) - MEMBRO EXTERNO

Prof. Dr. Claudio Alex Jorge da Rocha (IFPA) - MEMBRO EXTERNO

Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes (PPGEE-UFPA) - MEMBRO INTERNO

VISTO:

Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes - Coordenador do PPGEE/CT/UFPA

BELÉM/PA

2012

*Não dê as costas a possíveis futuros antes
de ter certeza de que não tem nada a
aprender com eles.”*

Richard Bach

*“Quando é necessário mudar? Antes que
seja necessário.”*

Claus Muller

A Deus, meus pais, minha esposa, meu filho, meus irmãos, e meus amigos, por terem tornado toda a jornada e momentos deste trabalho outrora árduos bem mais amenos.

AGRADECIMENTOS

A **Deus** por ter me iluminado e me dado forças para continuar lutando.

Aos meus pais **Paulo César da Lima Seruffo** e **Elma Nazaré da Rocha Seruffo** por todo amor e suporte dado em todos os momentos. Sem eles, não teria chegado a lugar algum. Os melhores pais do mundo.

A minha esposa **Maria Inez Barbosa Seruffo** e ao meu filho **Paulo Arthur Barbosa Seruffo** por estarem sempre ao meu lado, em todos os momentos. Eu os amo muito!

Aos meus irmãos **Paulo e Heloisa Seruffo** pelo companheirismo e carinho.

Aos meus familiares **José Barbosa e Sônia Maria** pelo apoio nesta jornada.

As minhas princesinhas **Victoria, Manuella e Gabriela**.

Ao meu orientador e amigo **Renato Francês** pela orientação prestada, compreensão, paciência e incentivo durante o desenvolvimento de mais esta jornada. Obrigado pela confiança mais uma vez!

Ao professor e amigo **João Crisóstomo** pelo apoio.

Aos meus amigos do LPRAD **Diego, Marcelino, Natalino, Patrick, Livika, Edvar, Nei, Jacob, Jams e Ulisses** que me acompanharam nas jornadas de estudos.

Um agradecimento especial ao meu amigo **Ádamo Santana**, que teve muita paciência em me ajudar no desenvolvimento do modelo de inteligência computacional.

Aos meus amigos pessoais **Heldo e Cris** pelo companheirismo.

As minhas alunas **Aline e Tamires**, pela ajuda prestada.

Ao **CNPq, PROCAD/CAPES, CTIC/RNP, VALE, FAPESPA** e principalmente ao **LPRAD/UFPA**, pelo suporte fornecido, em alguns casos financeiros, outros autorizando dispensas para viagens e para realização das pesquisas bibliográficas e medições. Um agradecimento especial à **UFPA/Campus Castanhal**, pelo investimento em minha carreira de docente.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xiii
RESUMO	xv
ABSTRACT	xvi
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 - CONTEXTUALIZAÇÃO.....	1
1.2 - DEFINIÇÃO DE HIPÓTESE.....	3
1.3 – OBJETIVOS.....	3
1.3.1 GERAL.....	3
1.3.2 ESPECÍFICOS.....	3
1.4 – ESTADO DA ARTE.....	4
1.5 – PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES.....	4
1.6 – ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	6
2. TV DIGITAL INTERATIVA	8
2.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	8
2.2 – CONCEITOS GERAIS.....	8
2.3 – PADRÕES ISDB-T E SBTVD	10
2.4 – CANAIS DE RETORNO	16
2.4.1 POWER LINE COMMUNICATIONS (PLC).....	17
2.4.2 WORLDWIDE INTEROPERABILITY FOR MICROWAVE ACCESS (WiMAX).....	20
2.4.3 DIGITAL SUBSCRIBER LINE (DSL).....	22
2.4.4 REDES CELULARES DE TERCEIRA GERAÇÃO (3G).....	24
2.4.5 COMPARAÇÃO ENTRE AS TECNOLOGIAS UTILIZADAS.....	26
2.5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	27
3. MODELO PARA TOMADA DE DECISÃO	28
3.1 – MÉTODOS ANALÍTICOS	28

3.1.1 – MÉTODO AHP.....	30
3.1.2 – MÉTODO TOPSIS.....	34
3.1.3 – FAMÍLIA DE MÉTODOS ELECTRE.....	36
3.1.4 – MÉTODO ELECTRE III.....	37
3.2 – MODELOS DE INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL: REDES BAYESIANAS.....	40
3.2.1. – CONSTRUÇÃO DE REDES BAYESIANAS.....	43
3.2.2 – APRENDIZADO DE REDES BAYESIANAS.....	44
3.2.3 – APRENDIZADO DA ESTRUTURA DE REDES BAYESIANAS.....	45
3.3 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	48
4. TRABALHOS CORRELATOS.....	49
4.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	49
4.2 – TV DIGITAL E O SBTVD.....	49
4.3 – APLICAÇÕES INTERATIVAS PARA TV DIGITAL.....	50
4.4 – CANAIS DE RETORNO.....	52
4.5 – GERAÇÃO DE CARGA E TV DIGITAL INTERATIVA.....	53
4.6 – PROVIMENTO DE SERVIÇO.....	54
4.7 – SUPORTE À DECISÃO – HEURÍSTICAS PARA SELEÇÃO DE CANAL DE RETORNO EM AMBIENTES HETEROGÊNEOS.....	56
4.7.1 – SUPORTE À DECISÃO VIA AHP, ELECTRE, TOPSIS e FUZZY.....	57
4.7.2 – SUPORTE À DECISÃO VIA REDES BAYESIANAS.....	60
4.8 – SÍNTESE DOS TRABALHOS CORRELATOS.....	61
4.9 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	63
5. ESTRATÉGIA DE ANÁLISE MULTICRITÉRIO PARA SELEÇÃO DE TECNOLOGIA DE CANAL DE RETORNO NO PADRÃO ISDB-T.....	64
5.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	64
5.2 – DEFINIÇÃO DOS CANAIS DE RETORNO E DAS MÉTRICAS DE DESEMPENHO.....	65
5.3 – MEDIÇÕES EM CENÁRIOS REAIS.....	66
5.4 – SIMULAÇÃO DOS DADOS EM AMBIENTES SIMULADOS.....	70
5.4.1 – DEFINIÇÃO DOS FLUXOS PARA SIMULAÇÃO.....	70
5.4.2 – SIMULAÇÕES DOS CENÁRIOS.....	72
5.5 – GERAÇÃO DO VETOR PESO.....	78

5.6 – MÉTODOS ANALÍTICOS DE TOMADA DE DECISÃO	85
5.7 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	85
6. ESTUDO DE CASOS E RESULTADOS NUMÉRICOS	87
6.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS	87
6.2 – AFERIÇÕES DE CANAIS DE RETORNO PARA TOMADA DE DECISÃO.....	87
6.2.1 – CENÁRIOS PARA ANÁLISE DAS REDES.....	88
6.2.2 – RESULTADOS ALCANÇADOS.....	93
6.3 – APLICAÇÃO DE MÉTODOS ANALÍTICOS NO ESTUDO DE CASO.....	95
6.3.1 TOPSIS	95
6.3.2 ELECTRE III	98
6.4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	99
7. CONCLUSÃO.....	100
7.1 CONSIDERAÇÕES DA TESE	100
7.2 CONTRIBUIÇÕES E COMPROVAÇÃO DA HIPÓTESE.....	101
7.3 DIFICULDADES ENCONTRADAS	102
7.4 DESDOBRAMENTO E TRABALHOS FUTUROS	103
7.5 DIVULGAÇÃO DOS RESULTADOS E APLICAÇÃO DOS CONHECIMENTOS GERADOS NESTA TESE	104
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS COMPLEMENTARES.....	116

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Macro Arquitetura da Plataforma Openginga	15
Figura 2.2 - Visão do Sistema PLC	18
Figura 2.3 - Classificação das Redes sem Fio	21
Figura 2.4 - Estrutura Básica da DSL	23
Figura 3.1 - Modelo de Matriz de Prioridades de Critérios	32
Figura 3.2 - Curvas de Indiferença no TOPSIS (HWANG & YOON, 1981).....	36
Figura 3.3 - Exemplo de uma rede Bayesiana (HECKERMAN, 1997).	41
Figura 3.4 - Algumas estruturas possíveis de Redes Bayesianas para as variáveis A, B e C	47
Figura 4.1 - Ilustração do Problema da Primeira Milha (LEVIN, 2011) – traduzido com adaptações.....	56
Figura 5.1 - Etapas da estratégia de tomada de decisão.....	64
Figura 5.2 - Estrutura Geral para Tomada de Decisão.	65
Figura 5.3 - Infraestrutura para Caracterização de Carga do Aplicativo Interativo.....	67
Figura 5.4 - Aplicativo TVD-Educ 2.0 durante uma conversa no <i>chat</i>	68
Figura 5.5 - Função de Distribuição de Probabilidade do Intervalo de Tempo entre os Pacotes (<i>Weibull</i>).....	69
Figura 5.6 - Função de Distribuição de Probabilidade do Tamanho dos Pacotes (<i>Lognormal</i>)	69
Figura 5.7 – Cenário Montado no Simulador OPNET – 32 usuários	73
Figura 5.8 – Cenário Montado no Simulador OPNET – 200 usuários	73
Figura 5.9 - Definição dos fluxos no OPNET	74
Figura 5.10: Configuração de TVD.....	74
Figura 5.11: Configuração de Voz	74
Figura 5.12: Config. de Vídeo.....	74
Figura 5.13 - Valores de atraso para 40 usuários.....	76
Figura 5.14 - Parte da Base de Dados tratada para Redes Bayesianas.....	77
Figura 5.15 - Rede Bayesiana Gerada	80
Figura 5.16 - Distribuição de Probabilidade.....	80
Figura 5.17 - Impacto do primeiro estado de conexões ativas sobre vazão.....	82
Figura 5.18 - Impacto do segundo, terceiro e quarto estado de conexões ativas sobre vazão	82
Figura 6.1 – Cenário geral dos testes com PLC.....	88

Figura 6.2 - Poste com acoplador que interliga o PLC	89
Figura 6.3 – Cenário geral das antenas na Universidade Federal do Pará	89
Figura 6.4 - Visão da SS e BS	90
Figuras 6.5 e 6.6 - Cabos reais que rodeiam o prédio de Engenharia Elétrica.....	91
Figura 6.7 - Cenário para testes com 3G	92
Figura 6.8 - Valores de atraso para redes cabeadas	93
Figura 6.9 - Valores de Vazão.....	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Comparação entre os Padrões da Família 802.16.....	21
Tabela 2.2 - Comparação entre as Tecnologias Utilizadas.....	26
Tabela 3.1 - Escala Fundamental de Saaty.....	31
Tabela 3.2 - Valores de RI para Matrizes Quadradas de Ordem n.....	33
Tabela 4.1 – Síntese dos Trabalhos Correlatos.....	62
Tabela 5.1 - Métricas utilizadas no modelo de tomada de decisão.....	66
Tabela 5.2 - Resultados Estatísticos para TVD-Educ 2.0.....	70
Tabela 5.3 - Parâmetros para Aplicação de TV Digital.....	71
Tabela 5.4 - Parâmetros para Aplicação de Vídeo.....	71
Tabela 5.5 - Parâmetros para Aplicação de Voz.....	72
Tabela 5.6 - Configuração do Radio WiMAX.....	75
Tabela 5.7 – Média e desvio padrão para critérios analisados.....	77
Tabela 5.8 - Matriz de Comparação entre Critérios.....	83
Tabela 5.9 - Atribuição de pesos para cada critério.....	84
Tabela 6.1 - Alguns resultados obtidos com diferentes provedores de serviço 3G.....	94
Tabela 6.2 - Resultados Obtidos em Campo para as Diferentes Tecnologias.....	95
Tabela 6.3 – Desvio Padrão das Diferentes Tecnologias analisadas.....	95
Tabela 6.4 - Matriz Decisão.....	96
Tabela 6.5 - Matriz critério normalizada.....	96
Tabela 6.6 - Matriz critério com pesos.....	97
Tabela 6.7 - Valores Ideias.....	97
Tabela 6.8 - Valores Não ideais.....	97
Tabela 6.9 - Desvio em relação ao atributo.....	97
Tabela 6.10 - <i>Ranking</i> das tecnologias com TOPSIS em ordem de melhor escolha.....	98
Tabela 6.11 - Matriz de Subordinação.....	98
Tabela 6.12 - <i>Ranking</i> das tecnologias com ELECTRE III.....	99

LISTA DE ABREVIATURAS

ABC	<i>Always Best Connected</i>
ABNT	<i>Associação Brasileira de Normas Técnicas</i>
ACC	<i>Advanced Audio Coding</i>
ADSL	<i>Asymmetric Digital Subscriber Line</i>
AHP	<i>Processo Analítico Hierárquico</i>
API	<i>Application Programming Interface</i>
ARIB	<i>Association of Radio Industries and Businesses</i>
ATSC	<i>American Television System Committee</i>
BS	<i>Base Stations</i>
CATV	<i>Cable Television</i>
CDN	<i>Code Development Network</i>
CO	<i>Central Office</i>
COFDM	<i>Coded orthogonal frequency-division multiplexing</i>
CPU	<i>Unidade Central de Processamento</i>
DHCP	<i>Dynamic Host Control Protocol</i>
DSL	<i>Digital Subscriber Line</i>
DSLAM	<i>Digital Subscriber Line Access Multiplexer</i>
DTV	<i>TV Digital</i>
DVB	<i>Digital Video Broadcasting</i>
EAD	<i>Educação à distância</i>
ELECTRE	<i>ELimination Et Choix Traduisant la REalité</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
HDSL	<i>High bit-rate Digital Subscriber Line</i>
HDTV	<i>TV em alta definição</i>
HE	<i>Head end</i>
HFC	<i>Hybrid fibre-coaxial</i>
HSDPA	<i>High Speed Downlink Packet Access</i>
HSUPA	<i>High-Speed Uplink Packet Access</i>
ICMP	<i>Internet Control Message Protocol</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
IPTV	<i>Internet Protocol Television</i>

ISDB-T	<i>Integrated Services Digital Broadcasting Terrestrial</i>
JiTV	<i>Java Interactive Television</i>
LMM	<i>Modelos lineares mistos</i>
MCDA	<i>Auxílio à Decisão por Múltiplos Critérios</i>
MCDM	<i>Método de Tomada de Decisão Multicriterial</i>
NCL	<i>Nested Context Language</i>
OFDM	<i>Orthogonal frequency-division multiplexing</i>
PLC	<i>Power line communication</i>
PSD	<i>Densidade espectral de potência</i>
QoS	<i>Qualidade de Serviço</i>
RB	<i>Rede Bayesiana</i>
SNMP	<i>Simple Network Management Protocol</i>
SS	<i>Subscriber Stations</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TOPSIS	<i>Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
VLAN	<i>Virtual Local Area Network</i>
VoIP	<i>Voice over Internet Protocol</i>
WCDMA	<i>Wide band Code Division Multiple Access</i>
WiFi	<i>Wireless Fidelity</i>
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>
WLANs	<i>Redes locais sem fio</i>
WMANs	<i>Redes metropolitanas sem fio</i>
WPANs	<i>Redes pessoais sem fio</i>
WWANs	<i>Redes mundiais sem fio</i>

RESUMO

Esta Tese propõe o desenvolvimento de uma estratégia de planejamento que combina: caracterização de carga de uma aplicação típica de TV Digital, extração de vetor peso por meio de redes de crença e tomada de decisão multicritério a partir da aplicação de métodos analíticos (TOPSIS e ELECTRE III), para fornecer suporte à decisão junto a provedores de serviços, objetivando-se permitir optar-se por uma tecnologia para canal de retorno (ADSL2+, PLC, WiMAX e 3G), considerando a carga típica de um cenário de TV Digital interativo, padrão ISDB-T. A estratégia proposta apresenta cinco etapas, sendo estas: definição dos canais de retorno e das métricas de desempenho, realização de medições das tecnologias de acesso em cenários reais, simulação dos dados em ambientes simulados, aplicação de técnicas de correlação de dados para geração do vetor peso e aplicação de métodos analíticos de tomada de decisão para escolha da melhor tecnologia a ser implantada em determinado cenário. Como resultado principal se obteve um modelo genérico e flexível que foi validado através de um estudo de caso que ordenou a preferência das tecnologias avaliadas.

Palavras-chave: Método de tomada decisão, Provedor de Serviço, Canal de Retorno, Infraestrutura de Telecomunicação e TV Digital Interativa.

ABSTRACT

This thesis proposes the development of a planning strategy that combines: load characterization of a typical Digital TV, extraction of a weight vector from belief networks, and multicriteria decision making with analytical methods (TOPSIS and ELECTRE III), providing decision support at the service providers; in order to enable the optimal choice for the return channel technology (ADSL2 +, PLC, WiMAX and 3G), considering the typical load of an interactive Digital TV scenario, standard ISDB-T. The proposed strategy has five steps: definition of return channels and performance metrics; performance measurements of access technologies in real scenarios; scenario simulation; apply correlation techniques to generate the weight vector; and application of analytical decision making for choosing the best technology to be implemented in a given scenario. As main result a generic and flexible model is presented, validated with a case study for ordering the preference of the evaluated technologies.

Keywords: *Decision Making Model, Service Provider, Return Channel, Telecommunications Infrastructure and Interactive Digital TV.*

1. INTRODUÇÃO

1.1 - CONTEXTUALIZAÇÃO

Com o desenvolvimento das redes de comunicação, que evoluem no sentido de aumentar as taxas de transmissão e estabelecer maiores garantias de qualidade de serviço, novas vertentes tecnológicas começam a ser desenhadas no cenário mundial. A crescente disseminação da informação através de meios digitais traz à tona tecnologias que vêm fortalecendo o processo de difusão da informação e melhoria da qualidade de vida da população.

O ambiente de TV Digital interativa, por exemplo, permite uma nova classe de serviços que podem ser disponibilizados via *broadcast*, juntamente com o conteúdo televisivo, onde programas interativos podem permitir a troca de informações com o usuário final. O simples fato de haver interatividade torna o ambiente televisivo totalmente diferente do sistema tradicional, o qual, por padrão, traz o usuário como agente passivo, refletindo-se tal filosofia também na produção de conteúdo a ser disponibilizado. Assim, um ponto crucial está relacionado à disponibilidade da infraestrutura de telecomunicação ser capaz de suportar novas e crescentes cargas de trabalho.

Segundo Parker (1999), a TV Digital é algo mais que imagens mais limpas e melhor qualidade de áudio; é uma eventual convergência de televisão, telefonia, Internet e computador pessoal em uma única caixa, com a promessa de acesso extraordinário a todos os tipos de informação e comunicação interativa inimaginável. Neste aspecto, é mister que provedores de serviços possam planejar a implementação de tecnologias de canal de retorno, baseando-se nas novas demandas que passam a fazer parte do ambiente de TV Digital.

Diversos desafios se apresentam à implantação de um sistema de TV Digital, entre os quais está a disseminação em grande escala, de forma que a população, principalmente localizada em áreas de difícil acesso e de baixa renda, tenha acesso a serviços a serem oferecidos via TV Digital interativa (por exemplo: *t-health*, *t-learning*, compras *online*, *chats*,

vídeo conferência e VoIP). Tal desafio está intimamente relacionado à capacidade/disponibilidade de redes de acesso, cuja capilaridade¹, deve ser potencialmente maior do que a que está atualmente disponível para serviços de Internet.

O ponto de partida da discussão em contexto é a definição da primeira milha a ser utilizada, isto é, a tecnologia na qual o usuário se conecta a uma rede de telecomunicação. Tal termo é comumente utilizado como sinônimo de tecnologia de acesso e garante a interatividade (a partir de um canal de retorno) de serviços.

Portanto, estudos devem ser realizados para que prestadores de serviços tenham noções das características de desempenho do sistema, a fim de mapear, por exemplo, comportamentos típicos, gargalos e ociosidades. Para tanto, cenários devem ser elaborados, estudados e compreendidos, de modo que as aplicações incorporadas em ambientes de TV Digital interativa estejam disponíveis para o utilizador final, de forma que os provedores possam antecipar potenciais inconsistências no sistema.

Pesquisas com tal foco, via de regra, são conduzidas combinando características das redes de acesso (canal de retorno), qualidade de serviço (QoS), associados com aplicações, grau de interatividade que as aplicações impõem ao sistema e possíveis estratégias para o planejamento da capacidade dos serviços interativos.

Ante ao exposto, esta Tese tem por objetivo primordial desenvolver uma estratégia para tomada de decisão que possibilite a provedores selecionar a melhor solução de canal de retorno para um ambiente de TV Digital interativa, baseado no padrão ISDB-T (*Integrated Services Digital Broadcasting Terrestrial*). Assim, a partir de um estudo de caracterização de carga de uma aplicação típica de TV Digital, propõe-se o desenvolvimento de uma metodologia de tomada de decisão multicritério que combina modelos de inteligência computacional, notadamente redes bayesianas, com métodos analíticos de tomada de decisão, especificamente: TOPSIS e ELECTRE III.

É importante ressaltar que a estratégia proposta é genérica e flexível, permitindo incorporar outros parâmetros e tecnologias não especificadas nesta Tese; proporcionando, assim, novos conjuntos de decisões para diversas outras possibilidades de cenários.

¹ O termo capilaridade, no contexto desta Tese, está sendo assumido como a quantidade de usuários que podem ser alcançados através de determinada tecnologia.

1.2 - DEFINIÇÃO DE HIPÓTESE

A estratégia multicritério proposta pode auxiliar na tomada de decisão de provedores de serviço, no que concerne à seleção ótima de canal de retorno em um determinado cenário, considerando o fluxo gerado pela TV Digital interativa, padrão ISDB-T.

1.3 – OBJETIVOS

1.3.1 GERAL

Desenvolver uma estratégia de tomada de decisão multicritério que combine aferição de medidas e modelagem, com o intuito de oferecer embasamento aos provedores de serviços na escolha de uma tecnologia (PLC, WiMAX, 3G ou ADSL2+) para canal de retorno, considerando o fluxo gerado por um ambiente de TV Digital interativo, padrão ISDB-T.

1.3.2 ESPECÍFICOS

São objetivos específicos desta Tese:

- Propor estratégias para caracterização de carga de uma aplicação típica de TV Digital interativa;
- Propor estratégias para definição de critérios de qualidade de serviço para tomada de decisão da melhor tecnologia de acesso;
- Realizar testes de desempenho de tecnologias de acesso em cenários reais;
- Extrapolar os resultados alcançados em cenários reais a partir de informações obtidas via simulação discreta e simuladores específicos;
- Utilizar modelos de inteligência computacional para extrair conhecimento da base de dados gerada;
- Aplicar métodos analíticos de tomada de decisão para escolha da melhor tecnologia;
- Demonstrar a validade do modelo a partir de estudos de caso;
- Avaliar os resultados alcançados, comparando-os com bibliografias de referência da área.

1.4 – ESTADO DA ARTE

Após revisão literária na área, nota-se que estão sendo realizados diversos estudos na área de TV Digital, tecnologias de acesso, desenvolvimento de aplicativos para TV Digital, suporte à decisão, provedores de serviço, seleção em redes heterogêneas, etc. Contudo, foram encontradas lacunas² que merecem atenção, entre as quais estão: estudos que utilizem estratégias de análise multicritério, utilizando métodos analíticos e de inteligência computacional, de forma combinada; implementação em cenários reais para validação das propostas; implementação de aplicativos de tomada de decisão em plataformas abertas; configuração de base de dados consolidadas, obtidas a partir de simuladores; caracterização de cargas oriundas de aferições em cenários reais; utilização de métodos analíticos a partir de vetores de pesos analisados com redes bayesianas e não em expertise de especialistas da área, como propõe outros métodos mais tradicionais como o AHP; utilização de diferentes tecnologias de acesso já consolidadas no mercado.

A partir da revisão bibliográfica realizada, nota-se que as literaturas encontradas tratam as lacunas destacadas anteriormente de forma individualizada, ou seja, cada artigo considera a solução de apenas uma ou no máximo duas lacunas, assim, não existe uma estratégia que trate, de forma conjunta, as omissões relatadas. Assim, um ponto interessante é a proposição de um trabalho que abranja todas estas lacunas.

Diante ao exposto, esta Tese apresenta uma estratégia que considera uma consistente aglutinação de utilização de medição em cenários de testes reais, correlações das variáveis envolvidas, técnicas de tomada de decisão, considerando fluxos de TV Digital interativa.

1.5 – PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES

Como principais contribuições desta Tese, destacam-se:

- Concepção de uma estratégia de análise multicritério, utilizando, de maneira combinada, métodos analíticos e de inteligência computacionais;
- Realização de campanha de medidas (aferição) a partir de *testbeds* montados em cenários reais para validação dos preceitos fundamentais da proposta;

² O termo lacuna se refere a uma determinada investigação que deixou de ser levada em consideração em um trabalho

- Associação de estudos de aferição com modelagem, com objetivo de validação mútua;
- Desenvolvimento e implementação de algoritmos de heurísticas e meta-heurísticas para tomada de decisão, baseado em métodos analíticos e de inteligência computacional;
- Projeto e implementação de diversos tipos de aplicações de TV Digital interativa, visando à geração de carga para o sistema, tais como: *t-health*, *t-educ* e *t-commerce*;
- Utilização criteriosa de simulação discreta e de simuladores específicos, com vistas a extrapolar os dados obtidos nos cenários reais;
- Caracterização de cargas de aplicativo de TV Digital interativa, oriunda de aferições em cenários reais;
- Utilização de métodos analíticos a partir de vetores de pesos analisados com redes bayesianas e não em expertise de especialistas da área, como propõe outros métodos mais tradicionais;
- Análise de diferentes tecnologias de acesso já consolidadas no mercado: PLC, WiMAX, ADSL2+ e 3G, mas com foco específico para o uso como canal de retorno em TV Digital interativa.
- Heurística para que provedores de acesso possam planejar/antever o comportamento dos serviços que serão oferecidos sobre a infraestrutura de telecomunicações existente, evitando assim, possíveis gargalos nos mais variados cenários.
- Combinação de diversos critérios de qualidade de serviço, de redes computacionais, para tomada de decisão;
- Divulgação dos resultados a partir de publicações em periódicos e conferências nacionais e internacionais;
- Divulgação às comunidades interna e externa a partir da realização de minicursos e palestras, ao longo do tempo de consecução desta Tese;
- Realização de projeto de pesquisa 018/2009 – FAPESPA/Vale - Planejamento de redes ADSL2+ considerando parâmetros mínimos de qualidade de serviço para a região amazônica, cujo cerne se baseia nas ideias propostas nesta Tese.

- Realização de projeto de pesquisa CTIC/RNP - Um *framework* para desenvolvimento e disponibilização de aplicações interativas para SBTVD: Um estudo de caso em Telessaúde utilizando a infraestrutura de telecomunicações do NavegaPará como canal de retorno, com relação estreita com diversos aspectos propostos nesta Tese.

- Realização de projeto de pesquisa CNPq - Planejamento e análise de desempenho de tecnologias de acesso para inclusão digital utilizando a infraestrutura de Telecomunicações do Programa NAVEGAPARÁ: estudo baseado na implementação de novas tecnologias de acesso para a aplicação de *t-learning*, com relação estreita com diversos aspectos propostos nesta Tese.

1.6 – ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esta Tese é composta por sete capítulos, distribuídos da seguinte maneira: o capítulo um apresenta uma breve introdução sobre a Tese, expondo a contextualização do trabalho, a definição da hipótese, os objetivos, suas principais contribuições e sua respectiva organização.

O capítulo dois descreve o levantamento bibliográfico de assuntos pertinentes à Tese, sendo estes: TV Digital interativa, padrão ISDB-T, padrão SBTVD, canais de retorno, e a comparação entre estas tecnologias de acesso listadas. O objetivo deste capítulo é embasar o leitor sobre as terminologias e conceitos que serão explorados no decorrer do trabalho.

No capítulo três é apresentada uma visão geral dos principais métodos de tomada de decisão encontrados, dando enfoque mais significativo nos mais pertinentes, que serão usados no trabalho. A classificação é feita em métodos de tomadas de decisões analíticas e de inteligência computacional.

No capítulo quatro são discutidos os trabalhos correlatos acerca do assunto proposto, estabelecendo-se as “lacunas” e possíveis diferenciais desta Tese.

O capítulo cinco apresenta, de forma detalhada e inédita, a estratégia de provimento de serviço para seleção de tecnologia de canal de retorno, através da análise multicritério, considerando fluxo de TV Digital interativa no padrão ISDB-T.

Em seguida, no capítulo seis, é mostrado um estudo de caso e resultados numéricos obtidos, através da aplicação da estratégia exibida no capítulo anterior, sobre aferições

realizadas em cenários reais, mostrando o uso prático do modelo de tomada de decisão proposto.

Por fim, no último capítulo são apresentadas as conclusões obtidas neste trabalho, bem como são relacionados possíveis trabalhos futuros.

2. TV DIGITAL INTERATIVA

2.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo, será apresentada uma visão geral do domínio de aplicação do modelo proposto nesta Tese, abordando-se tópicos relativos à TV Digital interativa, ao SBTVD, ISDB-T, *middleware* Ginga, tecnologias de acesso para canal de retorno e aplicações características de TVD interativa. Espera-se criar um arcabouço de conhecimento para contextualizar os principais pontos que serão apresentados na sequência deste documento.

2.2 – CONCEITOS GERAIS

A televisão, bem como outras mídias ou veículos de comunicação, também está envolvida num constante processo evolutivo e de adaptação às novas tecnologias e necessidades sociais. A principal característica da televisão diz respeito à maneira como o conteúdo é difundido. Normalmente, um conteúdo televisivo é criado para atender a um público-alvo bastante diversificado, embora algum tipo de segmentação já seja possível em sistemas mais avançados de transmissão.

Neste aspecto, é consolidada uma nova vertente tecnológica que utiliza o sistema de radiodifusão terrestre como meio de propagação de informações em alta definição. Além da melhoria da qualidade do áudio e do vídeo, perceptíveis a primeira vista para qualquer pessoa, a TV digital também pode possibilitar a interativa e otimizar o espectro de radiofrequências, características fundamentais que impulsionam a transição para um novo modelo.

A interatividade não se resume no simples aumento da comodidade das partes envolvidas na transmissão televisiva. Envolve também aspectos financeiros, ao aumentar a quantidade e a qualidade dos serviços oferecidos. Dentro desses serviços podemos destacar o comércio televisivo, onde o telespectador passa a ter a oportunidade de adquirir os produtos anunciados diretamente pela TV, sem a necessidade de acessar o site da empresa anunciante

ou se deslocar a uma de suas lojas. Além disso, engloba serviços como o de *t-health*, que pode melhorar a qualidade de vida das pessoas.

Esses serviços adicionais são possíveis graças ao *datacasting*, ou transmissão de dados multiplexados com o sinal audiovisual. O *datacasting* permite a comunicação do transmissor com o telespectador através do envio de dados, geralmente em forma de texto, dando início à interatividade. O próximo passo, talvez o mais importante, já que o antecessor já está consolidado, é a reação de quem assiste, podendo, por sua vez, interagir em determinado instante da transmissão.

Interatividade na TV é a possibilidade do telespectador atuar junto ao programa televisivo que está assistindo, enviando pedidos de informação adicional à emissora de televisão via controle remoto da TV e/ou do conversor digital. Em seguida o emissor é capaz de receber as informações solicitadas, ou seja, a televisão digital interativa proporciona diversas facilidades aos telespectadores, dentre elas, jogos interativos, realização de compras, gravação de um programa de televisão, acesso à programação do canal, multiprogramação e etc. Essa funcionalidade oferecida com a implantação da televisão digital interativa pode ser classificada em interatividade local ou remota, sendo esta última dividida entre intermitente e permanente (ARNOLDO, 2008).

Na Interatividade local se pode ter a configuração de legendas, jogos residentes, guia de programação eletrônica, etc.; enquanto na remota se pode ter o comércio eletrônico, acesso a contas bancárias, bate-papo, serviços de saúde, aplicações para educação à distância, etc.

A interatividade remota pode ser dividida em dois subgrupos: intermitente, onde se pode realizar votação e pesquisa de opinião, por exemplo; e permanente, onde se tem a navegação na internet, *e-mail*, *chat*, competições interativas (jogos multiusuários em tempo real), compras, *homebanking*, EAD, comunicação entre os usuários, etc.

Dentre as aplicabilidades que a televisão interativa pode realizar, destaca-se o *t-learning*, que para Bates (2003) é o acesso a materiais de aprendizagem ricos em áudio e vídeo, ou seja, o aluno é capaz de interagir com o professor utilizando recursos da televisão.

A letra *t* abrevia TV, substituindo as terminologias que anteriormente utilizavam a letra *e* (de eletrônico), tais como *e-learning*, *e-commerce* e *e-health*. Assim, o verdadeiro

desenvolvimento do sistema de *t-learning* baseia-se na integração das oportunidades e das funcionalidades do *e-learning* com a Televisão Digital interativa.

De forma mais específica, a interação entre aprendiz e orientador pode ser realizada através, por exemplo, de *chats*, onde o aluno pode esclarecer dúvidas, responder perguntas, discutir questões com outros alunos, etc. O termo *t-learning* pode ser associado ao resultado conseguido com os materiais de formação interativa, os conteúdos e os serviços que usam um decodificador digital. As características de utilização do *t-learning* e a sua capacidade mais vasta de disseminação comparada com as da educação, abrem novos cenários de ensino dirigidos a um número mais elevado de potenciais utilizadores, tanto em contextos formais como não formais de formação.

Mas para que estas aplicações voltadas para TV Digital interativa sejam consolidadas, deve-se partir de um processo de normalização que garanta a homogeneidade das ferramentas tecnológicas envolvidas. Neste aspecto entram as padronizações, responsáveis por garantir que um aplicativo desenvolvido para TV Digital, por exemplo, possa rodar em qualquer tipo de equipamento, independente de fabricante.

2.3 – PADRÕES ISDB-T E SBTVD

Existem diversos padrões de televisão digital em uso: Americano (ATSC - *American Television System Committee*), Europeu (DVB – *Digital Video Broadcasting*) e Japonês (ISDB – *Integrated Services Digital Broadcasting*), sendo que cada um busca finalidades específicas, tais como (exemplificando): transmissão em HDTV (TV em alta definição); facilidade de recepção e mobilidade; e recepção interna/externa, integração com sistemas multimídia/mobilidade, HDTV, respectivamente.

O ISDB-T (*T* de *terrestrial* - terrestre), que será dado ênfase por ter embasado o padrão brasileiro, foi criado em 1999 por várias empresas e operadoras de televisão, sendo o padrão de transmissão terrestre japonês. Utiliza na modulação o COFDM (*Coded orthogonal frequency-division multiplexing*), com algumas variações e possui uma taxa de transferência que varia entre 3,65 à 23,23 *Mbits/s* e uma largura de banda de 6, 7 ou 8 MHz.

Entre suas maiores vantagens, pode-se destacar a grande flexibilidade de operação e potencial para transmissões móveis e portáteis. A multiplexação e codificação de vídeo são

realizadas em MPEG-2. A codificação de áudio utiliza o MPEG2 ACC áudio. O *middleware* padrão é o ARIB (*Association of Radio Industries and Businesses*).

No Brasil, especificamente, após diversos estudos realizados, o SBTVD, foi instituído em 23 de novembro de 2003, pelo então Presidente da República, a partir do decreto nº 4.901, e tem como principal finalidade, segundo o decreto, “promover a inclusão social, a diversidade cultural do País e a língua pátria por meio do acesso à tecnologia digital, visando à democratização da informação” (BRASIL, 2003).

O SBTVD foi desenvolvido com base no sistema japonês e oferece uma série de diferenciais em relação aos sistemas de TV digital atualmente em funcionamento no mundo. Esses diferenciais estão justamente na junção entre a base técnica de transmissão do sistema japonês com os padrões de compressão digital de áudio e vídeo introduzidos pelo Brasil, que são mais modernos e eficientes do que os adotados por outros padrões. Na versão brasileira foram acrescentadas tecnologias desenvolvidas pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio) e pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB).

Essa especificidade do sistema brasileiro possibilita a transmissão de conteúdo de altíssima qualidade, tanto em termos de imagem como de som, permitindo ao mesmo tempo a recepção móvel e portátil dos sinais de TV digital. Para oferecer esses diferenciais, o SBTVD adotou o padrão MPEG-4, também conhecido como H.264, para codificação de vídeo, e o HE-AAC v2 para o áudio.

Outros importantes diferenciais do SBTVD são a mobilidade e a interatividade. No caso da mobilidade é possível percebê-la na prática, uma vez que já estão à disposição dos consumidores brasileiros diversos dispositivos móveis por meio dos quais se pode assistir à TV digital, como celulares, minitelevisores e receptores USB para micros.

De forma resumida, o modelo adotado pelo Brasil visa a agrupar as melhores funcionalidades de cada padrão. O SBTVD deixa claro que esse avanço tecnológico não se restringirá a uma simples troca de equipamentos para atender a interesses mercadológicos e/ou econômicos. O decreto nº 5.820 demonstra o interesse com o desenvolvimento da indústria nacional e com a inclusão digital/social, por intermédio da TV, que tende a tornar-se uma ferramenta com finalidades sociais, com a criação de canais destinados ao poder executivo, cidadania, educação e cultura (BRASIL, 2006).

Para que o SBTVD possa alcançar os objetivos supracitados, são necessários estudos que viabilizem a interatividade com a programação pretendida. Tal interatividade pode ser feita de forma local, quando a aplicação já vem no carrossel de dados, ou plena, quando o usuário possui seu aparelho receptor (*set-top box*) ligado a um canal de retorno.

Conforme dito, uma das principais vantagens da interatividade é levar os serviços digitais aos lares dos brasileiros, tais como: a criação de uma rede universal de educação a distância, informações governamentais a serviço da comunidade, ampliação de acesso a determinados serviços de saúde, coleta de dados em tempo real (minimizando a necessidade de sensores para dimensionar determinados problemas), comunicação de voz, transmissão de vídeo sob demanda (via canal de retorno). Só que para isto, é de fundamental importância a definição de um *middleware* universal, para ser utilizado nos aparelhos receptores.

Middleware é um termo genérico, normalmente utilizado para um tipo de código de *software* que atua como um aglutinador, ou mediador, entre dois programas existentes e independentes. Sua função é trazer autonomia das aplicações com o sistema de transmissão. Assim, o *middleware* permite que vários códigos de aplicações funcionem com diferentes equipamentos de recepção, tornando transparente aos programas a diversidade de dispositivos existente. Através da criação de uma máquina virtual no receptor, os códigos das aplicações são compilados no formato adequado para cada sistema operacional. Resumidamente, segundo Santos (2003), pode-se dizer que o *middleware* possibilita o funcionamento de um código para diferentes tipos de plataformas de recepção ou vice-versa.

O *middleware* é necessário para resolver o novo paradigma que vem sendo introduzido com a TV Digital: a combinação da TV tradicional (*broadcast*) com a interatividade, textos e gráficos, característicos da TV Digital. A interatividade necessitará de várias características e funcionalidades encontradas no ambiente web, tais como: representação gráfica, identificação do usuário, navegação e utilização amigável.

O *middleware* proposto para o SBTVD recebe o nome de Ginga³, sendo constituído por um conjunto de tecnologias padronizadas e inovações brasileiras que o tornam a especificação de *middleware* mais avançada e a solução para os requisitos do país. Dentre outros componentes, o Ginga possui em seu núcleo a API (*Application Programming*

³ Disponível em: <<http://www.ginga.org.br>>

Interface) Java DTV (Digital TV), que foi especificada pelo Fórum do Sistema Brasileiro de TV Digital⁴, em parceria com a *Sun Microsystems*.

O Fórum SBTVD é uma entidade sem fins lucrativos que surgiu com o objetivo de auxiliar e estimular a criação e melhoria do sistema de transmissão e recepção de sons e imagens digitais no Brasil. Entre seus membros há representantes das emissoras de TV, fabricantes de equipamentos de recepção e transmissão, indústria de *software*, governo federal e entidades de ensino e pesquisa. A API Java DTV é uma especificação aberta, interoperável e sem cobrança de royalties, que permite a implementação de serviços interativos com a linguagem Java para Ginga.

Na API Java DTV, é previsto suporte a diversos tipos de tecnologias para canal de retorno, como por exemplo, WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*), WiFi (*Wireless Fidelity*), Ethernet, GSM/3G (*Global System for Mobile Communications/3ª Geração*), ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*).

Isso possibilita, por exemplo, que a plataforma possa escolher livremente qual tecnologia utilizar, baseado no critério mais apropriado (por exemplo parâmetros de qualidade de serviço, tais como: atraso, vazão, *jitter*, perda de pacotes, custos financeiros). Ao verificarem-se características regionais, a possibilidade do provedor de serviço poder escolher quando ou quais tecnologias usar pode oferecer grande diferencial no grau de interatividade – objetivo primário do SBTVD.

Do ponto de vista das aplicações que executam no Ginga, as mesmas podem ser classificadas em duas categorias, dependendo se o conteúdo inicial da aplicação é declarativo ou procedural (BARBOSA; SOARES, 2008). O ambiente declarativo processa aplicações NCL (*Nested Context Language*), sendo denominados Ginga-NCL, que foi definida pela PUC-RIO (SOARES; RODRIGUES; MORENO, 2007); e o ambiente que controla a execução de aplicações procedurais, baseadas nas APIs Java TV e Java DTV é chamado de Ginga-J (SOUZA; LEITE; BATISTA, 2007).

Adicionalmente, para dar suporte aos ambientes de execução existem dois outros módulos: o Núcleo Comum – *Common Core* (Ginga-CC), que é responsável pelas

⁴ Disponível em: <<http://www.forumsbtvd.org.br>>

funcionalidades de receptores de TV digital, que são disponíveis para os dois ambientes de execução e a máquina virtual Java, necessária para execução das aplicações Java.

É importante ressaltar que o modelo arquitetural definido para o *middleware* do sistema Brasileiro de TV Digital é uma especificação disponibilizada no formato da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT 15606, 2010). Assim, qualquer entidade que tenha interesse, pode criar uma implementação a partir da especificação desenvolvida, desde que siga as normas estabelecidas.

Como acontece em outras plataformas de TV Digital, as especificações são documentos abertos à comunidade em geral, podendo ser desenvolvidas implementações de referência dessas especificações. Um destes modelos de referência é o projeto Openginga, que tem o objetivo de oferecer uma plataforma completa (não emulada) de código aberto de um *middleware* de TV Digital compatível com o padrão SBTVD.

O Openginga é uma iniciativa de código-fonte aberto que tem o objetivo de desenvolver uma plataforma para o *middleware* Ginga do SBTVD. As diretrizes de desenvolvimento do Openginga estão relacionados à reutilização e modificação dos componentes utilizados no *middleware* FlexTV (LEITE et al., 2005), visando à adaptação às especificações atuais do *middleware* brasileiro. O objetivo geral é fornecer uma implementação de código aberto do *middleware* Ginga que funcione em computadores pessoais, permitindo um ambiente de suporte ao desenvolvimento de aplicações para TV Digital.

Disponibilizado a partir do Ginga CDN⁵ (*Code Development Network*), o Openginga utiliza um conjunto de tecnologias de *software* livre, desde um sistema operacional GNU Linux, bibliotecas de processamento gráfico e uma máquina virtual Java *opensource*, conhecida como PhoneME, compatível com a especificação Ginga-J. A Figura 2.1 apresenta a macro arquitetura da plataforma Openginga.

⁵ Disponível em: <<http://gingacd.n.javid.ufpb.br>>

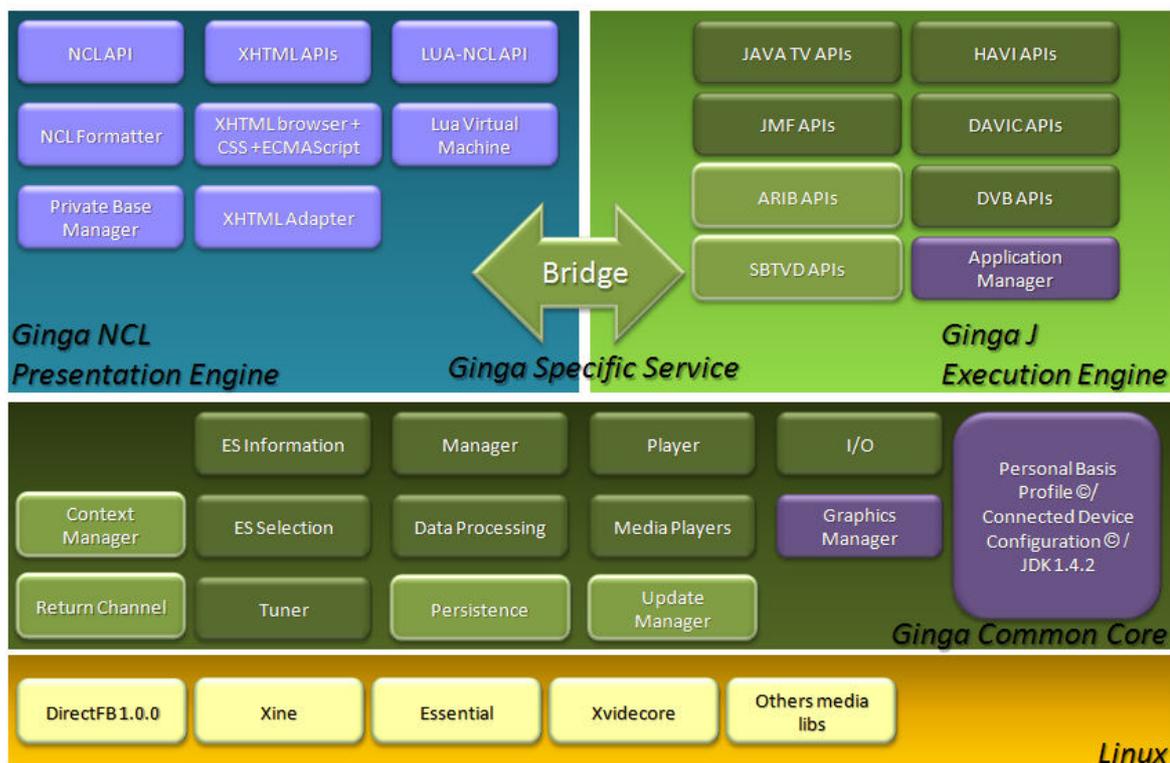


Figura 2.1 - Macro Arquitetura da Plataforma OpenGinga⁶

A partir da difusão de televisores preparados para utilizar TV Digital interativa, haverá um aumento do número de usuários que irão utilizar meios de comunicações para troca de informações. Desta forma, estudos devem ser realizados para que antevijam o comportamento das redes de telecomunicações diante desta crescente demanda e propor soluções para esta problemática. Somado a isto, diferentes tecnologias de acesso tendem a se consolidar no mercado global.

Nota-se que o leque de possibilidades na seara de TV Digital interativa é muito vasto, portanto, qualquer classe de aplicativo que vise o sucesso de alcance a nível de interação com usuário não pode negligenciar a etapa da forma que irá interligar o usuário final a infraestrutura de telecomunicação. A escolha do padrão ISDB-T nesta tese está relacionado ao fato dos testes terem sido rodados sobre o padrão Brasileiro de TV Digital, utilizando o Middleware Ginga.

⁶ Disponível em: <<http://www.lavid.ufpb.br>>

2.4 – CANAIS DE RETORNO

A tecnologia de acesso, ou canal de retorno, é a forma como usuário final irá interligar seu dispositivo à Internet, seja este dispositivo um computador, um celular ou mesmo uma televisão. Neste caso, alguns autores também denominam tecnologia de acesso como “primeira milha”, já que se refere ao trecho primário de acesso, entre usuário e provedor.

Segundo Gumaste e Antony (2004), existem diversas formas de tecnologias de acesso, agrupadas em duas classes básicas: redes cabeadas e redes sem fio. Redes cabeadas, como o nome indica, são criadas a partir de uma infraestrutura com fio e o material utilizado no cabeamento, muitas vezes, dita a vazão que pode ser alcançada pelo usuário final.

A classe sem fio representa tecnologias com ausência da conexão física. Estes tipos de rede estão gradualmente emergindo como um padrão para aplicações de primeira milha, produzindo uma gama de disponibilidades de largura de banda, dependendo da qualidade da rede sem fio, caracterizada, por exemplo, pela interferência de ruídos e pela distância do usuário para a estação base.

Exemplos de redes cabeadas são: xDSL (*Digital Subscriber Line*), fibra ótica (para acesso e não para *backbone*), PLC (*Power Line Communications*); *Cable network* e *The Public Switched Telephone Network* (PSTN). Exemplos de redes sem fio (*Wireless*) são: sistemas celulares, *infrared* e WiMAX.

O DSL é uma tecnologia que fornece um meio de transmissão digital de dados, aproveitando a própria rede de telefonia que chega à maioria das residências. A fibra ótica pode ser considerada a tecnologia mais avançada, já que apresenta altíssimas taxas de transmissão e imunidade a interferências eletromagnéticas. O PLC consegue utilizar a infraestrutura da energia elétrica para tráfego de informações. A *cable network*, chamada de TV à cabo, distribui o sinal utilizando um tipo de cabo coaxial, estando presente em cerca de 10% das residências Brasileiras. As redes PSTN são comutadas por circuitos e destinadas ao serviço telefônico, possuindo baixas taxas de transferências.

Em relação às tecnologias sem fio, as redes WiMAX apresentam altos alcances, quando comparada com outras tecnologias sem fio. Os sistemas celulares são redes projetadas para o provisionamento de serviços de telefonia móvel, ou seja, para a comunicação entre

uma ou mais estações móveis. As redes *infrared* são utilizadas para soluções de curta distância e apresentam baixas taxas de transferência.

Entre as diversas redes de acesso supracitadas, optou-se pelo detalhamento de quatro tecnologias, divididas em dois grupos: PLC e xDSL, no grupo das cabeadas; WiMAX e 3G, para o grupo das redes sem fio. Esta escolha foi embasada na possibilidade de testes nas dependências da Universidade Federal do Pará (UFPA), mais especificamente no Laboratório de Planejamento de Redes de Alto Desempenho (LPRAD), onde foram implantados os *testbeds* usados na análise realizada nesta pesquisa. Além disso, estas tecnologias representam de forma satisfatória a realidade de acesso de diversas regiões do Brasil, e ao mesmo tempo, possuem grande relevância nas literaturas científicas da área.

2.4.1 POWER LINE COMMUNICATIONS (PLC)

O PLC é uma tecnologia de acesso que utiliza a rede elétrica para transmissão de dados, e ganhou bastante força a partir de sua regulamentação na Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) em 2009⁷. Como o país apresenta uma extensão geográfica grande, com alguns lugares desprovidos de estrutura de telecomunicações, as redes PLC podem ser uma solução viável, pois utilizam as linhas de transmissão de energia elétrica que chegam a 98,9% dos domicílios brasileiros e possuem um baixo custo de instalação e manutenção.

⁷ Resoluções nº 527 e 375, de 8/04/2011 e 25/08/2009, respectivamente.

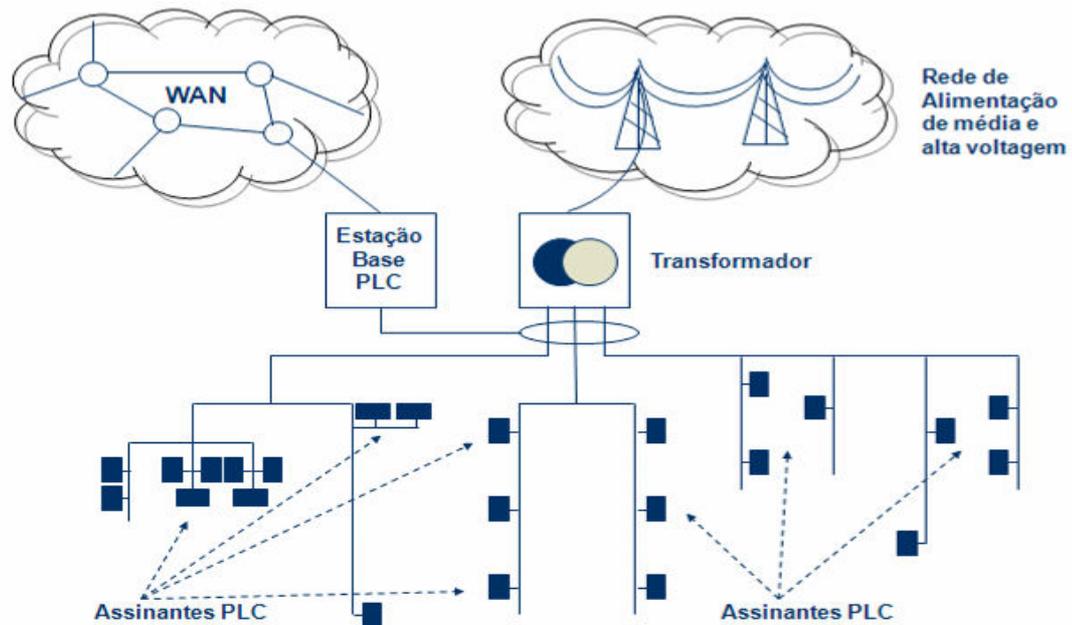


Figura 2.2 - Visão do Sistema PLC

Para o funcionamento do PLC, os cabos elétricos são utilizados como meio de transmissão e a instalação elétrica *indoor* se comporta como uma rede de dados onde cada tomada elétrica é um ponto de conexão da rede. O PLC utiliza redes de distribuição secundária, onde estão conectados os consumidores, com abrangência de alguns quarteirões por circuito. A Figura 2.2 mostra uma visão geral do sistema PLC, contendo diversos assinantes PLC conectados, via estação base, a uma rede de acesso mundial (WAN). O sistema apresentado na figura enfatiza a utilização da rede de alimentação de média e alta tensão par ao tráfego de informações.

No PLC a largura de banda disponível é compartilhada entre dezenas de usuários simultaneamente (usuários que estiverem ligados ao mesmo transformador), logo o desempenho de uma conexão varia de acordo com o número de pessoas que estiverem utilizando, assim como em outras tecnologias de acesso.

Em função desse compartilhamento, é necessário proteger a privacidade do tráfego individual, para tal, devem ser empregadas técnicas como a VLAN (*Virtual Local Area Network*), baseada na IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) 802.1Q, que assegura divisão de domínios de *broadcast*. No modelo atual, cada *head end* (HE) é constituído de 254 canais individuais, ou seja, são 254 usuários que compartilham a mesma rede física, porém em redes lógicas diferentes.

Devem-se também utilizar mecanismos de segurança como algoritmos de criptografia, uma vez que a rede é fisicamente aberta. Visando monitorar o tráfego e corrigir erros, dentre outros aspectos, a tecnologia deve possuir um sistema de gerenciamento automático e de supervisão, como por exemplo, DHCP (*Dynamic Host Control Protocol*) para atribuição automática de endereços e SNMP (*Simple Network Management Protocol*) para gerência.

O fato de o PLC utilizar uma infraestrutura que não foi projetada para transmissão de dados, traz uma série de problemas para esta tecnologia. As características hostis do canal PLC, multipercurso e alta atenuação, tornam o sistema muito sensível a ruídos e interferências (GUMASTE; ANTONY, 2004). Em (ZIMMERMANN; DOSTERT, 2002) há uma caracterização do ruído como uma superposição de cinco tipos de ruído, que se distinguem por sua origem, duração, largura de faixa de frequência e intensidade.

O Ruído de fundo colorido possui uma densidade espectral de potência (PSD) relativamente baixa, que decresce com o aumento da frequência. Sua PSD varia com tempo em termos de minutos, ou mesmo horas.

O Ruído de faixa estreita, sinal de forma senoidal, com amplitude modulada, causado pelo ingresso de estações *broadcast* na rede. Sua intensidade varia de acordo com o horário do dia. O Ruído impulsivo periódico assíncrono com frequência da rede elétrica possui a forma de um impulso com uma taxa de repetição entre 50 e 200 kHz. Ocorre geralmente devido ao chaveamento de fontes de alimentação.

O Ruído impulsivo periódico síncrono com a frequência da rede elétrica possui uma taxa de repetição de 60 ou 120 Hz. Os impulsos possuem uma curta duração de tempo (alguns microssegundos) e possui uma PSD que decresce com a frequência. Geralmente causado por fontes de alimentação, principalmente por diodos retificadores que trabalham em sincronia com a rede elétrica.

O Ruído impulsivo assíncrono, geralmente causado por variações na rede, possuindo duração que variam de alguns microssegundos a poucos milissegundos, com um intervalo entre chegadas aleatórias. Possui uma PSD capaz de atingir valores maiores que 50 dB acima do ruído de fundo, tornando-se assim, a principal fonte de erros nos sistemas de transmissão PLC.

Basicamente, o ruído neste sistema pode ser ocasionado por interferências oriundas de outros sistemas que compartilham o espectro com o sistema PLC e interferências provocadas por outros usuários que utilizam o sistema PLC em operação.

Apesar de seus contratempos, o PLC ainda sim é viável, principalmente para soluções em regiões onde temos uma carência de infraestrutura de acesso, como a região amazônica, já que esta tecnologia aproveita uma infraestrutura existente, podendo ser utilizada para provimento de serviços de inclusão digital, tais como a TV Digital interativa.

Nos últimos anos um grande esforço tem sido realizado para a produção e disseminação do PLC, isto inclui o desenvolvimento de equipamentos de acesso à rede, tanto em baixa quanto em média tensão, além de equipamentos a serem utilizados dentro das instalações do usuário (ZIMMERMANN; DOSTERT, 2000).

Maiores detalhes sobre PLC podem ser encontrados em (GUMASTE; ANTONY, 2004) e (YOON et al., 2004).

2.4.2 WORLDWIDE INTEROPERABILITY FOR MICROWAVE ACCESS (WiMAX)

Nos últimos anos a comunicação sem fio ganhou espaço considerável nas tecnologias de transmissão de dados, deixando de existir somente em comunicações de longa distância (feitas através de satélites), para fazer parte de ambientes pessoais (WPANs – redes sem fio pessoais), locais (WLANs – redes sem fio locais), metropolitanos (WMANs – rede sem fio metropolitanas) e mundial (WWAN – rede sem fio mundial).

As redes WiMAX são redes sem fio que possuem um grande alcance. Esse tipo de rede segue o padrão IEEE 802.16 que especifica as chamadas redes sem fio metropolitanas. A Figura 2.3 mostra a classificação das redes sem fio de acordo com suas padronizações IEEE.

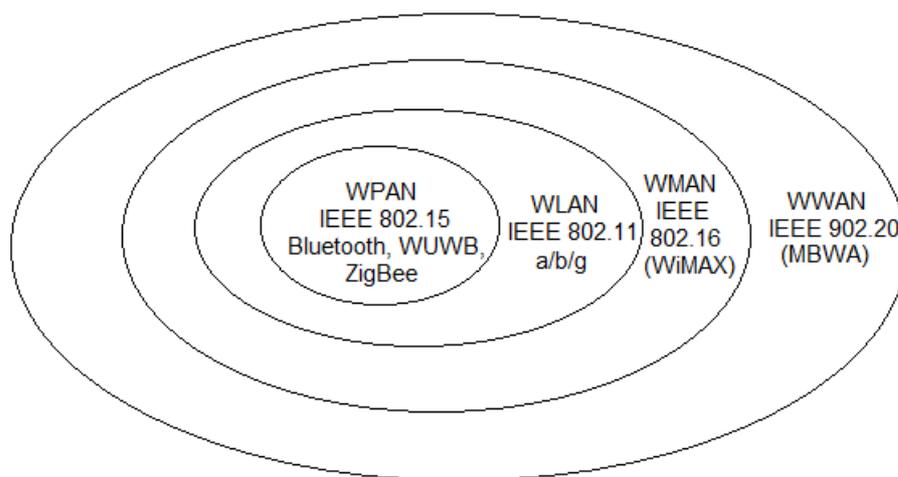


Figura 2.3 - Classificação das Redes sem Fio

As redes WiMAX são implementadas a partir de dois tipos básicos de componentes: estações bases (*Base Stations* – BS) e as estações clientes (*Subscriber Stations* – SS).

Uma estação base serve a diversas estações clientes, as quais servem às sub-redes públicas ou privadas, domésticas ou corporativas existentes. Dessa forma, a função da estação base é de coletar todos os dados de e para as estações clientes. BSs e SSs são estações fixas, segundo o padrão IEEE 802.16, contudo, as SSs podem ser móveis de acordo com o padrão IEEE 802.16e.

O padrão 802.16 possui versões que vieram a corrigir erros anteriores, dentre essas versões as que mais se destacam são: IEEE 802.16a, IEEE 802.16b, IEEE 802.16c, IEEE 802.16d, IEEE 802.16e. A Tabela 2.1 abaixo apresenta uma comparação das características de versões WiMAX.

Tabela 2.1 - Comparação entre os Padrões da Família 802.16

	802.16	802.16 a/d	802.16e
Alcance (Km)	2 -5	5 -50	2 – 5
Velocidade (Mbps)	32 – 134	75 (canal 20 Mhz)	15 (canal 20 Mhz)
Tamanho do canal (Mhz)	20, 25, 28	1,55 – 20	1,55 – 2
Frequência (Ghz)	10 – 66	2 – 11	2 – 6
Tipos de sistema	Fixo	Fixo	Móvel
Ambientes	Visada direta	Visada direta e sem visada direta	Visada direta e sem visada direta

Uma das grandes vantagens da utilização do WiMAX é a não necessidade da utilização de um enlace físico para conexão. Além disso, o WiMAX apresenta boas taxas de transmissão e grande alcance. Assim como qualquer outra tecnologia, o WiMAX possui limitações que ainda estão sendo exploradas, entre estas, a redução da força do sinal, devido a radiações eletromagnéticas que são atenuadas quando atravessam algum tipo de matéria; a segurança, já que os dados estão disponibilizados no ar; a susceptibilidade da rede diante de ruídos de frequências similares.

Atualmente, o interesse por essa tecnologia é tão grande que existem diversas companhias que participam do fórum WiMAX, incluindo operadoras e fabricantes, tais como: Alcatel, Ericsson, Lucent, Motorola, Nortel e Siemens (CDG, 2005).

Maiores detalhes sobre WiMAX podem ser encontrados em (GUMASTE; ANTONY, 2004) e (OHRTMAN, 2005).

2.4.3 DIGITAL SUBSCRIBER LINE (DSL)

O DSL é uma tecnologia que fornece um meio de transmissão digital de dados, aproveitando a própria rede de telefonia que chega à maioria das residências, tornando essa tecnologia peculiar se comparada a outras tecnologias que necessitam de uma própria infraestrutura de acesso para comunicação.

A tecnologia DSL possui uma grande abrangência em nível mundial, sendo considerada a tecnologia de acesso banda larga dominante não só na Europa, como também na América Latina e em países em desenvolvimento como a Índia (OLSEN et al., 2006), (ARENAS et al., 2006) e (FAUDON et al., 2006).

Na América Latina a tecnologia DSL é responsável por cerca de 77 % de todo o acesso banda larga realizado, sendo que no Brasil este valor chega a 85 %. Em termos quantitativos, no final de 2005 havia quase 5.300.000 assinantes na América Latina de tecnologia ADSL (ARENAS et al., 2006).

Os investimentos feitos na infraestrutura existente da rede telefônica são de centenas de bilhões de dólares e levou quase 100 anos para se chegar ao estágio atual. Esses fatores levam a crer que esta tecnologia possui uma longevidade considerável.

No DSL, os enlaces locais de cobre que transportam os sinais DSL do modem do assinante até a central telefônica – CO (*Central Office*) conectam-se, em paralelo, em um equipamento multiplexador denominado de DSLAM (*Digital Subscriber Line Access Multiplexer*). Do DSLAM, os dados se movem em alta velocidade, diretamente para as redes digitais de *backbones* (infra-estrutura física central da Internet) que por sua vez conectam aos servidores de aplicação, como os de serviços encontrados na Internet.

A Figura 2.4 ilustra um cenário DSL, onde se pode observar a presença do modem DSL do assinante, a linha telefônica de par trançado e o CO.

A terminologia DSL, em geral, descreve a tecnologia, enquanto que xDSL representa a família da tecnologia DSL. A letra *x* assume significados diferentes, sendo a família xDSL composta de várias subdivisões, onde cada uma oferece diferentes velocidades de conexão, para diferentes aplicações e necessidades.

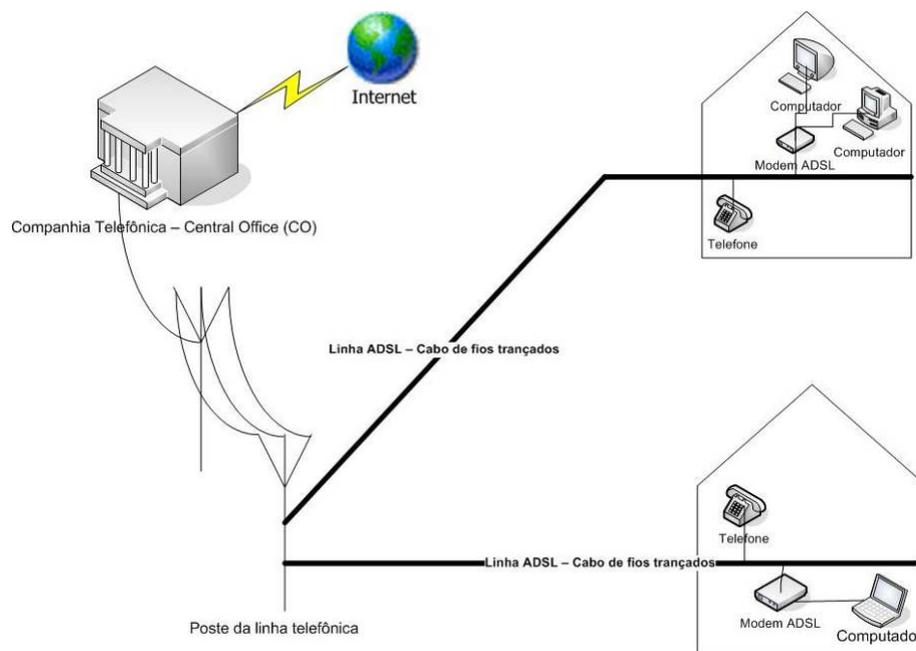


Figura 2.4 - Estrutura Básica da DSL

A tecnologia DSL oferece boas taxas de *bits* para consumidores residenciais e corporativos, sendo que algumas tecnologias são mais restritas quanto ao estado do enlace local, ou seja, existem alguns fatores presentes no enlace que afetam certas famílias DSL. Por exemplo, a ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*) é mais empregada a assinantes

residenciais, enquanto que a HDSL (*High bit-rate Digital Subscriber Line*) é a família mais empregada a assinantes comerciais.

A ADSL tem uma maior faixa de frequência para *downstream* do que para *upstream*, dessa forma é mais utilizada por assinantes residenciais, principalmente no Brasil, visto que na maioria das vezes esses consumidores buscam por informação digital na rede. A taxa de bits para *downstream* varia de 256 kbps até 9 Mbps enquanto que a taxa de bits para *upstream* varia de 16 kbps até 640 kbps.

Maiores detalhes sobre xDSL podem ser encontrados em (GUMASTE; ANTONY, 2004) e (ANSI, 1998).

2.4.4 REDES CELULARES DE TERCEIRA GERAÇÃO (3G)

As operadoras de telefonia celular implantaram suas redes sempre buscando uma atualização, para estarem de acordo com as grandes exigências do mercado de telecomunicações, onde o usuário busca um padrão de serviços cada vez melhor.

A tecnologia 3G permitem às operadoras da rede oferecer a seus usuários uma ampla gama dos mais avançados serviços, já que possuem uma capacidade de rede maior, por causa de uma melhora na eficiência espectral, quando comparada com as gerações anteriores. Entre os serviços há a telefonia por voz e a transmissão de dados a longas distâncias, tudo em um ambiente móvel.

A terceira geração de celulares capacita aos aparelhos altas taxas de transmissão de dados e multimídia a picos de 140 Kbps, 400 Kpbs e 2 Mbps de acesso por comunicações UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*), HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*), HSUPA (*High-SpeedUplinkPacket Access*) e WCDMA (*Wide band Code Division Multiple Access*) com suas variantes.

No Brasil, o órgão regulador das Telecomunicações é a Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel), criada pela Lei Geral das Telecomunicações (Lei no. 9.472, de 16/07/97). A Anatel tem como finalidade dispor sobre as telecomunicações e sistemas de radiodifusão.

A implantação das tecnologias de terceira geração (3G) vem sendo discutida com grande interesse no Brasil, sendo que a utilização da telefonia móvel de terceira geração (IMT-2.000) possui como objetivo amenizar a exclusão digital no país.

Em dezembro de 2007, foi realizado o leilão das faixas de frequências no Brasil. Dessa forma, as quatro principais operadoras do país Vivo, Claro, TIM e Oi, conseguiram obter cobertura nacional, além da Telemig Celular e da Brasil Telecom, que obtiveram a cobertura em suas respectivas regiões. Neste mesmo leilão, a operadora CTBC também adquiriu a tecnologia para a sua área de concessão: Triângulo Mineiro e parte dos estados de Goiás, Mato Grosso do Sul e São Paulo (LUZ; RIBEIRO, 2008).

No mês de setembro de 2008, o Brasil terminou o mês com 1.952 mil celulares com a tecnologia 3G. Este crescimento, em relação ao mês anterior, foi de 48,4% e o crescimento acumulado desde junho é de 28,5%. Com estes índices, os celulares 3G já representam 1% do total de celulares no Brasil (TELECO, 2008).

Atualmente no Brasil temos duas tecnologias de 3G em funcionamento. A rede 1xEV-DO e a rede WCDMA/HSDPA. A maior cobertura é encontrada na rede WCDMA/HSDPA com um maior número de operadoras, que já operavam na rede GSM o que facilita a implementação desta tecnologia.

O CDMA2000 1xEV-DO (1xRTT EVolution - *Data Only*) atinge taxas de até 2.4 Mbits/s no *link* direto e até 153 kbits/s no *link* reverso. Esta tecnologia é uma evolução da rede celular 1xRTT porém otimizada para o tráfego de dados em pacotes, e sem suporte para o tráfego de voz ou dados comutados por circuitos. A camada física de transmissão da rede EV-DO é descrita na norma IS-856, e utiliza uma portadora de 1,25 MHz.

Com evolução natural do HSDPA já existe a tecnologia HSUPA que fornecerá taxas de *upload* ainda maiores. *High-Speed Downlink Packet Access* ou HSDPA é um protocolo de telefonia móvel, também chamado 3.5G. O HSDPA é um serviço de transmissão de pacotes de dados que opera dentro do W-CDMA, no enlace direto (*downlink*), permitindo a transmissão de dados até 14,4Mbit/s em uma banda de 5MHz. Nesse sentido, abre novas possibilidades de serviços multimídia que utilizam a transmissão em banda larga em telefones móveis. Sua operação é regulamentada pelo conjunto de normas 3GPP em sua quinta versão, de 2002.

O HSPA desenvolvido, também conhecido como HSPA+, HSPA evoluído ou evolução do HSPA, é uma arquitetura de telefonia móvel da terceira geração, definida em 3GPP versão 7. Introduz o conceito de arquitetura plana para HSPA rádio e aumenta os índices das taxas de transmissão ideias para a transmissão de dados de HSPA.

O HSPA desenvolvido aumenta as taxas de transmissão de dados do HSPA fornecendo 42 Mbit/s no *downlink* e 11 Mbit/s no *uplink*. A arquitetura plana de HSPA Desenvolvido conerge o RNC com o BTS como definido por 3GPP TR25.999, criando o conceito de E-NodeB. 3GPP Versão-7 também aplaina o âmago de pacote como definido pela aproximação de Túnel Direta. Este é mais um passo em direção ao LTE/SAE⁸ arquitetura plana como definido por 3GPP versão-8, permitindo a evolução HSPA para LTE/SAE.

2.4.5 COMPARAÇÃO ENTRE AS TECNOLOGIAS UTILIZADAS

A Tabela 2.2 mostra uma comparação entre as tecnologias que serão utilizadas neste trabalho.

Tabela 2.2 - Comparação entre as Tecnologias Utilizadas

	Pontos Fortes	Pontos Fracos
DSL	<ul style="list-style-type: none"> - Trata-se de uma tecnologia que utiliza uma rede de transmissão já existente, reduzindo custos. - Apresenta uma boa velocidade de transmissão. 	<ul style="list-style-type: none"> - Interferências causadas no meio de transmissão, tais como o <i>crosstalk</i> e a <i>Radio frequency interference</i>. - Nem toda região possui o recurso da telefonia para utilizar essa solução.
PLC	<ul style="list-style-type: none"> - Utiliza um meio para propagação do sinal que possui alta capilaridade. - Em regiões de difícil acesso, esta tecnologia aparenta ser a mais transitável. 	<ul style="list-style-type: none"> - Está bastante susceptível a erros, já que o meio utilizado não foi criado com a finalidade de transmissão de dados. - Há casos em que o assinante deste serviço tem uma interface com a rede de baixa tensão, que possui inúmeros transformadores ao longo de sua extensão, sendo necessário o sinal PLC fazer <i>bypass</i> nestes equipamentos.
WiMAX	<ul style="list-style-type: none"> - Tem-se a vantagem da não utilização de meio cabeado para transmissão de informações. - Facilidade de chegar a lugares inóspitos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Não possui alto grau de segurança da informação. - Pelo fato de ser propagado pelo ar, está sujeito a interferências.
3G	<ul style="list-style-type: none"> - Possui alta capilaridade; - Relativo baixo custo de utilização. 	<ul style="list-style-type: none"> - Alta latência para transmissão de dados. - Sujeito a interferências.

⁸ Ainda não está em pleno funcionamento no Brasil

2.5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este texto descreveu os componentes básicos da TV digital interativa e alguns desdobramentos que o tema adquiriu no Brasil. Ainda sim, foram destacadas algumas tecnologias de acesso utilizadas como canais de retorno. De forma introdutória, procurou-se apresentar de forma crítica os principais conceitos relacionados ao tema e necessários para embasar a proposta. Em nenhum momento teve-se a pretensão de esgotar o tema, apenas levantar as questões pertinentes e contribuir no debate sobre a transição para a TV digital no país e sobre as tecnologias de acesso utilizadas para prover interatividade. A seguir serão mostrados os modelos de tomada de decisão utilizados na estratégia proposta neste trabalho.

3. MODELO PARA TOMADA DE DECISÃO

O intuito de uma tomada de decisão é definir qual a melhor escolha a ser tomada a partir de uma série de critérios preestabelecidos. Conforme Bana e Costa (1991), a tomada de decisão pode ser definida de forma simples, como um esforço para resolver o dilema dos objetivos conflituosos, cuja presença impede a existência da solução ótima e conduz para a procura da solução que mais se aproxima ao ideal. Neste contexto se verifica a grande importância dos métodos multicritérios como instrumentos de apoio à tomada de decisões.

A tomada de decisão, a partir de um conjunto de alternativas, pode ser crucial para o fracasso ou sucesso de um determinado projeto. Desta forma, quanto maior for o número de critérios envolvidos na escolha a ser feita, mais difícil será esse procedimento, contudo, certamente mais preciso será o resultado.

Para ajudar na solução do problema proposto nesta Tese - em que dado um cenário, o provedor de serviço deve selecionar uma determinada tecnologia para ser implantada, levando em consideração a carga que será gerada por aplicações de TV Digital interativa - a tomada de decisão foi desenvolvida tendo como base métodos analíticos e modelos de inteligência computacional.

3.1 – MÉTODOS ANALÍTICOS

Os métodos analíticos consideram critérios, elencados pelo tomador de decisão, que vão auxiliar no processo. Na literatura especializada, o assunto é abordado por MCDM (*Multiple Criteria Decision Making* – Tomada de Decisão Multicriterial) ou então MCDA (*Multiple Criteria Decision Aid* – Auxílio à Decisão por Múltiplos Critérios). Existem duas correntes de abordagem do tema: a Americana e a Europeia.

Na escola Americana os métodos de critério único de síntese assumem que as preferências do decisor⁹ podem ser representadas por uma função de utilidade ou de valor. Estas devem ser avaliadas pelo analista através do uso de modelos aditivos, multiplicativos, entre outros. Esses métodos adotam o princípio da transitividade e não admitem a incompatibilidade das ações potenciais. Consideram, em geral, somente as situações de preferência e indiferença, o que resulta em ordenamentos totais das alternativas.

Já na escola Europeia, têm-se os métodos *outranking*. A relação *outranking* é definida por Roy (1991) e Gartner (2001) como sendo binária. Ela compara os argumentos prós e contras à hipótese de que uma ação ou alternativa *a* é no mínimo tão boa quanto a ação *b*. Isso equivale dizer que *a* é "não pior que" *b*.

Uma relação de *outranking* (S) permite o tratamento da incompatibilidade entre as ações. As situações de incompatibilidade podem ocorrer na prática, devido à incerteza e imprecisão dos dados utilizados e pelas características próprias do decisor. Os métodos *outranking* são aplicados quando os axiomas básicos da ordinalidade e transitividade podem não estar sendo respeitados em sua totalidade. Pelo axioma da ordinalidade, o indivíduo é sempre capaz de expressar sua preferência entre duas opções de ações quaisquer. De acordo com o axioma da transitividade, o decisor deve ser consistente em seus julgamentos: se ele julga que *a* é tão ou mais atrativo que *b* e se *b* é tão ou mais atrativo que *c* então necessariamente *a* tem de ser tão ou mais atrativa que *c*.

A corrente Norte-Americana é representada por diversos métodos, tais como: AHP (*Analytic Hierarchy Process*), MACBETH (*Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*) e TOPSIS (*Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*); já a Escola Europeia conta com uma gama maior de métodos de decisão multicritérios, tais como: ELECTRE (*ELimination Et Choix Traduisant la REalité*) e PROMÉTHEE (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations*).

Neste trabalho serão pormenorizados os métodos AHP, TOPSIS e ELECTRE, sendo que, estes métodos ajudaram na confecção final da estratégia de tomada de decisão. A escolha destes métodos foi motivada pela difusão desses métodos em diversas áreas de pesquisa, conforme será relatado nos trabalhos correlatos; a facilidade de implementação, que ajudam

⁹ O termo decisor se refere a um único indivíduo, vários indivíduos ou entidades que, para um determinado problema em análise, possuam os mesmos sistemas de valores, os mesmos sistemas de informações, os mesmos interesses e aspirações, assumindo os resultados da decisão geral.

no processo de consolidação do método; expertise do grupo de pesquisa; e os bons resultados alcançados nos testes de desempenho.

3.1.1 – MÉTODO AHP

O método de processo analítico hierárquico foi proposto na década de 70 por Thomas L. Saaty, do departamento de defesa dos Estados Unidos, e trata-se de uma técnica de tomada de decisão com múltiplos critérios, em que um problema complexo possui uma hierarquia de solução a partir das variáveis utilizadas nessa solução.

De forma mais específica, o AHP é um método de análise multicritério baseado em um processo de ponderação ativa, no qual os diversos atributos relevantes são representados através de sua importância relativa. Este método tem sido extensivamente aplicado por acadêmicos e profissionais, principalmente em aplicações que envolvem decisões financeiras associadas a atributos não financeiros (SAATY, 1996).

Segundo Chen (2010), o AHP é um método simples e confiável que permite a utilização de dados qualitativos e/ou quantitativos mensuráveis, sendo estes tangíveis ou intangíveis na análise de critérios e tem sido mundialmente utilizado para auxiliar os processos de decisão considerando as mais diversas finalidades.

O AHP identifica a melhor opção dentro das alternativas possíveis e ajuda na determinação de prioridades através da redução de decisões complexas a decisão comparativa par a par, sendo dividido em: estruturação, julgamentos e síntese dos resultados. O tomador de decisões, para aplicar o método, define o objetivo geral e, assim, seleciona os atributos para alcançar a meta. Os elementos deverão estar estruturados hierarquicamente, ou seja, em níveis de decisão.

Comparado a uma árvore, à medida que se afasta da raiz (objetivo), temos fatores mais específicos e os mais extremos (as folhas), representam os fatores ou critérios de avaliação. Assim, quanto mais genéricos forem os atributos, mais altos deverão estar na hierarquia.

As alternativas ficam na base da árvore, abaixo do último nível de atributos. Esse arranjo permite fazer com que seja possível para o tomador de decisão focalizar cada parte e todo o complexo problema, com isso obter prioridades através de uma simples comparação par a par baseada nos dados obtidos pelo usuário.

O grande diferencial do método AHP é permitir que o usuário atribua pesos relativos para múltiplos critérios ou múltiplas alternativas para um dado critério, de forma intuitiva, ao mesmo tempo em que realiza uma comparação par a par entre os mesmos. Isso permite que, mesmo quando duas variáveis são incomparáveis, com os conhecimentos e a experiência dos especialistas da área, pode-se reconhecer qual dos critérios é mais importante (SAATY, 1991).

Para aplicação do método AHP, deve-se, primeiramente, definir os critérios que serão comparados para auxiliar na escolha das alternativas. Com os critérios definidos, é montada a matriz de prioridades de critérios (ou comparação de critérios), tendo como base a regra sugerida por Saaty (1991): preenche-se a matriz comparando-se os critérios que aparecem na coluna da esquerda em relação às características que aparecem na linha superior.

Por simplificação, serão chamados os critérios de *CI* e *C2*, portanto, se os critérios a serem comparados, *CI* e *C2*, forem iguais em importância, coloca-se o valor 1; se *CI* for um pouco mais importante do que *C2*, colocar-se o valor 3; se *CI* for muito mais importante do que *C2*, coloca-se o valor 5; se *CI* for claramente ou muito fortemente mais importante do que *C2*, coloca-se o valor 7; se *CI* for absolutamente mais importante do que *C2*, coloca-se o valor 9. Qualquer relação entre os critérios *CI* e *C2* intermediária às relações de importância apresentadas, deve ser dado o valor intermediário correspondente, conforme Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Escala Fundamental de Saaty

Importância	Definição	Explicação
1	Igual importância	Atividades contribuem igualmente para objetivo.
3	Fraca importância	A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em relação à outra.
5	Importância forte	A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade em relação a outra.
7	Importância muito forte	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação à outra; sua dominação de importância é demonstrada na prática.
9	Importância absoluta	A evidência favorece uma atividade em relação à outra com o mais alto grau de certeza.
2, 4, 6, 8	Valores intermediários	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições.
Reciprocidade dos valores	Se a atividade <i>i</i> recebe uma das designações diferentes de zero quando comparada com a atividade <i>j</i> , então <i>j</i> tem o valor recíproco quando comparada com <i>i</i> .	Uma designação razoável.

Fonte: SAATY, 1991 (adaptado).

Um elemento é igualmente importante quando comparado com ele próprio, isto é, onde a linha 1 encontra a coluna 1, na posição (1,1), coloca-se 1. Logo, a diagonal principal de uma matriz deve consistir em 1. Se os valores são obtidos comparando-se *C1* com *C2*, quando há a comparação de *C1* com *C2* na matriz os valores são, por tanto, os recíprocos apropriados 1, 1/3, ..., ou 1/9 (SAATY, 1991).

A Figura 3.1 apresenta um modelo de matriz de prioridades para facilitar a apresentação de como é realizada a comparação entre os critérios.

Critérios	C1	C2	C3	C4
C1	1			
C2		1		
C3			1	
C4				1
Soma				

Figura 3.1 - Modelo de Matriz de Prioridades de Critérios

A alteração dos pesos de cada critério é realizada dividindo os elementos de cada coluna pela soma daquela coluna (normalização) e posteriormente somando os elementos em cada linha resultante e dividindo esta soma pelo número de elementos na linha (SAATY, 1991).

Para verificar a consistência da matriz de prioridades dos critérios, se multiplica a mesma pelo vetor peso e se obtém a matriz de consistência (SAATY, 1991), com os elementos $w1$, $w2$, $w3$ e $w4$.

O Resultado da Consistência (RC) (Equação 3.1) é determinado através da divisão do Índice de Consistência (CI) pelo índice RI (Equação 3.2).

$$(3.1) \quad \text{(SAATY, 1991)}$$

$$(3.2) \quad \text{(SAATY, 1991)}$$

Onde RI é um índice tabelado em função de n (número de critérios), conforme Tabela 3.2. O $\lambda_{máx}$ é um índice que relaciona os critérios da matriz de consistência e os pesos dos critérios. A Equação 3.3 apresenta o cálculo do $\lambda_{máx}$.

Tabela 3.2 - Valores de RI para Matrizes Quadradas de Ordem n

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,51

Fonte: SAATY, 1991 (adaptado)

$$\lambda_{máx} = \frac{1}{n \times \frac{\sum_{\text{critério}} \text{Matriz Consistência}}{\text{peso do critério}}} \quad (3.3) \quad (\text{SAATY, 1991})$$

Se $RC \leq 0,1$, o grau de consistência é satisfatório, mas se $RC \geq 0,1$ podem existir problemas de inconsistência e o método AHP não deverá ser utilizado (SAATY, 1991).

As matrizes de prioridade para os processos são determinadas da mesma maneira que a matriz de prioridade dos critérios foi determinada.

Os *scores* dos processos para cada critério, após a construção das matrizes de priorização para os processos, são determinados dividindo-se os elementos de cada coluna pela soma daquela coluna (normalização). Determina-se o escore total dos processos, com os escores para cada critério, multiplicando o escore médio dos critérios pelo peso de cada critério.

A utilização do AHP vem se consolidando na literatura correlata, contudo, este tipo de método apresenta atribuições de valores binários, baseados em conhecimento de fundo de quem realiza as ponderações, o que gera certas divergências na literatura, por permitir diferentes atribuições na mesma área. Contrapondo esta ideia, outro método de tomada de decisão que se baseia no conceito de que a alternativa escolhida deve ter a menor distância euclidiana da solução ideal positiva e a maior distância geométrica a partir da solução negativa ideal é o TOPSIS, que será abordado a seguir.

3.1.2 – MÉTODO TOPSIS

O método TOPSIS, cujo desenvolvimento se deve a Hwang e Yoon (1981) é um MCDM cujo uso apresenta alguns apelos como simplicidade (entenda como facilidade de aplicação) e o modo como aborda um problema de decisão, comparando duas situações hipotéticas: ideal e indesejável.

A aplicação do método está baseada em duas matrizes: a primeira é a matriz de decisão [A] com os atributos x e critérios j ; dados brutos são normalizados e se constituem em uma segunda matriz [R]. A normalização pode ser feita por vários critérios, destacando-se a normalização linear e a por vetor, afirmam Janic e Reggiani (2002).

A normalização linear é um procedimento resultante da divisão da avaliação dada a um atributo x qualquer pelo máximo valor atribuído ao mesmo atributo. O cálculo é efetuado pela Equação 3.4.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_j^*} \quad i=1 \dots m ; j=1 \dots n \quad (3.4)$$

sendo x_j^* o valor máximo do $j^{\text{enésimo}}$ atributo. Assim, $0 \leq r_{ij} \leq 1$, sendo 1 o mais favorável.

A normalização por vetor é feita pela divisão de cada atributo x por um modelo, obtendo-se o valor normalizado r para cada um deles por meio da equação 3.5.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad i=1 \dots m ; j=1 \dots n \quad (3.5)$$

A próxima etapa é a ponderação dos atributos obtida pela multiplicação dos mesmos pela ponderação atribuída pelo avaliador e a determinação do maior valor (situação ideal, positiva) para cada um dos itens avaliados (coluna), que pode ser representada pelo símbolo A^+ ou A^* . O mesmo procedimento é adotado para a escolha do menor valor (situação não ideal, negativa), representada por A^- .

Definidos os valores de A^+ e A^- , o próximo passo é calcular o desvio em relação a cada valor atribuído e somá-los, de acordo com as equações 3.6 e 3.7.

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad (3.6)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (3.7)$$

Finalmente chega-se ao resultado da aproximação às situações positivas e negativas, com o emprego da equação 3.8.

$$C_i^+ = \frac{S_i^-}{(S_i^+ + S_i^-)} \quad (3.8)$$

A fase final é a ordenação decrescente dos valores de C^+ e a avaliação do que Janic e Regiani (2002) denominam de curva de indiferença. A função do TOPSIS pode ser igualada a c , como mostrado, na equação 3.9.

$$C^+ = \frac{S^-}{(S^+ + S^-)} = c \quad (3.9) \quad \text{onde } c \text{ é um valor qualquer.}$$

A equação acima também pode ser representada pela equação 3.10.

$$cS^+ - (1 - c)S^- = 0 \quad (3.10)$$

Na expressão demonstrada acima é indicado a variação de uma hipérbole quando a diferença entre dois desvios (distâncias entre positivo/negativo) de dois pontos fixos é zero. Na Figura 3.2 os autores Hwang e Yoon (1981) mostram que as curvas com $c \geq 0,5$ são “convexas em relação à preferência de origem (positiva, situação ideal), que indica a propriedade de diminuição da taxa marginal de substituição observada na maioria das curvas de indiferença” (p. 45). Ao contrário, curvas de indiferença com $c \leq 0,5$ são côncavas em relação à preferência original.

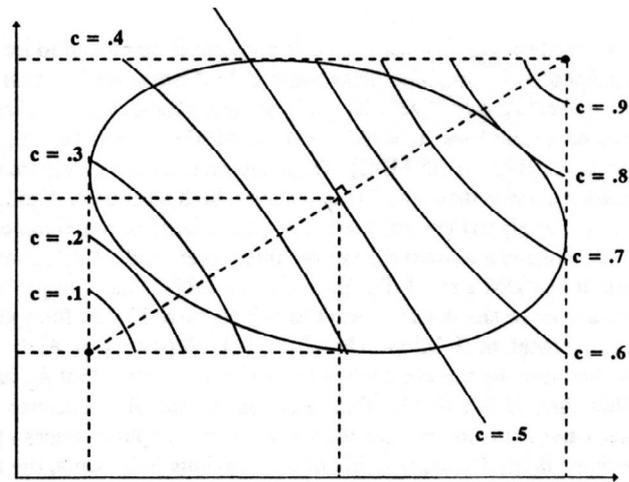


Figura 3.2 - Curvas de Indiferença no Topsis (HWANG & YOON, 1981)

Esse é um caso pouco comum em termos de escolha porque pode ser visto como uma assunção de risco resultante de uma situação pessimista. Se alguém escolhe uma alternativa próxima do não ideal, possivelmente faz isso porque prefere escolher uma alternativa com o pior e o melhor atributo do que outra com dois atributos ruins argumentam os autores. Com base nesse exemplo, é possível assumir que um decisor poderia, sob risco, escolher construir uma rodovia que vai gerar muitos empreendimentos ao longo de sua faixa (próximo à situação ideal) e grande impacto ambiental (próximo à situação não ideal) do que outra que será apenas um corredor para escoamento de commodities (próximo à situação não ideal) e que também terá grande impacto ambiental.

O método TOPSIS é empregado como ferramenta para estabelecer prioridades que auxiliam decisores na escolha das melhores alternativas, nas mais diversas áreas. Outro método bastante difundido, que utiliza a técnica de *outranking*, é a família ELECTRE, que será abordada a seguir.

3.1.3 – FAMÍLIA DE MÉTODOS ELECTRE

Os métodos ELECTRE, que foram desenvolvidos por Roy (1985), são denominados métodos de superação, baseados em relações de classificação binária, de acordo com as preferências do decisor e pressupondo-se a qualidade da avaliação. Esses métodos diferenciam-se entre si pela problemática que tentam resolver e também pela quantidade de informações inter/intra critérios utilizadas. O método ELECTRE possui diversos desdobramentos: ELECTRE I, II, III, IV, IS e TRI.

Os métodos ELECTRE I e ELECTRE II envolvem apenas critérios verdade e são destinados a problemas que envolvem seleção e ordenação de alternativas, respectivamente. Com o desenvolvimento de novos tipos de modelagem de preferências, foram construídos os métodos ELECTRE III, IV, IS e TRI, que inserem na sua estrutura modelagens de preferências mais refinadas. Trata de problemas que são modelados por uma família de pseudocritérios (VINCKE, 1992). Os métodos ELECTRE III e IV têm como objetivo ordenar as alternativas da melhor para a pior. O ELECTRE IV por sua vez é destinado a problemas em que não se pode introduzir qualquer ponderação nos critérios.

Nesta Tese, foi utilizado o método ELECTRE III, por diversos fatores, dentre estes: o fato deste trabalhar com entradas a partir de pesos de critérios; realizar a ordenação das alternativas (estabelecendo desde a melhor até a pior); o grupo de trabalho possuir expertise neste assunto; e pela já existência de aplicativos desenvolvidos pelo grupo de pesquisa que auxiliou o desenvolvimento desta Tese. Assim, será abordado mais detalhadamente o método ELECTRE III.

Segundo Rogers; Bruen (1998), o método ELECTRE III é perfeitamente compatível para tomadas de decisões que necessitam fazer um *ranking* de melhores soluções para escolha da melhor alternativa.

3.1.4 – MÉTODO ELECTRE III

Cada método da família ELECTRE possui sua peculiaridade, contudo, o método ELECTRE III particularmente emprega a de sobre-classificação, mais enriquecida, e cerne da escola francesa do Apoio Multicritério à Decisão, permite chegar-se às soluções de compromisso entre os distintos critérios intervenientes no problema.

Este método trabalha com relações de sobre-classificação nebulosas ou difusas, trabalhando explicitamente com uma estrutura de modelagem de preferências, segundo a qual se compara cada duas ações ou alternativas de modo a obter-se uma das seguintes situações:·Preferência por uma das duas ações;·Indiferença entre as duas ações;

De forma mais específica, dado um conjunto de alternativas (3.11) avaliadas em relação a uma família de critérios (3.12) o método ELECTRE III se propõe a estabelecer uma ordenação de preferência entre as alternativas (ROY, 1985). A proposição deste método está estruturada em três etapas.

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\} \quad (3.11)$$

$$F = \{g_1, \dots, g_n\} \quad (3.12)$$

A etapa 1 consiste na construção das relações de subordinação, ou seja, para cada par de alternativas (a,b), estas relações expressam a intensidade com que se pode afirmar que *a* subordina *b* (intensidade com que *a* é ao menos tão boa quanto *b*). Se $g_j(a)$ é o valor de *a* sob o critério *j*, devem ser calculados:

(i) Índices de concordância parcial $c_j(a,b)$: expressam a intensidade com que se pode afirmar que, sob o critério *j*, *a* é ao menos tão boa quanto *b*. $c_j(a,b)$ pode assumir os valores:

$$c_j(a,b) = \begin{cases} = 0, & \text{se } g_j(a) + p_j [g_j(a)] \leq g_j(b) \\ \in]0,1[, & \text{se } g_j(a) + q_j [g_j(a)] < g_j(b) < g_j(a) + p_j [g_j(a)] \\ = 1, & \text{se } g_j(a) + q_j [g_j(a)] \geq g_j(b) \end{cases} \quad (3.13)$$

(ii) Índices de concordância global $c(a,b)$: expressa a concordância que existe em se afirmar que *a* subordina *b*, à luz de todos os critérios. k_j é o peso associado a cada critério.

Assim:

$$c(a,b) = \frac{\sum_{j=1}^m (k_j \cdot c_j(a,b))}{\sum_{j=1}^m k_j} \dots \dots \dots (3.14)$$

(iii) Índices de discordância $d_j(a,b)$: exprime a medida em que o critério *j* recusa a afirmativa de que *a* subordina *b*. Então, $d_j(a,b)$ pode assumir os valores:

$$d_j(a,b) = \begin{cases} = 0, & \text{se } g_j(b) \leq g_j(a) + p_j [g_j(a)] \\ \in]0,1[, & \text{se } g_j(a) + p_j [g_j(a)] < g_j(b) < g_j(a) + v_j [g_j(a)] \\ = 1, & \text{se } g_j(b) \geq g_j(a) + v_j [g_j(a)] \end{cases} \quad (3.15)$$

(iv) Índices de credibilidade $G_c(a,b)$: expressa quanto se admite que a subordina *b* globalmente, utilizando-se o conceito de discordância (índice $d_j(a,b)$) para enfraquecer o conceito de concordância (índice $c(a,b)$). Seja $\bar{F}(a,b) = \{j \in \underline{F} / d_j(a,b) > c(a,b)\}$, então:

$$G_c(a,b) = \begin{cases} c(a,b), & \text{se } \bar{F} = \emptyset \\ c(a,b) \cdot \prod_{j \in \bar{F}(a,b)} \frac{1-d_j(a,b)}{1-c(a,b)}, & \text{se } \bar{F} \neq \emptyset \end{cases} \quad (3.16)$$

O segundo passo é a ordenação das alternativas: a partir dos índices $G_c(a,b)$, constrói-se uma sucessão de relações de subordinação. Utilizam-se planos de corte $\lambda_k \in [0,1]$ e um limite de discriminação $s(\lambda) = \alpha' + \beta \lambda_k$. Seja D_0 o conjunto das melhores alternativas de A . No primeiro passo $k = 0$:

$$\lambda_0 = \min_{a,b \in D_0, a \neq b} G_c(a,b) \quad (3.17)$$

e

$$\lambda_1 = \min_{\{G_c(a,b) < \lambda_0 - s(\lambda_0)\}} G_c(a,b) \quad (3.18)$$

Obtém-se a primeira relação de subordinação $a S_{D_0}^{\lambda_1} b$ se e somente se:

$$G_c(a,b) > \lambda_1 \text{ e } G_c(a,b) > G_c(b,a) + \alpha' + \beta G_c(a,b) \dots \dots (3.19)$$

A partir da matriz de subordinação, calculam-se: a eficácia de a (numero de alternativas que a subordina), a fraqueza de a (numero de alternativas que subordinam a) e a qualificação de a (a eficácia de a - a fraqueza de a).

Após a qualificação, selecionam-se a (s) melhor (es) seleção descendente ou a (s) pior (es) seleção ascendente, das quais extraem-se as alternativas restantes. Calcula-se uma nova qualificação destas alternativas para extrair uma ou mais alternativas, repetindo esta operação até que todas sejam classificadas, chamada etapa de destilação.

Mais especificamente, na destilação descendente selecionam-se primeiramente as melhores alternativas e termina-se o processo com piores. Na destilação ascendente, escolhem-se primeiramente as piores alternativas para terminar o processo com as melhores. Como resultado obtém-se duas preordenações. Em cada uma delas, as alternativas são agrupadas em classes de ordenadas entre as mesmas através da utilização de planos de corte. Os planos de corte refletem os percentuais mínimos necessários para que as alternativas subordinem as outras. Cada classe (ordem) contém ao menos uma alternativa.

A terceira etapa é a construção de uma preordenação de interseção. A interseção das duas preordenações conduz a uma classificação mais confiável, que evidencia as incomparabilidades entre as alternativas, quando elas existem. As hipóteses existentes são:

(i) a será considerada melhor que b (aPb) se, em ao menos uma das classificações a é classificada a frente de b e se numa outra a é ao menos tão bem classificada quanto b .

(ii) a será equivalente à b (aIb) se estas pertencerem à mesma classe nas duas preordenações.

(iii) a e b serão incomparáveis (aRb) se, por exemplo, a está em melhor posição que b na classificação ascendente e se b vem à frente de a na destilação descendente.

Tendo em mente esta demanda de empregar estratégias para soluções em diversas áreas, existem diversos modelos de inteligência computacional que têm sido empregados com sucesso, dentre estes: redes de neurônios artificiais (ou simplesmente redes neurais), *fuzzy*, redes Bayesianas, etc. Para o modelo proposto, o sistema de peso que serve de entrada para este método, será adquirido a partir da inferência feita em uma rede Bayesiana.

3.2 – *MODELOS DE INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL: REDES BAYESIANAS*

O advento de métodos de inteligência computacional permite, através de inferências em seus modelos, antecipar possíveis problemas e/ou eventos, e desta forma, utilizando-se de métodos que possibilitem otimizar seu processo e com isso reduzir custos financeiros e computacionais.

Tendo em mente a demanda de aplicar estratégias para soluções em várias áreas, existem diversos modelos de inteligência computacional que têm sido empregados com sucesso, dentre estes: Redes de Neurônios Artificiais (ou simplesmente redes neurais), Lógica Difusa (*Fuzzy Logic*) e Redes bayesianas.

Será detalhado o modelo de inteligência computacional que ajudou para o desenvolvimento desta Tese, sendo a diferença entre os citados: as redes neurais são sistemas computacionais estruturados em aproximação à computação baseada em ligações, onde nós simples são interligados para formar uma rede de nós; a lógica difusa, é uma extensão da lógica booleana que admite valores lógicos intermediários entre o FALSO (0) e o VERDADEIRO (1); e as redes bayesianas são modelos gráficos para raciocínio baseado na incerteza, onde os nós representam as variáveis (discreta ou contínua), e os arcos representam a conexão direta entre eles.

A escolha das redes Bayesianas foi motivada por diversos fatores, dentre estes: a difusão desses métodos em diversas áreas de pesquisa; a problemática em si, que pode ser

resolvida a partir da utilização destes modelos; expertise do grupo de pesquisa que ajudou no processo de entendimento e equalização do problema.

Uma Rede Bayesiana (RB) é um modelo gráfico que representa as relações de causalidade das variáveis de um determinado problema, sendo composta por:

- Um conjunto de nós que representam as variáveis aleatórias $X = \{X_1, \dots, X_n\}$ do domínio (atributos da base de dados);
- Conjunto de arcos ou setas conectando os nós da rede, definindo assim a relação de dependência condicional e de causalidade;
- Uma tabela de probabilidades condicional (TPC) para cada nó, que quantifica os efeitos que os nós-pais (Pa) exercem sobre esse nó. Os nós-pais de um nó n são todos aqueles que possuem setas apontando para n . Um exemplo de RB é descrito na Figura 3.3.

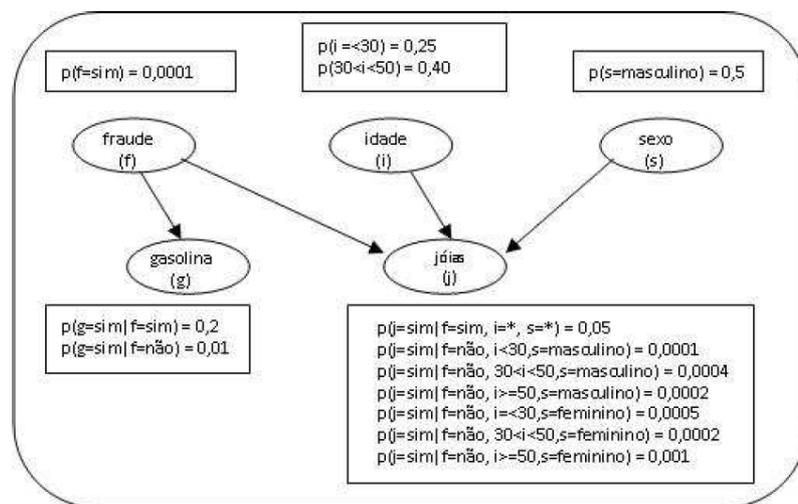


Figura 3.3 - Exemplo de uma rede Bayesiana (HECKERMAN, 1997).

Neste exemplo, os nós fraude, idade, gasolina, jóias e sexo correspondem às variáveis do domínio, dessa forma $X = \{fraude, idade, sexo, gasolina, joias\}$. As variáveis fraudes, idade e sexo, por serem do tipo raiz, possuem apenas as respectivas probabilidades a priori $P(X_i = verdadeiro)$ e $P(X_i = falso)$. Os nós gasolina e jóias, por sua vez, apresentam

distribuições de probabilidade condicional $P(X_i | Pais(X_i))$, que são relações de dependência quantitativa entre os nós da rede.

É possível inferir sobre as dependências condicionais que se estabelecem entre as variáveis através do gráfico da rede, bastando evidenciar a ocorrência de um determinado estado em uma ou mais variáveis da rede, propagando, dessa forma, o efeito das observações pela rede.

Através das inferências, qualquer análise, pergunta ou hipótese que se deseje fazer ao modelo torna-se factível. Os questionamentos levantados inicialmente sobre o domínio podem agora ser estudados, evidenciando os devidos eventos nos atributos da rede e, dessa forma, computando e atualizando as probabilidades das demais variáveis da RB.

Para calcular a inferência, são utilizados os cálculos de probabilidade condicional e probabilidade condicional conjunta (representados a seguir 3.20 e 3.21) do teorema proposto por Bayes. A regra de Bayes fundamenta atualmente a base matemática de todos os sistemas que trabalham com inferência probabilística (3.22).

$$P(AB) = \frac{P(BA)P(A)}{P(B)} \quad (3.20)$$

$$P(AB|E) = \frac{P(BAE)P(AE)}{P(BE)} \quad (3.21)$$

Generalizando, tem-se:

$$P(A = v_i|B) = \frac{P(BA=v_i)P(A=v_i)}{\sum_{k=1}^{n_A} P(BA=v_k)P(A=v_k)} \quad (3.22)$$

Uma das grandes vantagens das RBs é a semântica deste modelo, a qual facilita, dada a inerente representação causal dessas redes, o entendimento e o processo de tomada de decisão, por parte dos usuários desses modelos (CHEN, 2001). Isto se deve, basicamente, ao fato das relações entre as variáveis X_i do domínio poderem ser visualizadas graficamente, além de proverem um mecanismo de inferência que permite quantificar, em termos probabilísticos, a magnitude dos efeitos dessas relações.

Por meio da representação gráfica da RB é possível visualizar e compreender mais facilmente as relações entre as variáveis do ambiente, representando a distribuição de probabilidade conjunta para todas as variáveis. Além disso, a RB também permite que se

reduza a complexidade da inferência. Na próxima seção, é mostrada a construção de uma Rede Bayesiana.

3.2.1. – CONSTRUÇÃO DE REDES BAYESIANAS

Visando demonstrar o processo de construção de uma RB, considera-se um problema bastante simplificado da detecção de fraude em compras com cartões de crédito. Na Figura 3.3, esse exemplo é mostrado, na qual os arcos são desenhados da causa para o efeito, os quadros mostram a distribuição de probabilidade local associada a cada nó da RB, e os asteriscos representam a atribuição de quaisquer valores, dentre os possíveis, às variáveis. Desse modo, a estrutura da RB pode ser obtida seguindo os passos:

(i) Selecionar o conjunto de variáveis que descrevem o domínio. Uma possível escolha para o problema de detecção de fraude seria: fraude (f), gasolina (g), joias (j), idade (i) e sexo(s), representando se a compra é ou não fraudulenta, se houve ou não compra de gasolina nas últimas 24 horas, se houve ou não compra de joias nas últimas 24 horas, o sexo e a idade do usuário do cartão de crédito, respectivamente.

(ii) Eleger uma ordem para essas variáveis. Uma possível ordem das variáveis para o problema de detecção de fraude seria: f, i, s, g e j.

(iii) Enquanto houver variáveis a serem consideradas:

a. Adicionar um nó à rede para cada variável;

b. Estabelecer um conjunto de nós-pais de X_i sobre o conjunto mínimo de nós já incluídos na rede, que satisfazem a propriedade de independência condicional. No exemplo, utilizando a ordem f, i, s, g e j, sugerida no passo 2, obtém-se:

$$\begin{aligned}P(i | f) &= P(i) \\P(s | f, i) &= P(s) \\P(g | f, i, s) &= P(g | f) \\P(j | f, i, s, g) &= P(j | f, i, s)\end{aligned}$$

c. Definir a TPC para X_i .

Destaca-se que apesar de serem mostrados como uma sequência simples, na prática, esses passos são geralmente interligados e com certo grau de complexidade. Por exemplo, julgamentos de independência condicional e/ou causa-efeito podem influenciar na construção da RB.

Além disso, esse processo de construção considera apenas o conhecimento prévio (ou de fundo) do domínio. Em outras palavras, a rede deve ser concebida por intermédio da interação com o especialista do domínio. Essa interação tem a finalidade de identificar os relacionamentos entre as variáveis de interesse, para em seguida codificá-los na rede. Por exemplo, o especialista no problema da detecção de fraude pode identificar a influência direta que a idade exerce sobre a aquisição de joias e até mesmo quantificar essa dependência (através dos valores de probabilidades condicionais). Na próxima seção, é mostrado o aprendizado da estrutura e dos parâmetros (probabilidades) de uma RB a partir de dados.

3.2.2 – APRENDIZADO DE REDES BAYESIANAS

A aprendizagem de RBs consiste em induzir, a partir de um conjunto de dados, as distribuições de probabilidades condicionais e identificar as relações de independência existentes nesse conjunto. Esse processo de aprendizagem considera dois aspectos: aprendizagem da estrutura, quando não se tem a priori definido pelo especialista do domínio, tal estrutura; e a aprendizagem dos parâmetros, após a obtenção da estrutura, por intermédio das interações com o especialista ou induzida a partir dos dados.

Para um melhor entendimento desse processo, considere o exemplo de detecção de fraude em compras com cartão de crédito, já mostrado na Figura 3.3. Primeiramente, a RB que representa as relações entre as variáveis desse problema é especificada, por exemplo, pelo usuário. Em seguida, é necessário que seja especificado como a distribuição de probabilidade de cada nó será representada. No caso do problema da detecção de fraude, as variáveis foram discretizadas em um número de estados (valores) para que cada distribuição de probabilidade possa ser representada em uma tabela (TPC), por exemplo, idade foi discretizada dentro dos valores (≤ 30 , $30 - 50$, ≥ 50).

Finalmente, o algoritmo tenta estimar as probabilidades (parâmetros) da TPC baseado no conjunto de dados de treinamento. Por exemplo, a célula $P(i \leq 30)$ da TPC da variável i pode ser simplesmente calculada a partir do número de clientes do conjunto de dados de

treinamento que tenham idade igual ou inferior a 30 anos. O parâmetro $P(j=\text{sim} \mid f=\text{sim}, i \leq 30, s=\text{feminino})$ pode ser computado por intermédio da fração dos exemplos de treinamento onde a compra seja uma fraude, a idade do cliente seja igual ou inferior a 30 anos e o sexo seja feminino e que tenha comprado joias nas últimas 24h.

Um ponto que merece ser destacado no processo de aprendizado de RBs é se todos os valores das variáveis são observados (não há valores de atributos ausentes) no conjunto de dados de treinamento ou se algumas não são consideradas. Assim, os métodos de aprendizagem devem considerar as seguintes situações:

- (i) Estrutura da rede conhecida e conjunto de dados completos;
- (ii) Estrutura conhecida e conjunto de dados incompletos;
- (iii) Estrutura desconhecida e conjunto de dados completos;
- (iv) Estrutura desconhecida e conjunto de dados incompletos.

3.2.3 – APRENDIZADO DA ESTRUTURA DE REDES BAYESIANAS

O aprendizado da estrutura de RBs a partir de dados completos pode ser realizado, via de regra, considerando dois paradigmas: busca e pontuação e baseado em independência condicional (CHENG et al., 1997).

No paradigma de busca e pontuação, a aprendizagem se realiza buscando uma estrutura que seja aderente aos dados. Via de regra, se inicia com um grafo sem arcos, então, é utilizado algum método de busca gulosa que adicione um arco ao grafo.

O próximo passo consiste em usar uma função de pontuação para determinar se a nova estrutura é melhor que a anterior. Caso seja melhor, o novo arco é mantido. Esse processo continua até que nenhuma nova estrutura seja melhor que as anteriores.

Diferentes critérios de pontuação estão disponíveis na literatura para avaliar uma estrutura, tais como os descritos em (COOPER; HERSKOVITS, 1992), (LAM; BACCHUS, 1994) (HECKERMAN et al., 1995). Já o processo de busca por novas estruturas é realizado via métodos heurísticos. Para reduzir o espaço de busca, a maioria dos algoritmos requer ordenamento a priori dos nós.

Os algoritmos que utilizam o paradigma de análise de independência condicional procuram descobrir as dependências a partir dos dados, e então usam essas dependências para inferir a estrutura. As relações de dependência são avaliadas pelo uso de alguma classe de teste de independência condicional. Detalhes mais aprofundados destes tipos de algoritmos podem ser encontrados nos algoritmos descritos em (SPIRITES et al., 2001) e (CHENG et al., 1997).

Como forma de compreender os processos de aprendizado da estrutura de uma RB e em razão de ser mais comumente utilizado, serão destacados a seguir os principais básicos do paradigma de busca e pontuação.

Para isso, é necessário entender que o aprendizado da estrutura de RBs pode ser visto como processo de busca por uma estrutura que codifique a TPC para um conjunto de variáveis aleatórias X , dado um conjunto de dados D . Isto é, encontrar uma estrutura, em um possível espaço de hipóteses de estruturas S^h , avaliando as probabilidades a priori das hipóteses $S^h - P(S^h)$. Então, dado um conjunto de dados D , calcular as probabilidades condicionais que maximizam $P(S^h|D)$ (estrutura) e $P(\theta_{ijk}|D, S^h)$ (probabilidades condicionais das TPCs dos nós da estrutura da RB S^h).

O cálculo de $P(\theta_{ijk}|D, S^h)$ pode ser realizado conforme descrito na subseção anterior. O cálculo de $P(S^h|D)$ pode ser feito, via Regra de Bayes, da seguinte maneira (3.23):

$$P(S^h|D) = \frac{P(S^h)P(D|S^h)}{P(D)} \quad (3.23)$$

Sendo que $P(D)$ é independente da estrutura S^h . Dessa forma, para determinar a distribuição de probabilidade condicional das possíveis estruturas, é necessário calcular a verossimilhança marginal dos dados ($P(D|S^h)$) para cada estrutura (considerando a probabilidade a priori $P(S^h)$ de cada uma das estruturas) e então determinar a estrutura que codifica a TPC para X baseado nos valores máximos de verossimilhança. Este método, conhecido como abordagem Bayesiana completa (por considerar todas as possíveis estruturas de RB do espaço de hipóteses), é frequentemente inviável (HECKERMAN, 1997). Por exemplo, o espaço de hipóteses das estruturas das RBs para um conjunto formado por apenas três variáveis A, B e C é formado por 25 diferentes estruturas. Na Figura 3.4 são mostradas algumas dessas estruturas.

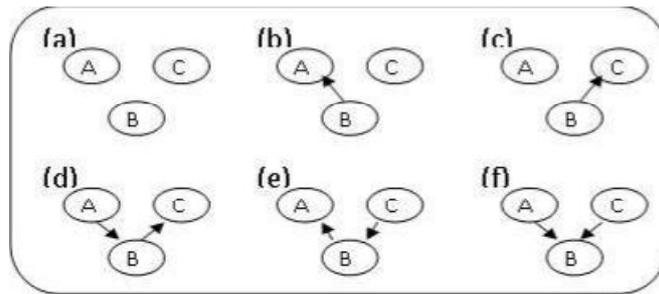


Figura 3.4 - Algumas estruturas possíveis de Redes Bayesianas para as variáveis A, B e C

Em problemas com um grande número de variáveis a serem consideradas é necessário o uso de outras abordagens. Entre as mais referenciadas na literatura e mais utilizadas pelos métodos de aprendizado de RBs, destaca-se a abordagem de seleção do modelo.

A tarefa básica da seleção do modelo é escolher um modelo “bom” (i.e. uma “boa” hipótese de estrutura) a partir dos modelos possíveis e considerá-lo como se fosse o modelo “correto”. Várias pesquisas mostram experimentalmente que a seleção de um único modelo “bom” frequentemente produz resultados bastante satisfatórios (HECKERMAN et al., 1995).

Para ilustrar o aprendizado da estrutura de redes Bayesianas, considere o exemplo do K2 (COOPER; HERSKOVITS, 1992). Este método aprende a estrutura de uma RB a partir de um conjunto de dados completo, cuja ordem das variáveis deve ser fornecida pelo usuário desse método. O K2 adota um método para calcular (selecionar) a estrutura com máxima verossimilhança e um algoritmo de aprendizado para encontrá-la (aproximadamente). Essa busca é iterativa e inicia com uma estrutura de rede bem simples, onde todas as variáveis são independentes uma das outras. Em seguida são avaliadas as verossimilhanças marginais de cada rede resultante de possíveis mudanças (e.g. adicionar uma nova ligação entre dois nós dessa rede), e então é aplicada a melhor das alterações antes de uma nova iteração. Esse processo continua até que o algoritmo não consiga encontrar nenhuma alteração simples que melhore (aumente) o valor de máxima verossimilhança.

Esse algoritmo, classificado como de busca e pontuação e um dos mais utilizados, permite encontrar a mais provável estrutura de rede de crença S a partir de um determinado conjunto de dados D. O algoritmo K2 aplica a pontuação Bayesiana segundo a equação 3.24.

$$P(SD) = \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^{q_i} \frac{\Gamma(r_i)}{\Gamma(r_i + N_{ij})} \prod_{k=1}^{r_i} \Gamma(N_{ijk} + 1) \quad (3.24)$$

Onde: n é o número de nós; q_i é o número de configurações dos pais da variável X_i ; r_i é o número de possíveis valores do nó X_i ; N_{ijk} é o número de casos de D onde o atributo X_i é instanciado com o seu valor k , e a configuração dos pais de X_i é instanciada com o valor j ; N_{ij} denota o número de observações em que a configuração dos pais de X_i é instanciada com o valor de j , sendo:

$$N_{ij} = \sum_{k=1}^{r_i} N_{ijk} \dots \dots \dots (3.25)$$

Após a construção da rede (a partir do conhecimento fundo do domínio, dos dados ou da combinação de ambos), são necessários mecanismos de inferência para computar as eventuais probabilidades de interesse.

A intenção deste capítulo é revisar os principais conceitos do modelo de inteligência artificial que serviu de base para o desenvolvimento da estratégia de tomada de decisão proposta (Redes Bayesianas), não há intenção de esgotar o assunto, nem tão pouco se procurou apontar a vantagem desta técnica em detrimento a outras. Para maiores detalhes sobre os principais modelos de inteligência artificial, consultar (REZENDE, 2003), (HAYKIN, 2001), (BRAGA et al., 2000), (HECKERMAN, et al., 1995), (HECKERMAN, 1997), (COOPER; HERSKOVITS, 1992), (MUKAIDONO, 2001), (KANDEL, 1986), (BOYER, 1996) e (MALUTTA, 2004).

3.3 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse capítulo foram apresentados os métodos/modelos que irão nortear a solução do problema levantado nesta Tese de Doutorado. Nota-se que estudos para o desenvolvimento de meios e métodos que permitam a eficiência da tomada de decisão são imprescindíveis. Para tanto, a aplicação de técnicas e modelos estatísticos e de inteligência computacional/artificial para análise, classificação e/ou predição de eventos e padrões, correlação e otimização despontam não somente como uma tendência, mas como uma necessidade, sendo utilizados nos mais diversos domínios. Dessa forma, faz-se necessário o advento de uma estratégia para provimento de serviço, através de inferências em modelos montados, para antecipar possíveis problemas e/ou gargalos, para que, desta forma, utilize-se de métodos que possibilitem provisionar implantação de canais de retorno para ambientes de TV Digital, evitando futuras problemáticas. O próximo capítulo apresentará uma revisão sobre as literaturas da área que baseiam o trabalho em questão, estabelecendo as lacunas encontradas no estado da arte.

4. TRABALHOS CORRELATOS

4.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo, são apresentados alguns dos trabalhos encontrados na literatura especializada, os quais serviram de base para o desenvolvimento desta Tese. As referências presentes na literatura são apresentadas de modo a situar o estado da arte de como as pesquisas atuais que abordam a linha de pesquisa desta Tese. São apontadas também algumas limitações destes estudos e os aspectos que são propagados neste trabalho, definindo onde se encontra a contribuição inédita para a área. Os trabalhos literários correlatos citados neste capítulo foram divididos em sucessões para facilitar o entendimento.

4.2 – TV DIGITAL E O SBTVD

Diversos trabalhos abordam o SBTVD e suas características, tais como (COSTANZO; NETO, 2007), onde os autores analisam os vários aspectos relacionados ao processo de definição do SBTVD e seus principais impactos na cadeia de valor produtiva da indústria eletrônica. De forma específica, este artigo visa a identificar as possíveis funcionalidades e características a serem implementadas no SBTVD e faz uma projeção de vendas dos dispositivos de recepção de sinal digital.

Brackmann et al., (2008) mostram o SBTVD e a interação dos telespectadores com os diferentes padrões disponíveis em todo o mundo neste momento. O artigo diz que, fazendo uso da linguagem de programação Java e da API JavaTV, foi possível a construção de um programa chamado de TVMark. O aplicativo foi testado e permite informar ao programador quanto de recurso ele pode utilizar no *software* multimídia.

Viana et al., (2009) relatam que o SBTVD abre um leque de possibilidades. Apontam ainda que desde dezembro de 2007 a população Brasileira vem experimentando essa nova tecnologia e dentre várias aplicações promissoras existentes se destaca a possibilidade de habilitar os *set-top boxes* domésticos a funcionarem como unidade central de processamento.

O artigo apresenta as mais recentes estratégias para implementar a convergência entre os modelos de sistema de Televisão Digital e plataformas residenciais. O objetivo final do artigo é identificar as características mais relevantes para o nosso país a fim de propor um modelo de colaboração.

4.3 – APLICAÇÕES INTERATIVAS PARA TV DIGITAL

Sobre TV Digital interativa, outro ponto muito importante abordado nas literaturas são os aplicativos desenvolvidos para o SBTVD. Os autores em Santos et al. (2010) apresentam estratégias para a implementação de protótipo de uma plataforma de construção de Provedores de Serviços Interativos (PSI), que podem: armazenar, analisar e gerar informações obtidas a partir da interação dos telespectadores com aplicações em televisão digital interativa, caracterizada pela utilização de um canal de retorno.

Ainda segundo Santos et al. (2010), no caso do cenário brasileiro, o desenvolvimento de uma plataforma de um PSI, se baseia na experiência acumulada no desenvolvimento da plataforma JiTV (*Java Interactive Television*), que inclui a produção na emissora, a transmissão sobre a rede de comunicação e recepção/interação em um terminal de acesso. Neste artigo os autores apresentam três aplicações desenvolvidas: sistema de recomendação de conteúdo (*JiTVPlayer*); aplicação para controle de dengue, onde o usuário obtém várias informações sobre a doença e indica se já teve alguma vez (*JiTVDengue*); e aplicação para votar pela televisão (*JiTVElection*).

Bordignon (2006) aponta que a TV Digital chega como um novo canal de comunicação e meio de disponibilizar novos serviços por meio da televisão, como o *t-mail* e *t-commerce*. Entretanto, ao mesmo tempo em que essa nova tecnologia facilita a vida das pessoas, também requer que um conjunto de processos e protocolos seja desenvolvido em prol da garantia de segurança nesse ambiente.

Com base nessas necessidades, Bordignon (2006) analisa as ferramentas e protocolos disponíveis para comunicação segura de dados por meio da TV Digital e apresenta também um *framework*, desenvolvido com o objetivo de facilitar o desenvolvimento de aplicativos que necessitem de segurança no canal de interatividade. Um protótipo de aplicação de envio de mensagens por meio da TV Digital também foi desenvolvido, tendo em vista testar e demonstrar a utilização do *framework*.

Somado a tudo que foi exposto, estudos como (MARGALHO et al., 2007), abordam o lado de inclusão digital/social da TV Digital, já que os autores demonstram um estudo que comprova que em regiões com pouca infraestrutura de telecomunicações, a escassez de tecnologias de acesso na primeira milha acaba gerando altos níveis de exclusão tecnológica (digital divide).

Segundo fatores citados no artigo anterior, isso compromete metas governamentais de inclusão digital e isola, tecnologicamente, grande parte da população. A investigação de tecnologias alternativas de acesso nesses cenários pode viabilizar o uso de sistemas emergentes, como o de TV Digital, como instrumento no processo de inclusão tecnológica. Este artigo propõe o uso de um *framework* flexível, capaz de viabilizar o processo interativo através de um mecanismo distribuído de interatividade.

Outros trabalhos que abordam o lado social da TV Digital também foram encontrados, como (BAILLIE et al., 2007), onde os autores exploram aplicações que possuem o objetivo de promover o acesso universal de usuários, através da utilização da televisão. Neste trabalho são realizados testes com usuários utilizando aplicações de diversos tipos, sendo analisadas características de interação homem computador.

Em (OLIVEIRA et al., 2009), os autores falam sobre o Ginga e apresentam o DIGA (*digital automation monitoring and control using GINGA technology*), que é uma parte do projeto Ginga CDN. A idéia principal do DIGA Ginga é o compartilhamento da estrutura de TV digital, adicionando serviços aos usuários, como aplicativos de *home care*, neste caso, foi desenvolvido um aplicativo piloto e foram realizados experimentos para monitor a pressão arterial de pacientes a partir da utilização da TV Digital e de um equipamento para medição de pressão.

Ainda sobre aplicativos de inclusão digital/social, Gondim e Corrêa (2009) apontam que um dos principais desafios do governo brasileiro para os próximos dez anos será a inclusão bancária da parcela mais pobre da população, que tem uma renda familiar mensal de menos de um salário mínimo. A partir de aspectos levantados, os autores indicam o uso da televisão digital como uma forma inovadora e eficaz para a inclusão bancária, melhorando as estatísticas relacionadas com a inclusão digital/social, permitindo que muitas pessoas sejam capazes de obter programas de microcrédito e desfrutar de mais benefícios de cidadãos.

Os autores apontam que para uma adequada implantação de aplicações interativas, o uso de várias opções disponíveis como as tecnologias de primeira milha para o canal de retorno precisa ser avaliado. Enfatizando as necessidades e características específicas de *t-banking* para as pessoas não conectadas à Internet. O artigo aponta ainda diversas possibilidades de tecnologias de acesso, envolvendo PLC, redes celulares, DSL, etc., em prol da comunicação adequada quando se utiliza o canal de retorno do sistema de televisão digital.

4.4 – CANAIS DE RETORNO

Sobre a forma de ligação do usuário final à Internet, existem várias abordagens para prover serviço de acesso ao usuário final, como cita Xiao et al., (2007). Este tema já vem sendo bastante discutido na área, como mencionado por Dutta-Roy (2002), onde o autor mostra preocupação com o comportamento das redes a partir do acréscimo da quantidade de usuários finais. O artigo cita, entre outras coisas, o crescimento do acesso de usuários a partir de diferentes sistemas e as variadas formas de acesso disponíveis, sendo destacadas: ADSL, *cable modem*, conexões sem fio, PLC e fibra ótica.

Em (CAMPISTA et al., 2007) os autores realizam um estudo de viabilidade de utilização do padrão IEEE 802.11, como canal de retorno para TV Digital. O artigo apresenta um comparativo entre as tecnologia WiMAX, ADSL, PLC, CDMA 1xEV-Do *wireless* padrão IEEE 802.11. Os estudos foram feitos em cenários reais, utilizando ambientes de Copacabana e da favela da Rocinha, no Rio de Janeiro. A conclusão alcançada é de que a utilização da tecnologia *ad hoc* pode ser viabilizada como canal de retorno para um ambiente de TV Digital interativa.

Podem ser encontrados outros estudos sobre a utilização de tecnologias como canal de retorno para TV Digital, tal como (BUDRI et al., 2006), onde os autores apresentam alguns resultados de simulação de modelos concebidos para determinar a capacidade do sistema quanto ao número de estações de assinantes ativos, além de cenários específicos de acordo com a proposta, o tráfego de perfis de fontes e de propagação e as condições específicas de cobertura. Os resultados apresentados fornecem elementos para determinar a adequação da tecnologia WiMAX como canal de retorno para a maioria das aplicações interativas de televisão digital e também apresenta algumas condições que devem ser observadas.

Utilizando uma tecnologia de primeira milha que possui grande promessa de inclusão digital/social, Carvalho et al. (2006) mostra o PLC para transmitir informações. Este trabalho apresenta os resultados de testes experimentais e analisa a possibilidade de transmissão do canal de retorno em edifícios residenciais e áreas não residenciais no Brasil.

Já em (POLO et al., 2007) se tem uma arquitetura genérica de um canal de retorno implementado usando o PLC para a televisão digital interativa, com aplicações do tipo *e-health* e *e-learnig*. Os autores explicam que aplicações em regiões de baixa renda na América Latina e na Europa são promessas de soluções a serem adotadas, que implicam diretamente nos preços a serem cobrados aos clientes.

Algumas pesquisas também consideram o uso de tecnologias de acesso 3G para a TV digital. Em (JAIME et al., 2008), os autores investigam o desempenho fim-a-fim de usuários quando a tecnologia 3G é adotada como canal de retorno. A motivação para este trabalho foi estudar o comportamento de uma tecnologia de rádio para ser implementada como canal de retorno para um sistema de TV Digital interativa.

4.5 – GERAÇÃO DE CARGA E TV DIGITAL INTERATIVA

Outra preocupação encontrada na literatura é referente ao avanço do número de televisores digitais interativos que gerarão um aumento do número de acessos à infraestrutura de telecomunicações, o que ocasionará problemas, tais como apresentados em (HIDEYUKI et al., 2006), onde os autores propõem um método de controle de congestionamento adaptativo para o tráfego de telecomunicações massiva e intensiva esperada em comunicação integrada à serviços de radiodifusão.

O método proposto controla adaptativamente as transmissões de dados a partir de telespectadores através da combinação de restrições de transmissão e transmissão diferida dependendo dos estados de congestionamento, de modo que o congestionamento total do sistema seja evitado de forma eficaz. Além disso, utiliza o canal de radiodifusão, que é confiável e escalável, para controlar as respostas de um vasto número de espectadores.

O desempenho do método proposto é demonstrado através de experimentos em um *testbed*, onde cerca de um milhão de espectadores são emulados. Os resultados obtidos demonstram quantitativamente o desempenho do método de controle adaptativo e sua eficácia em condições de tráfego maciço e intenso.

Os mesmos autores de (HIDEYUKI et al., 2006) fizeram um melhoramento da proposta deste artigo, e através de conceitos de TV digital propuseram (HIDEYUKI et al., 2008), onde expõem um método de controle de acesso baseado em acompanhamento de amostragem para o tráfego voláteis (mutável) nos serviços de televisão interativa.

O método proposto controla o acesso de usuários de TV interativa utilizando as seguintes funções: em primeiro lugar, o volume total de acessos induzidos de todos usuários do sistema é estimado com precisão ao se medir o volume de acessos induzidos por usuários da amostra. Então, com estimativa dos resultados, o acesso de outros usuários que não pertencem à amostra retirada é controlado de modo que eles são inferidos dentro da capacidade do sistema.

Ao aplicar o método proposto, o congestionamento e a sobrecarga esperada durante a transmissão dos serviços de TV interativa são evitadas, mesmo quando o volume de indução dos acessos momentaneamente exceder a capacidade do sistema. O desempenho do método proposto também é avaliado através de experimentos em um *testbed* montado, onde um grande número de acesso é gerado. Os resultados obtidos quantitativamente demonstram a sua eficácia.

Uma forma de mensurar a carga dos sistemas que estão sendo utilizados, visando prevenir gargalos, é com a utilização de ferramentas de controle e monitoramento, como as citadas anteriormente. Outro mecanismo bastante promissor é apresentado por Branco e Ordonez (2006), que procuraram compilar e mostrar o estado da arte do conceito de índices de carga, constantes da literatura. Além disso, os autores apresentaram um novo modelo usado para obter um melhor desempenho em sistemas heterogêneos e propor novas investigações para o futuro de índices e métricas de carga. O artigo citado anteriormente se baseia na Tese proposta por Branco (2004), que aponta índices de carga e desempenho em ambientes paralelos e distribuídos, utilizando modelagem e métricas descritas no trabalho.

4.6 – *PROVIMENTO DE SERVIÇO*

Em (PRADO; ZORZO, 2010), o autor diz que o sistema interativo de TV Digital permitirá uma nova gama de serviços distribuído através da televisão. Assim, os programas interativos podem ser distribuídos permitindo a interação do usuário. A interação implica em uma nova forma de produzir e pensar sobre o conteúdo de televisão. Este artigo tem por objetivo

apresentar uma arquitetura para provimento de serviço para sistemas de TV Digital interativa, com base na arquitetura orientada a serviços, garantindo uma comunicação padronizada entre aplicações cliente e seus serviços interativos. A diversidade de aplicações e o uso de um canal de retorno no contexto Brasileiro levam a um estudo de caso com o objetivo de considerar a intenção de inclusão social, especificado no Decreto n ° 4.901.

Já em (GOMEZ et al., 2012) apresenta o desenvolvimento e a implementação de um modelo computacional, baseado na aplicação de metaheurísticas, sobre uma plataforma IPTV (*Internet Protocol Television*) com o objetivo de desenvolver um algoritmo híbrido utilizando as metaheurísticas Busca Tabu e Algoritmo Genético, para provimento de serviços. Esse algoritmo permite que seja feita a análise e o estudo dos seguintes parâmetros: taxa de transmissão, qualidade de áudio, número de clientes e largura de banda visando encontrar a melhor configuração dos mesmos para a transmissão IPTV dadas às características do cliente. Após a validação do algoritmo são realizados experimentos que auxiliam a compreensão da dinâmica do sistema e viabilizam encontrar uma boa solução passível de simulação no simulador de rede *Network Simulator 3*.

Outro artigo encontrado foi (LEVIN, 2011), onde o autor foca um modelo combinatório baseado em análise multicritério para problema de primeira milha em seleção de conexão do usuário. O modelo citado aborda as problemáticas: *multicriterion ranking, knapsack-like problems, clustering e hierarchical morphological synthesis based on morphological clique problem*. O problema da primeira milha é analisado a partir dos seguintes pontos de vista: usuário, provedor de serviço e usuário-provedor. Dentre os principais objetivos apresentados pelo trabalho se pode destacar: selecionar a melhor conexão para o usuário e selecionar as melhores conexões a partir de diversos provedores. O modelo proposto permite a escolha feita tanto pelo usuário quanto pelo provedor de serviço. A Figura 4.1 ilustra a ideia proposta pelo autor.



Figura 4.1 - Ilustração do Problema da Primeira Milha (LEVIN, 2011) – traduzido com adaptações

A escolha da tecnologia de acesso a ser implantada como solução por um provedor de serviços é um assunto bastante discutido na literatura. Como aborda Nasser (2006), que usa a combinação de técnicas de controle, processos estocásticos e processo Markoviano de decisão, para estudar e examinar a relação entre decisões ótimas que devem ser aplicadas por provedores de serviço, para escolha de canal de retorno, utilizando diversos parâmetros de qualidade de serviço em redes heterogêneas. O modelo proposto é formulado como problema de programação linear com o objetivo de maximizar a utilização do sistema.

Nota-se que a questão de manter qualidade no provimento de serviço a partir da consolidação de novas ferramentas tecnológicas é um assunto bastante discutido na literatura. Outro ponto importante é como prover suporte à decisão no que concerne à seleção de canal de retorno, levando em considerações cenários/ambientes que possuem redes de diferentes categorias.

4.7 – SUPORTE À DECISÃO – HEURÍSTICAS PARA SELEÇÃO DE CANAL DE RETORNO EM AMBIENTES HETEROGÊNEOS

O uso de heurística para a tomada de decisão multicritério tem sido amplamente utilizada em diversas áreas, como mostrado em (KABAT et al., 2011), que apresenta uma heurística para tomada de decisão para seleção de roteamento *multicast* para núcleo de rede.

Algoritmos para tomada de decisão em redes heterogêneas possuem o conceito de escolher a melhor tecnologia a ser usada em um determinado cenário, avaliando critérios preestabelecidos no modelo. O conceito de escolha do melhor canal de retorno em ambiente de múltiplo acesso - *Always Best Connected* (ABC) - foi notoriamente tratado em (GUSTAFSSON; JONSSON, 2003).

Nesta seara, vários artigos apresentam algoritmos para seleção de canal de retorno em ambientes heterogêneos, tais como (BANKMAZ et al., 2007), (SGORA et al., 2010) e (SGORA et al., 2011).

Segundo (BANKMAZ et al., 2007) a transição para uma rede com melhor desempenho normalmente oferece melhores níveis de QoS. Métricas, tais como atraso, *jitter*, taxa de transferência, taxa de erro, e outros parâmetros podem ser medidos, a fim de decidir qual a rede pode proporcionar uma maior garantia de conectividade contínua.

Em (SGORA et al., 2010) e (SGORA, 2011), os autores, respectivamente, utilizam algoritmos de decisão multicritério usando métodos analíticos para classificar os candidatos para conexões de rede VOIP, *streaming* de mídia e aplicações *Web Browsing*; combinam dois métodos analíticos para tomada de decisão em um ambiente sem fio, usando o atraso, *jitter* e largura de banda como critérios para modelagem.

Uma boa literatura que resume os principais métodos utilizados atualmente para tomada de decisão multicritério pode ser observada em (HABIBA; ASGHAR, 2009), onde os autores apresentam uma visão geral sobre abordagens para tomada de decisão multicritério, através de um resumo contendo um comparativo das principais técnicas de decisão.

Para facilitar a divisão das diversas literaturas selecionadas durante o desenvolvimento deste trabalho, dividiu-se esta subseção em duas partes, com o intuito de abordar os principais métodos de tomada de decisão encontrados na área, apesar de que em muitos trabalhos eles acabam sendo complementares, conforme mostrado a seguir.

4.7.1 – SUPORTE À DECISÃO VIA AHP, ELECTRE, TOPSIS e FUZZY

Dentre os diversos autores que utilizam métodos analíticos para tomada de decisão multicritério, é possível citar Charilas et al. (2009) e Chen e Hung (2008), que defendem a aplicação de *Fuzzy* AHP juntamente com o método ELECTRE para seleção de canais de retorno em ambientes heterogêneos de redes sem fio e para avaliação e seleção de projetos de pesquisas e desenvolvimento, respectivamente.

Salehi; Moghaddam (2008) e Lo (2010) relatam em seus trabalhos resultados obtidos com a utilização de *Fuzzy* TOPSIS para: (i) selecionar projetos e serviços; (ii) ajudar

provedores de serviço a analisar a disponibilidade de serviços *web* com opiniões *fuzzy*, respectivamente.

Em (KAYA; KAHRAMAN, 2011) os autores apresentam um estudo que faz a integração de *fuzzy* AHP com ELECTRE para ambientes de avaliação de impacto. O *Fuzzy* ELECTRE, como é chamado, é usado para avaliar o impacto ambiental gerado por seis diferentes distritos industriais na região de Istanbul – Turquia.

No trabalho (BARI; LUENG, 2007), os autores aplicam o método ELECTRE para seleção de rede em um ambiente de redes heterogêneas sem fio. O artigo faz a adaptação do método ELECTRE para realizar comparação par a par sobre as alternativas, visando solucionar o problema de escolha de melhor tecnologia.

Os autores de (MAHMOODZADEH et al., 2007) abordam a seleção de projetos utilizando *Fuzzy* AHP e a Técnica TOPSIS. O *Fuzzy* AHP é utilizado para se obter o peso de cada critério e uma implementação de TOPSIS é utilizada para avaliar o melhor projeto. Os critérios utilizados foram: Taxa de retorno do projeto, período necessário para retorno análise de custo/benefício e valor líquido obtido com o projeto.

WANG et al., (2009) propõem um algoritmo para melhorar o método TOPSIS de decisão juntamente com lógica *fuzzy*. Este estudo propõe TOPSIS hierárquico *fuzzy*, que não só é adequado para avaliar os problemas imprecisão e incerteza, mas também pode fornecer pesos para critérios de forma mais objetiva e precisa. Para aplicação e verificação, este estudo apresenta um exemplo numérico e constrói um problema de seleção prático para ratificar o método proposto e compará-lo com outros métodos.

Chen (2010) apresenta as ideias básicas do AHP e lógica *fuzzy*. Neste trabalho se destaca ainda que a avaliação de risco de um projeto é uma referência muito complexa para ser entendida só quantitativamente. O método AHP convencional não reflete verdadeiramente o pensamento cognitivo humano. Por isso o autor avalia a utilização do AHP juntamente com a lógica *fuzzy*.

Em (PENG; DAI, 2009) os autores também apresenta uma combinação entre o método AHP e lógica *fuzzy*. O chamado AHP-*Fuzzy* tenta unificar os méritos de cada método/modelo e fazer a tomada de decisões mais científica. Com a utilização do AHP e a combinação de

uma avaliação *fuzzy*, pode-se avaliar de forma qualitativa e quantitativa um modelo de avaliação de risco.

Já em (TORFI et al., 2009), é proposto um estudo de decisão multicritério *fuzzy* (FMCDM). O *Fuzzy Analytic Hierarchy Process* (FAHP) é aplicado para determinar valores relativos de pesos. Resultados empíricos mostram a viabilidade do método proposto. O objetivo deste estudo é propor uma abordagem *fuzzy* multicritérios de tomada de decisão (FMCDM) para avaliar as opções alternativas no que diz respeito às ordens de preferência dos usuários. Os resultados empíricos mostram que os métodos propostos são abordagens viáveis para resolver o problema. Segundo o trabalho, quando as avaliações de desempenho são vagas e imprecisas, o MCDM *fuzzy* é uma solução satisfatória.

De forma similar aos dois artigos anteriores, Kwong e Bai (2002) mostram o chamado método *fuzzy*-AHP para a determinação dos pesos de importância dos requisitos do cliente no desdobramento da função qualidade. A diferença básica entre os três artigos de *fuzzy*-AHP é a forma como é implementada a *fuzzyficação* no método AHP.

Conforme destacado nos trabalhos correlatos, os métodos abordados possuem utilização nas mais diversas áreas, na área de transportes, por exemplo, o método foi aplicado para escolha de um novo aeroporto concentrador na Europa, Janic e Reggiani (2002) trabalharam com três métodos multicritério: o TOPSIS, o SAW (*Simple Additive Weighting*) e o AHP.

Outra experiência feita em torno do TOPSIS foi relatada por Saghafian e Hajazi (2005), que propuseram uma adaptação dos conceitos da lógica *fuzzy* ao método tradicional. A premissa dos autores é de que o método clássico é excessivamente determinístico e não levaria em conta as sutilezas inerentes ao comportamento humano. Basicamente o processo adotado é o mesmo do modelo proposto por Hwang e Yoon (1981). A diferença está em que os critérios postos à disposição dos avaliadores utilizam recursos qualitativos associados a três referências numéricas, em vez de uma do método tradicional. Essas referências baseiam-se nos números *fuzzy* n_1 , n_2 , e n_3 , plotados em um triângulo que os autores aproximam como simétrico

4.7.2 – SUPORTE À DECISÃO VIA REDES BAYESIANAS

Embora métodos/técnicas de agregação de preferência ou prioridade, tais como o AHP, tenham sido propostos para resolver conflitos e diferenças, por trabalharem com opiniões de profissionais da área da tomada de decisão, as manipulações das ponderações entre critérios costumam ignorar a variação ou dispersão entre as opiniões entre os especialistas, tornando o método vulnerável em alguns aspectos, visto que podem possuir pontos de vista particulares ou representar a ideia de algum especialista de forma distorcida.

Assim, alguns estudos propõem abordagens que extraíam os pesos atribuídos para os critérios de forma objetiva. Tal como em (LIN et al., 2010), onde os autores propõem uma abordagem de regressão linear para estimar os pesos de decisão do AHP, utilizando modelos lineares mistos (LMM). Além de determinar os vetores de peso, este modelo também permite decompor a variação ou incerteza no julgamento de especialistas. Em particular, a variação entre os especialistas e a incerteza residual devido a erros de arredondamento na escala AHP ou devido à inconsistência dentro julgamentos especializados de um indivíduo pode ser estimado e rigorosamente testados usando bem conhecidas teorias estatísticas. Além de caracterizar diferentes fontes de incerteza, este modelo permite testar rigorosamente outros fatores que podem afetar as avaliações de peso significativamente.

O uso de redes bayesianas com a decisão multicritério é um assunto interessante, como comenta Fu e Delcroix (2011), em que os autores argumentam que o problema da tomada de decisão multicritério é encontrar a solução mais satisfatória entre muitas alternativas, tendo em conta vários critérios que podem ser conflitantes. O método proposto incide sobre a pessoa uma vez que a importância (peso) determinada para cada critério é definido de acordo com as características da pessoa. Os autores utilizam uma estrutura especial de RB com base no método AHP.

Em (XUAN, 2008), o autor apresenta um modelo de decisão para determinar os pesos para a aplicação, usando um atributo de decisão multi-modelo de tomada baseada em redes bayesianas. Técnica crítica, *dasiaBayesian networkspsila* é usado para determinar valores para os pesos, o que combinado informação prévia (conhecimento *expertspsila* outro, ou simulação numérica, etc) com o conhecimento *expertspsila*.

Já em (XUAN et al., 2009), o peso em TOPSIS é dada por especialistas ou tomadores de decisão. O valor do peso seria influenciado por juízos *expertspsila* subjetivos. Uma ligeira diferença nos valores de peso pode resultar em diversidade de ordem de alternativas. Neste trabalho, um método Bayesiano para a tomada de peso para MADM modelo com dados de intervalo é introduzido. O valor do peso é decidido por uma informação a priori (conhecimento *expertspsila* outro, ou simulação numérica, etc) e conhecimento de especialistas (ou decisão experiência *makerspsila* / preferência).

4.8 – SÍNTESE DOS TRABALHOS CORRELATOS

Para um melhor entendimento sobre a revisão bibliográfica realizada nesta Tese, elaborou-se uma tabela contendo um resumo dos trabalhos correlatos com suas principais lacunas encontradas, conforme mostra a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Síntese dos Trabalhos Correlatos

Referencia	Foco do artigo	Principais lacunas encontradas
(COSTANZO; NETO, 2007), (BRACKMANN et al., 2008) e (VIANA et al., 2009).	TV Digital e SBTVD	Implementação em cenários reais para validação das propostas.
(SANTOS et al., 2010), (BORDIGON, 2006), (MARGALHO et al., 2007), (BAILLIE et al., 2007), (OLIVEIRA et al., 2009), (GODIM; CORRÊA, 2009).	Aplicações Interativas para TV Digital	Estudos com múltiplos canais de retorno, visando analisar o impacto das aplicações desenvolvidas sobre a infraestrutura de telecomunicação existente.
(XIAO et al., 2007), (DUTTA-ROY, 2002), (CAMPISTA et al., 2007), (BUDRI et al., 2006), (CARVALHO et al., 2006), (POLO et al., 2007), (JAIME et al., 2008).	Canais de Retorno	Os artigos apresentam estudos de tecnologias de forma isolada, não considerando a utilização em ambientes heterogêneos. Em alguns artigos, faltou a projeção dos dados obtidos em cenários reais em simuladores, visando analisar o comportamento do sistema em larga escala.
(HIDEYUKI et al., 2006), (HIDEYUKI et al., 2008), (BRANCO; ORDONEZ, 2006), (BRANCO, 2004).	Geração de Carga e TV Digital Interativa	Proposição de estratégias baseadas em análise multicritério, utilizando métodos analíticos e de inteligências computacionais combinados.
(PRADO; ZORZO, 2010), (GOMEZ et al., 2012), (LEVIN, 2011), (NASSER, 2006).	Provimento de Serviço	Utilização de métodos analíticos a partir de vetores de pesos analisados com redes bayesianas e não em expertise de especialistas da área, como propõe outros métodos mais tradicionais como o AHP. Além disso, os artigos não deixam claro como foram feitas as aferições das tecnologias envolvidas.
(KABAT et al., 2011), (GUSTAFSSON; JONSSON, 2003), (BANKMAZ et al., 2007), (SGORA et al., 2010), (SGORA et al., 2011), (HABIBA; ASGHAR, 2009).	Suporte à Decisão: Heurísticas para Seleção de Canal de Retorno em Ambientes Heterogêneos	Consideram poucos critérios para tomada de decisão, além de não considerar a extração do vetor peso de uma base de dados aferida de ambiente simulado.
(CHARILAS et al., 2009), (CHEN; HUNG, 2008), (SALEHI; MOGHADDAM, 2008), (LO, 2010), (KAYA; KAHRAMAN, 2011), (BARI; LUENG, 2007), (MAHMOODZADEH et al., 2007), (WANG et al., 2009), (CHEN, 2010), (PENG; DAI, 2009), (TORFI et al., 2009), (KWONG; BAI, 2002), (JANIC; REGGIANI, 2002), (SAGHAFIAN; HAJAZI, 2005).	Suporte à Decisão via AHP, ELECTRE, TOPSIS e FUZZY	Utilização de uma estratégia de tomada de decisão que utilize o vetor peso extraído de resultados de ambientes simulados que foram criados a partir da caracterização de carga de aplicação digitais interativas que foram executadas em cenários reais.
(LIN et al., 2010), (FU; DELCROIX, 2011), (XUAN, 2008); (XUAN et al., 2009)	Suporte à Decisão via Redes Bayesianas	Combinação de Redes Bayesianas com métodos analíticos para tomada de decisão de canais de retorno para ambiente de TV Digital interativa.

4.9 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apontados alguns dos trabalhos e referências estudados que possuem relação às técnicas/ferramentas abordadas nesta proposta de Tese, de modo a ilustrar o estado-da-arte da área. Os trabalhos apresentados demonstram que estão sendo realizados diversos estudos na área de SBTVD, tecnologias de acesso, desenvolvimento de aplicativos, suporte à decisão, provedores de serviço, etc. Após análise dos artigos apresentados, foram encontradas lacunas que merecem atenção, entre as quais estão: estudos que utilizem estratégias de análise multicritério, utilizando métodos analíticos e de inteligência computacional combinado; implementação em cenários reais para validação das propostas; implementação de aplicativos de tomada de decisão em plataformas abertas; configuração de base de dados consolidadas, obtidas a partir de simuladores; caracterização de cargas oriundas de aferições em cenários reais; utilização de métodos analíticos a partir de vetores de pesos analisados com redes bayesianas e não em expertise de especialistas da área, como propõe outros métodos mais tradicionais como o AHP; utilização de diferentes tecnologias de acesso já consolidadas no mercado.

A partir da revisão bibliográfica realizada, nota-se que as literaturas encontradas tratam as lacunas destacadas (na Tabela 4.1) de forma individualizada, ou seja, cada artigo considera a solução de apenas uma ou no máximo duas lacunas, assim, não existe uma estratégia que trate, de forma conjunta, as omissões relatadas. Assim, um ponto interessante seria a proposição de um trabalho que abrangesse todas as lacunas relatadas no parágrafo anterior.

Diante ao exposto, esta Tese apresenta uma estratégia inédita que considera uma consistente aglutinação de utilização de medição em cenários de testes reais, correlações das variáveis envolvidas, técnicas de tomada de decisão, considerando fluxos de TV Digital interativa. O próximo capítulo apresenta a estratégia de análise multicritério para seleção de tecnologia de canal de retorno no padrão ISDB-T.

5. ESTRATÉGIA DE ANÁLISE MULTICRITÉRIO PARA SELEÇÃO DE TECNOLOGIA DE CANAL DE RETORNO NO PADRÃO ISDB-T

5.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A elaboração de um modelo multicritério para tomada de decisão se fundamentou em um ambiente baseado em aplicações de TV Digital interativa. A escolha do canal de retorno se dá a partir de parâmetros de qualidade de serviço, de tal forma que provedores de serviços possam verificar a melhor opção de seleção de canal de retorno em determinado cenário. A Figura 5.1 condensa as cinco etapas da estratégia de tomada de decisão proposta nesta Tese. As seções posteriores irão detalhar cada etapa da estratégia proposta.

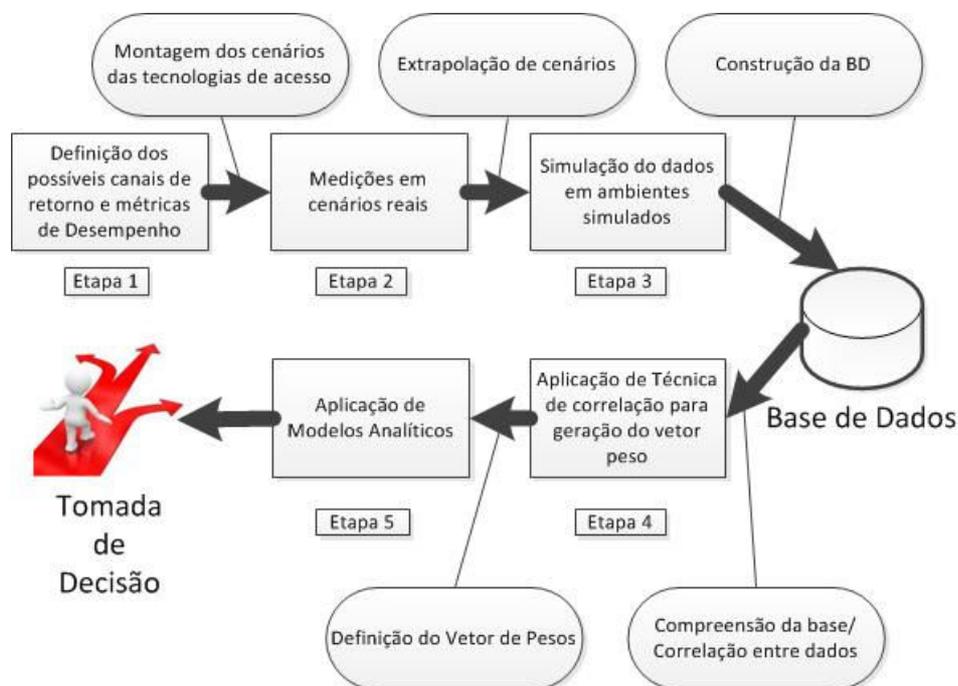


Figura 5.1 - Etapas da estratégia de tomada de decisão

5.2 – DEFINIÇÃO DOS CANAIS DE RETORNO E DAS MÉTRICAS DE DESEMPENHO

A etapa 1 consiste em definir os canais de retorno (tecnologias de rede) que podem ser escolhidos, bem como as métricas de desempenho que serão utilizadas como critérios para tomada de decisão. Esta fase é de fundamental importância, pois entre a gama de tecnologias de acesso existentes, é necessário estabelecer quais tecnologias deverão ser alvo de comparação para tomada de decisão. Além disso, devem-se estabelecer quais critérios serão avaliados neste processo decisório.

Dentre a gama de tecnologias disponíveis, as escolhidas para os cenários montados foram as já relatadas na seção 2.4, sendo estas: PLC, ADSL2+, WiMAX e 3G. A motivação da escolha destas tecnologias será descrita a seguir, no estudo de caso apresentado na seção 6.2.

Após revisão literária, diversas métricas de rede (neste caso, também chamados de critérios e/ou parâmetros), que poderiam ser utilizados no modelo, foram analisadas. A Figura 5.2, abaixo, mostra a estrutura geral elaborada para tomada de decisão.

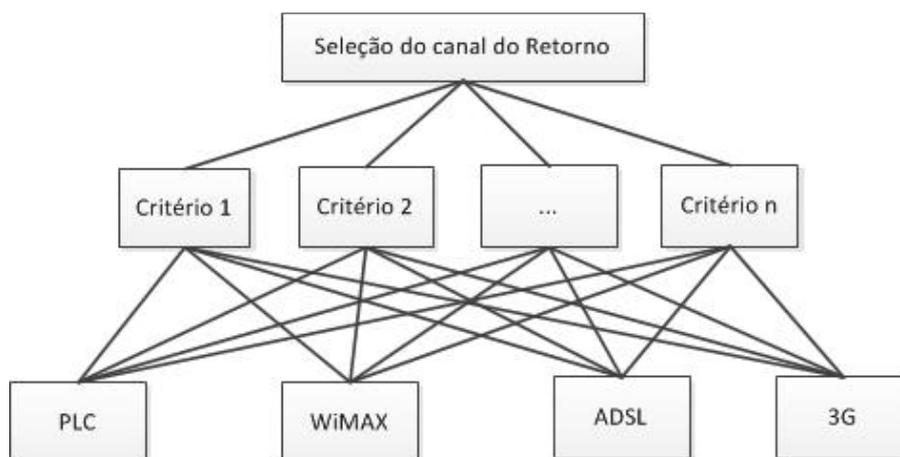


Figura 5.2 - Estrutura Geral para Tomada de Decisão.

Para análise de redes, as métricas de qualidade de serviço utilizadas foram as mostradas na Tabela 5.1. Ao lado de cada métrica, entre parênteses, encontra-se a abreviação que será utilizada no decorrer desta Tese.

Tabela 5.1 - Métricas utilizadas no modelo de tomada de decisão

Métricas	Descrição
Conexões Ativas (C)	Numero total de conexões circundantes ao nó analisado.
Vazão (V)	Número médio de <i>bits</i> transmitidos através do canal de retorno por unidade de tempo.
<i>Jitter</i> (J)	Variação do atraso, isto é, a diferença entre os dois tempos de atraso.
Atraso (A)	Atraso de extremo a extremo, de todos os pacotes recebido pelo MAC de todos os nós da rede e encaminhado para a camada superior.
Retransmissões (R)	Número total de retransmissões de um nó para todos seus destinatários.
Tempo de Resposta do Objeto (T)	Especifica o tempo de resposta para cada objeto de uma página HTML.
Dados Descartados (D)	Quantidade de pacotes que não conseguiram ser tratados, devido a estouro de <i>buffer</i> ou problemas na comunicação.

A escolha destes critérios foi motivada pela representação que estes possuem no que concerne à qualidade de serviço da aplicação, ou seja, tais métricas podem representar com clareza o quanto uma aplicação atende às expectativas. Como a estratégia proposta é genérica e flexível, outros parâmetros podem ser atribuídos ao sistema, sem interferir em sua eficácia. Após a definição dos critérios que seriam utilizados, passou-se a analisar os cenários que seriam simulados.

5.3 – MEDIÇÕES EM CENÁRIOS REAIS

A etapa 2 consiste na concepção de cenários realísticos, com as tecnologias selecionadas, com o objetivo de aferir os valores das métricas escolhidas. Para geração do modelo baseado no padrão ISDB-T, foi necessário estudar o comportamento de uma interação típica de TV Digital.

A Figura 5.3 mostra a infraestrutura montada para caracterização de carga do aplicativo de TV Digital interativa. O típico cenário montado apresenta a camada de transmissão, responsável pela difusão dos programas televisivos de forma broadcast. Para esta camada, foi utilizado um equipamento chamado de EITV - playout¹⁰, que possui a responsabilidade da entrega do conteúdo broadcast no padrão ISDB-T.

¹⁰ Maiores detalhes em <http://www.eitv.com.br/playout.php>

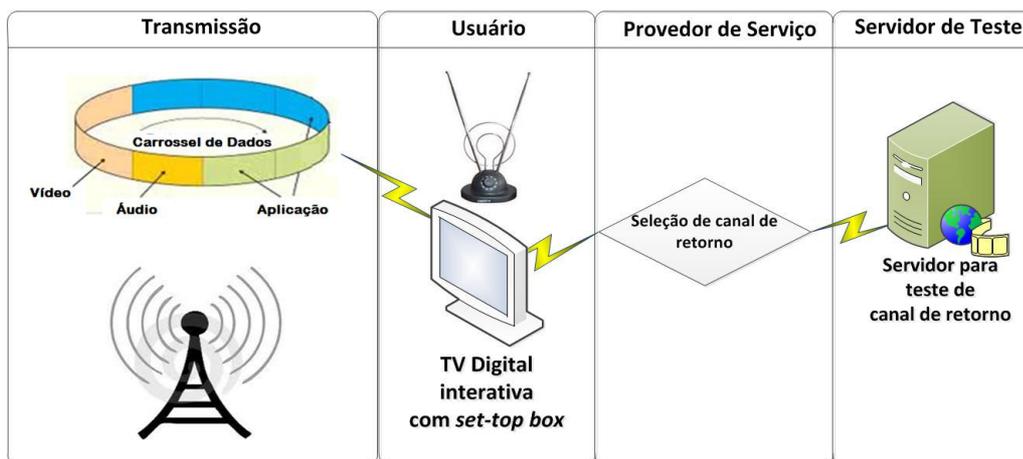


Figura 5.3 - Infraestrutura para Caracterização de Carga do Aplicativo Interativo

A aplicação é recebida e executada pela camada do usuário, que possui uma televisão interligada com um *set-top box*, Modelo *Proview XPS-1000*, que por sua vez terá um canal de retorno para prover a interatividade. A camada provedor de serviço é responsável por fornecer a infraestrutura do canal de retorno, sendo que o modelo de seleção irá atuar nesta camada (sendo esta a contribuição do trabalho), elencando a melhor tecnologia a ser utilizada, seja esta cabeada ou sem fio. Existe ainda uma camada chamada de servidor de teste, que tem a função de auxiliar nos critérios de medição utilizados para a tomada de decisão. Esta última camada é responsável pela resposta das requisições de teste que serão geradas pelo *set-top box*.

A montagem do cenário supracitado foi baseada na extração de medidas de um típico sistema de TV digital com interação. O aplicativo usado nos testes foi desenvolvido pelo grupo de pesquisa do LPRAD e é chamado de DTV-Educ 2.0 - maiores detalhes sobre o aplicativo DTV-Educ 2.0 podem ser encontrados em (MONTEIRO et al., 2011). O objetivo desta aplicação é gerar um ambiente de bate-papo, tornando-a disponível para ser utilizada em um programa de televisão regular, de modo que um aluno que esteja assistindo a um programa educacional na televisão, por exemplo, possa realizar perguntas ao professor em tempo real ou até mesmo realizar o trabalho em grupo com outros estudantes.

O DTV-Educ 2.0 usa o HTTP (*HyperText Transfer Protocol*) como protocolo da camada de transporte e REST (*REpresentational State Transfer*) como protocolo da camada de aplicação. Por esse motivo a especificação adotada para a simulação é a HTTP 1.1.

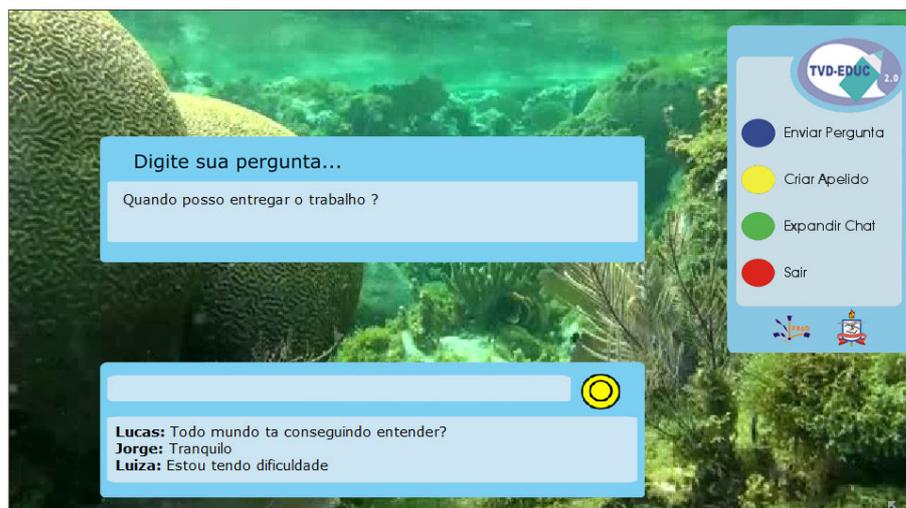


Figura 5.4 - Aplicativo TVD-Educ 2.0 durante uma conversa no chat

A Figura 5.4 mostra uma tela da aplicação desenvolvida e em execução no OpenGinga (Ginga plataforma emulador) durante uma conversa. O aplicativo apresenta o histórico de mensagens trocadas entre os participantes do chat durante um programa de televisão.

Para caracterização da carga da aplicação na rede, foram realizados testes reais onde dois usuários permaneceram por 10 minutos trocando mensagens, através do chat disponibilizado pela aplicação. O tempo de troca de troca de mensagens utilizado foi retirado da literatura especializada, para que se pudesse ter um intervalo confiável.

Foram realizados testes com o aplicativo TVD-Educ 2.0 para a captura do intervalo de tempo entre os pacotes trafegados na rede e também o tamanho dos pacotes, que foi possível com a utilização do software *Wireshark*¹¹, que possui a facilidade em criar filtros para os pacotes capturados auxiliando na análise do tráfego de rede.

Após esta etapa foi adotada a versão de teste da ferramenta de tratamento estatístico *EasyFit 5.5*¹², onde se obteve, para o intervalo de tempo entre os pacotes e o tamanho dos pacotes, diversas distribuições da aplicação TVD-Educ 2.0: Função de Distribuição de Probabilidade *Weibull* (Figura 5.5) e Função de Distribuição de Probabilidade *Lognormal* (Figura 5.6). As Figuras mostram a probabilidade (eixo y) em relação ao tempo (eixo x).

¹¹ Disponível em <http://www.wireshark.org/download.html>

¹² Disponível em <http://www.mathwave.com/downloads.html>

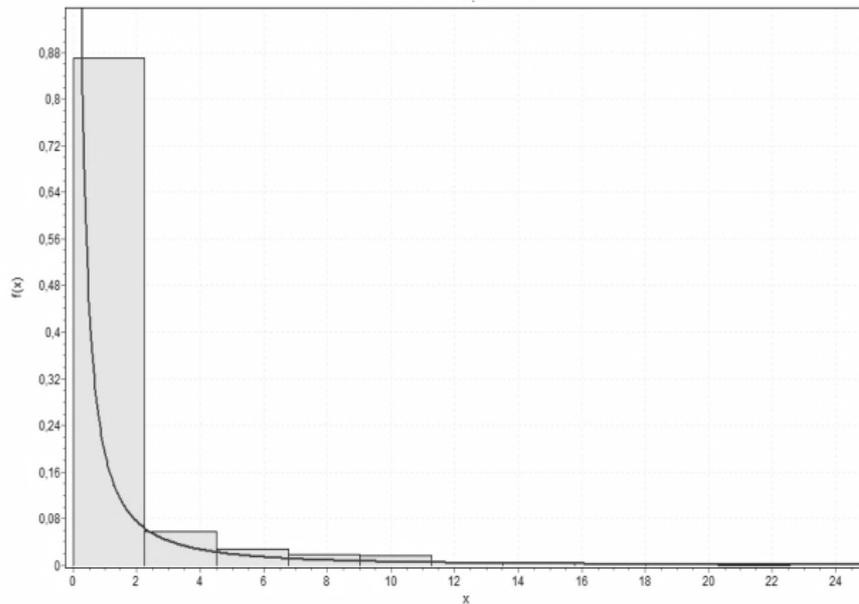


Figura 5.5 - Função de Distribuição de Probabilidade do Intervalo de Tempo entre os Pacotes (*Weibull*)

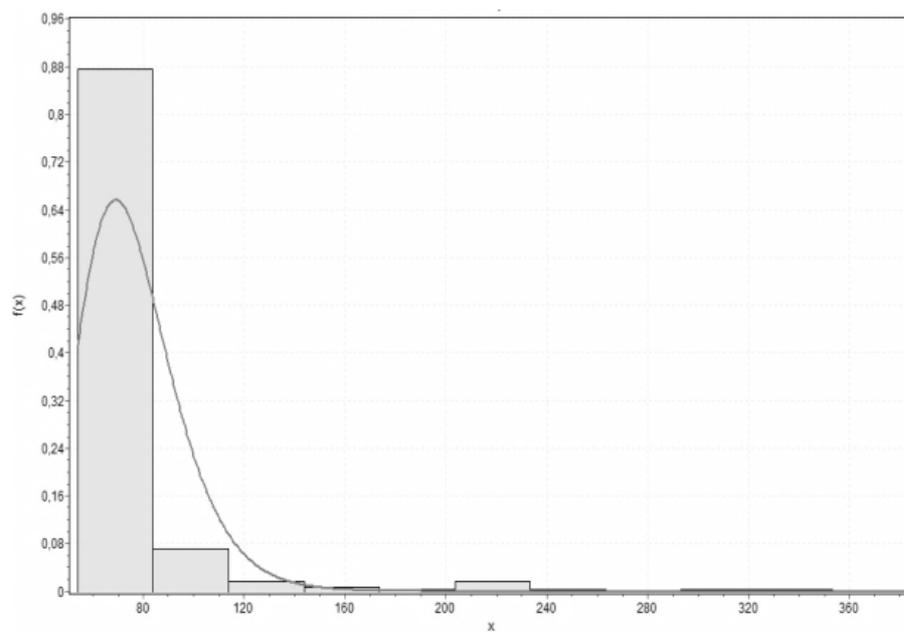


Figura 5.6 - Função de Distribuição de Probabilidade do Tamanho dos Pacotes (*Lognormal*)

A definição das probabilidades faz-se necessária para a caracterização da carga de tráfego das aplicações, às quais foram inseridas no simulador utilizado. O simulador possui sua própria biblioteca contendo uma série de distribuições, entre as quais se procura a mais semelhante a real, para que sejam efetuadas as simulações. A Tabela 5.2 sumariza os resultados estatísticos aferidos desta aplicação.

Tabela 5.2 - Resultados Estatísticos para TVD-Educ 2.0

Parâmetros	Valor
Pacotes Transmitidos	575
Média de Pacotes por segundo	1.016
Média de Tamanho do Pacote	59.927 bytes
Média da Vazão	60.898 bytes/s

Os dados aferidos foram utilizados para a configuração da aplicação em um cenário de simulação. Destaca-se que esta aplicação, quando comparada com outros tipos de aplicações tradicionais, não exige muito da rede, pois seu tráfego consiste apenas em texto limpo que é digitado pelos usuários. De forma geral, as aplicações utilizadas em ambiente de TV Digital possuem este comportamento. Contudo, como o acesso da TV Digital é concentrado em uma programação, a rede tende a ser saturada por período de tempo (gargalo de acesso).

A partir da caracterização da carga da aplicação de TV Digital, foram definidos outros parâmetros que seriam inseridos no ambiente de simulação utilizado. Os valores coletados nesta etapa são utilizados como entrada na etapa 3, onde se extrapola o comportamento das redes, através da utilização de simulação discreta e de simuladores de propósito específico.

5.4 – SIMULAÇÃO DOS DADOS EM AMBIENTES SIMULADOS

Para um melhor entendimento da etapa 3 - que possui a função de extrapolação dos cenários reais testados, via simulação - foi dividida em duas partes, a primeira responsável pela definição dos fluxos para simulação e a segunda apresentando as simulações dos cenários.

5.4.1 – DEFINIÇÃO DOS FLUXOS PARA SIMULAÇÃO

Após a caracterização da carga do aplicativo de TV Digital, foi necessário realizar uma pesquisa literária do fluxo comumente usada na Internet, visando a aproximar ao máximo o ambiente de um usuário utilizando uma aplicação interativa em um cenário real.

Assim, foram definidos três fluxos que foram utilizados nos testes de simulação: (i) aplicação de vídeo (vídeoconferência); (ii) aplicação de voz sobre IP (VoIP); (iii) e aplicação típica de TV Digital (DTV-Educ 2.0). Estas três aplicações de tráfego utilizadas visam modelar o tráfego usado por clientes típicos que utilizam a Internet, sendo que as duas primeiras foram extraídas de (CASTRO, 2004).

A definição das probabilidades foi coletada para a caracterização da carga de tráfego das aplicações, às quais foram inseridas no simulador. A especificação da carga de tráfego para a aplicação DTV-Educ 2.0 é encontrada na Tabela 5.3, sendo que foi definido o tipo de HTTP utilizado, o intervalo de carregamento das páginas, as propriedades das páginas carregadas e o tipo de serviço (sendo o de “melhor esforço”).

Tabela 5.3 - Parâmetros para Aplicação de TV Digital

Parâmetros de Configuração	Valor
HTTP (Especificação)	HTTP 1.1
Intervalo de tempo chegada de Páginas (segundos)	<i>Weibull</i> (0.30419, 0.1139)
Propriedades da Página	Lognormal (4.2996, 0.25489)
Tipo de Serviço	<i>Best Effort</i> (0)

Os parâmetros configuráveis para o tráfego de vídeo (Tabela 5.4) são os valores de tempo de chegada de pacotes (*frame interarrival time*), expressado por um valor constante, e tamanho do pacote (*frame size*), que é uma variável aleatória com distribuição exponencial. Os valores atribuídos nestas duas variáveis geram uma aplicação de vídeo com taxa de 1,5 Mbps para cada cliente. O parâmetro *type of service* também é configurado e representa a prioridade que será dada a aplicação na rede, que é do tipo melhor esforço.

Tabela 5.4 - Parâmetros para Aplicação de Vídeo

Parâmetros de Configuração	Valor
Intervalo de tempo chegada de <i>Frame</i> (segundos)	<i>Constant</i> (0.1)
Tamanho do <i>Frame</i> (<i>bytes</i>)	<i>Exponential</i> (15625)
Tipo de Serviço	<i>Best Effort</i> (0)

A configuração da aplicação VoIP é apresentada na Tabela 5.5, e através dos parâmetros de configuração desta Tabela o simulador modela a aplicação a ser utilizada na simulação. Os tempos de fala e de silêncio usados para modelar a aplicação de voz são representados pelos parâmetros *talk spurt length* e *silence length*. Os parâmetros *encoder scheme* e *voice frame per packet* caracterizam, respectivamente, o tipo de codificador usado na geração do tráfego de voz e a quantidade de quadros de voz por pacote durante a simulação.

Tabela 5.5 - Parâmetros para Aplicação de Voz

Parâmetros de Configuração	Valor
Comprimento do Silêncio - <i>Silence Length</i> (segundos)	<i>Exponential</i> (0.65)
<i>Talk Spurt Length</i> (segundos)	<i>Exponential</i> (0.352)
Codificação	GSM (<i>silence</i>)
<i>Frames</i> de Voz por Pacote - <i>Voice Frames per Packet</i>	1
Tipo de Serviço	<i>Best effort</i> (0)

De acordo com a Tabela 5.5, a aplicação VoIP utiliza a codificação GSM e gera uma taxa de aproximadamente 20 Kbps. O parâmetro *type of service* também é configurado e representa a prioridade que será dada a aplicação na rede, que é do tipo melhor esforço. Desta forma, os fluxos foram definidos e suas respectivas características foram modeladas através dos parâmetros configuráveis pelo simulador.

5.4.2 – SIMULAÇÕES DOS CENÁRIOS

O desenvolvimento dos testes de simulação necessitava de uma ferramenta que pudesse imitar o desempenho da rede, realizando testes que extrapolassem a capacidade nominal de cada tecnologia. Desta forma, foi escolhido o simulador OPNET *Modeler*, que é largamente utilizado como instrumento para modelagem de redes de telecomunicações, sendo que seu ambiente de trabalho permite criar uma rede a partir de uma biblioteca de modelos, além de definir parâmetros não só do ambiente, como também de cada objeto que a compõe, e os impactos de suas variações (OPNET, 2012).

Por meio da utilização deste simulador, foi possível observar o comportamento de uma rede baseada em WiMAX, com os parâmetros definidos na seção anterior. A Figura 5.7 mostra um dos cenários montados no simulador, contendo 32 nós, utilizando os três fluxos definidos anteriormente; uma antena WiMAX, comunicando com um *backbone*, que por sua vez comunica com o servidor de testes; as caixas de definições das aplicações, dos *profiles* e da antena WiMAX.

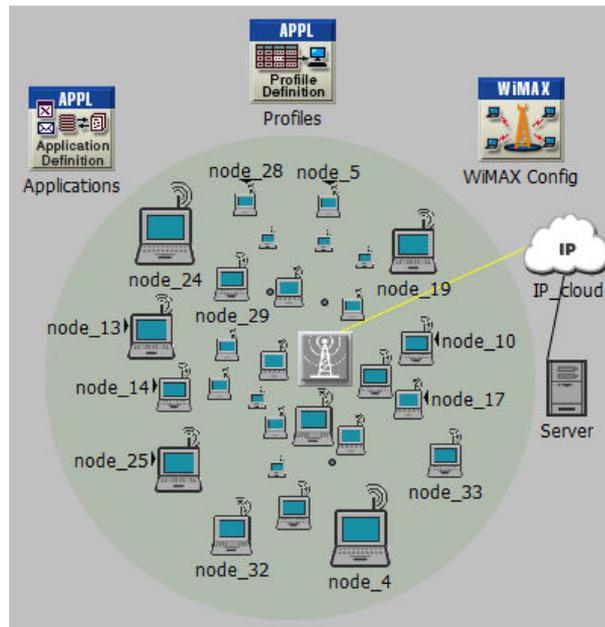


Figura 5.7 – Cenário Montado no Simulador OPNET – 32 usuários

A Figura 5.8 mostra um dos cenários montados no simulador para analisar o comportamento da rede sobre altas taxas de transmissão. Neste caso, foram simulados 200 usuários acessando a antena WiMAX de forma simultânea.

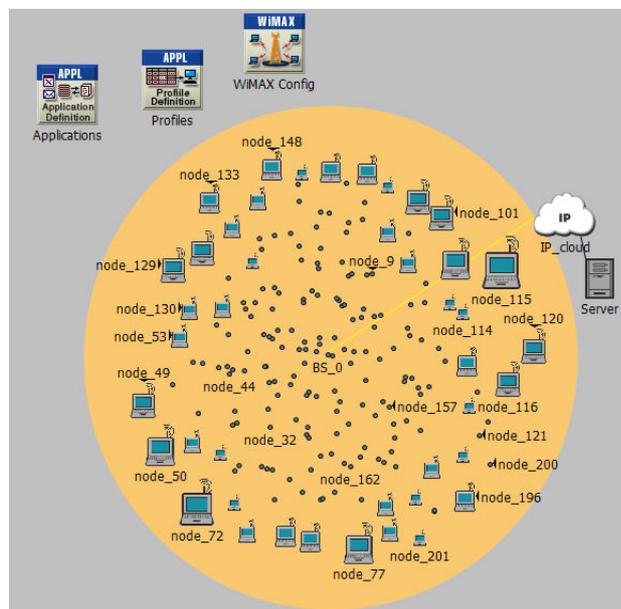


Figura 5.8 – Cenário Montado no Simulador OPNET – 200 usuários

Em todos os casos, os fluxos utilizados foram os definidos conforme citados na seção anterior (TVD, voz e vídeo). A Figura 5.9 mostra a definição geral dos fluxos no simulador.

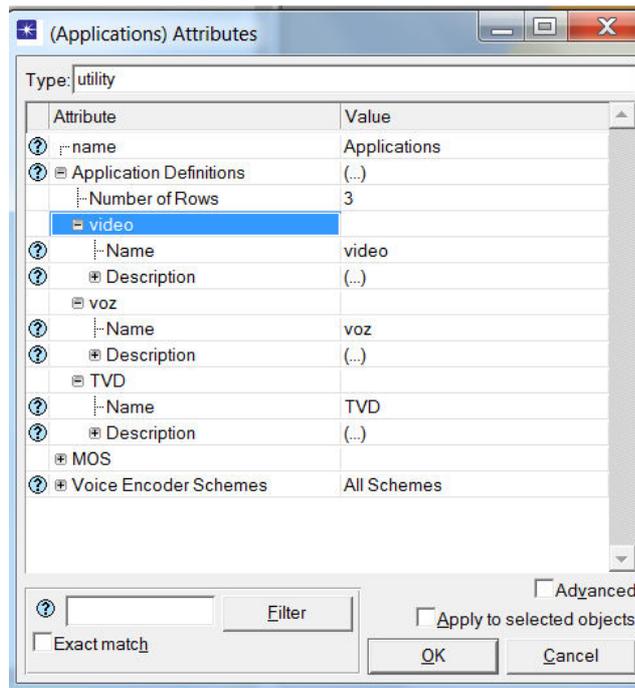


Figura 5.9 - Definição dos fluxos no OPNET

De forma mais detalhada, cada fluxo foi caracterizado no simulador conforme as aferições extraídas dos cenários reais. As Figuras 5.10, 5.11 e 5.12 mostram as configurações destas aplicações no simulador.

Attribute	Value	Attribute	Value	Attribute	Value
HTTP Specification	HTTP 1.1	Frame Interarrival Time Information	(...)	Silence Length (seconds)	(...)
Page Interarrival Time (secon...	lognormal (0.2101, 0.562)	Frame Size Information (bytes)	(...)	Talk Spurt Length (seconds)	(...)
Page Properties	(...)	Symbolic Destination Name	Video Destination	Symbolic Destination Name	Voice Destination
Server Selection	(...)	Type of Service	Best Effort (0)	Encoder Scheme	(...)
RSVP Parameters	None	RSVP Parameters	None	Voice Frames per Packet	1
Type of Service	Best Effort (0)	Traffic Mix (%)	All Discrete	Type of Service	Best Effort (0)
				RSVP Parameters	None
				Traffic Mix (%)	All Discrete
				Signaling	None
				Compression Delay (seconds)	0.02
				Decompression Delay (seconds)	0.02
				Conversation Environment	(...)

Figura 5.10: Configuração de TVD

Figura 5.11: Configuração de Voz

Figura 5.12: Config. de Vídeo

As configurações dos dispositivos reais, que são utilizados como canais de retorno foram transferidas para o simulador, visando a tornar a simulação tão realística quanto possível. Desta forma, pode-se validar na simulação o que foi feito em ambientes realísticos. A Tabela 5.6 mostra as configurações do Radio WiMAX utilizada na simulação.

Tabela 5.6 - Configuração do Radio WiMAX

Parâmetros	Valor
Frequência do Canal	5 MHz
Modelo de Programação	HATA
Modelo de Antena	Ominidirecional
Ganho de Transmissão	1 dBm
Ganho de Recepção	1 dBm
Potência de Transmissão	0.125 dB
Comprimento do Frame	20 ms
Tamanho do Pacote	1024 <i>bytes</i>
Tempo de Simulação	15 minutos

Após a realização de toda configuração do simulador e da análise dos dados de entrada, as simulações foram executadas, utilizando um tempo de simulação de 15 minutos para cada cenário montado. O tempo de 15 minutos foi escolhido por ser um intervalo de tempo confiável, encontrado na maioria das literaturas revisadas.

Os testes foram feitos exaustivamente a partir da variação do número de usuários na rede e com a troca da semente da simulação, o que fez com que para uma mesma quantidade de usuários diferentes valores fossem obtidos. Para cada cenário montado, foram feitos mais de cem testes, para que se pudesse obter uma média confiável. A variação da quantidade de usuários foi feita para 4, 8, 16, 32, 40, 64, 128, 200, 256, 512 usuários. Acima de 512 usuários os valores não apresentaram bons comportamentos e a simulação passou a ser muito demorada.

Para cada cenário, todas as medidas definidas (citadas anteriormente) foram avaliadas. Um exemplo de medida analisada no simulador é mostrado na Figura 5.13, onde é apresentado o comportamento do atraso para um cenário contendo 40 usuários. Nota-se a plotagem gráfica (lado direito da Figura) dos valores obtidos.

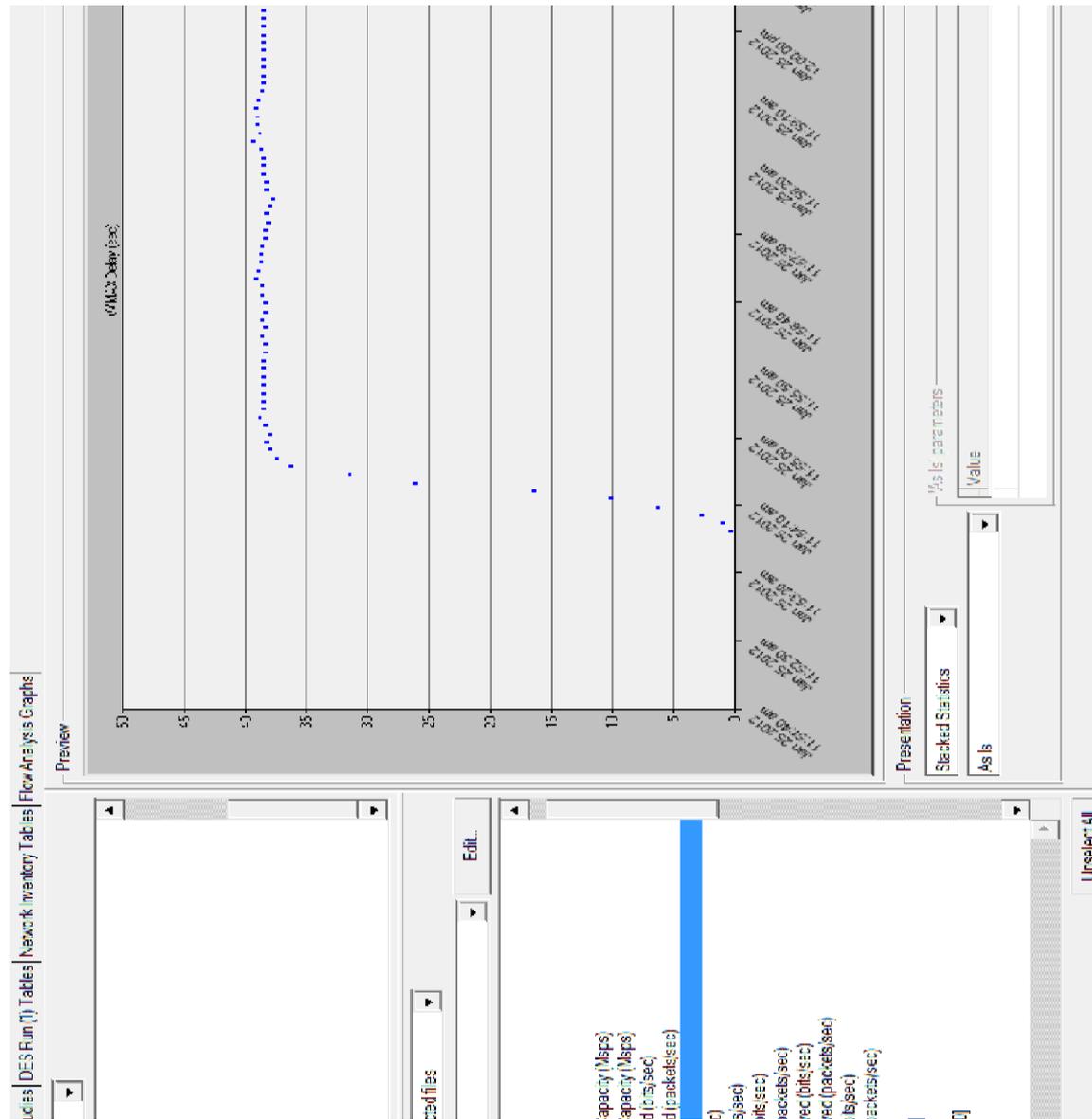


Figura 5.13 - Valores de atraso para 40 usuários

Cada cenário caracteriza qualidade de serviço, onde se tem as aplicações definidas e as condições da rede montada. Neste momento, para estas aplicações, as condições de acesso estão rodando sobre o WiMAX. Contudo, no momento seguinte, será generalizado para outros canais de retorno, sendo que toda tecnologia de acesso poderá ser avaliada pelos resultados obtidos nesta simulação.

Os dados obtidos nos experimentos simulados foram tratados, desta forma foram extraídas medidas que fornecessem de forma clara o grau de confiança dos resultados obtidos, dentre estas se destacam: as médias e os desvios padrões.

Conexoesativas	Vazao	Atraso	Jitter	Retransmissoes	Temporespos	Dadosdescartado
39.5000	4082066.6670	2.2636	1.9403	55	0.1557	121886.6667
87.6667	5027561.3330	3.5037	1.2401	163	1.6779	268254.9841
133.2500	5184897.3330	3.6898	0.1861	223	2.6036	406110.0606
160.2000	4935552	3.6875	0.0023	243.5000	3.3460	522341.9710
187.6667	4952434.6670	3.6927	0.0052	269.8000	4.0900	630007.1667
209.1429	5283583.8260	3.6936	0.0009	284.1667	4.7337	741771.5733
223.7500	5246729.5080	3.6960	0.0024	286.8571	5.2345	844212.4103
240.6667	5090306.6670	3.6996	0.0036	295.6250	5.7620	931760.9877
258.2000	5200038.6670	3.6997	0.0001	307.4444	6.0857	1018429.3810
273.8182	5670840	3.6933	0.0064	317.2000	6.2463	1114283.1260
288.0833	5237620	3.6972	0.0039	324.6364	6.4347	1190691.9560
296.9231	5051461.3330	3.6967	0.0005	326.3333	6.7398	1255114.2370
304.8571	5218525.3330	3.6883	0.0084	329.6154	6.8243	1320583.7920
314.3333	5714470.6670	3.6903	0.0021	335	7.0343	1397156.2020
326.6250	5046380	3.6994	0.0091	341.6000	7.1503	1450545.3730
341.6471	5810481.3330	3.6923	0.0072	353.8125	7.2574	1521680.6860
353.7778	5219865.1590	3.7003	0.0080	360.6471	7.3756	1572981.5190
365.5263	5206325.5080	3.6910	0.0093	368.3889	7.7429	1620858.7390
374.5500	5257042.6670	3.6825	0.0086	372.1579	7.9075	1668174.1400
383.2381	5232369.3330	3.6939	0.0115	375.9000	8.1495	1712246.5980
391.3636	5004130.6670	3.6893	0.0046	377.5714	8.3152	1748174.7670
399.5652	5208456	3.6941	0.0048	378.5909	8.4269	1786931.1540
407.0417	5553972	3.6993	0.0052	380.0870	8.7439	1832329.2700
412	5044388	3.6901	0.0093	380.4583	8.9869	1863773.3950
416.0385	5351022.4920	3.6919	0.0018	379.2000	9.1824	1900757.2730
420.8889	5482104.1740	3.7002	0.0083	379.0385	9.2635	1939393.6000
426	5091933.3330	3.6833	0.0169	379.5185	9.4526	1967614.2610
432.6552	5211858.6670	3.6927	0.0094	382.8929	9.6912	1996839.7160
438.2667	5301258.6670	3.6913	0.0014	384.6207	9.7666	2026988.4440

Figura 5.14 - Parte da Base de Dados tratada para Redes Bayesianas

Assim, uma base de dados foi gerada contendo todos os resultados aferidos nos experimentos da simulação, para diversas classes de usuários citadas, além disso, foram calculadas todas as médias e os desvios padrões, para cada critério avaliado. A Figura 5.14 mostra uma parte dos registros obtidos para cada critério. A Tabela 5.7 apresenta os respectivos valores estatísticos de média e desvio padrão para cada critério avaliado.

Tabela 5.7 – Média e desvio padrão para critérios analisados

	Conexões Ativas	Vazão	Atraso	Jitter	Retransmissões	Tempo de Resposta	Dados Descartados
Média	3076	17486266	19.9	0.26	2852	40.2	18619042
Desvio Padrão	1907	17540077	12.1	1.21	1585	22.45	12820898

Para o correto tratamento dos dados alcançados, é imperativa a realização do pré-processamento desses dados, antes de submetê-los aos demais sistemas de operação. Segundo Rezende (2003), a extração direta de padrões a partir de grandes volumes de dados pode se

tornar uma tarefa inviável. Grandes volumes de dados podem gerar um espaço de busca de padrões combinatoriamente explosivo. Em adição, as limitações de tempo de processamento e de memória são fatores impeditivos para a submissão direta dos dados, sem o estabelecimento de qualquer filtro, aos algoritmos de mineração de dados.

A busca de conhecimento em grandes bases de dados pode ocasionar, ainda, o aumento das chances de se encontrarem padrões pouco significativos e até mesmo espúrios. Uma possível solução para esses problemas envolve a tentativa de selecionar uma amostra significativa da base de dados da aplicação, além de prover mecanismos de limpeza e transformação dos dados, com vistas a melhorar a qualidade dos mesmos, bem como adequá-los aos objetivos propostos para a aplicação de MD ou às limitações e requisitos das técnicas de MD utilizadas (Tan et al., 2005).

A realização do pré-processamento foi realizada na base de dados obtida. Diversas técnicas de pré-processamento de dados foram empregadas, sendo estas:

- Limpeza dos dados, com objetivo de tratar os valores ausentes e ruídos nos dados, além de corrigir problemas relativos à inconsistência;
- Integração e transformação dos dados, que é utilizada quando os dados que serão submetidos à ferramenta de mineração de dados são provenientes de múltiplas fontes, evitando redundância de dados, bem como a criação de novos atributos a partir de outros, normalização de valores, entre outras tarefas;
- Redução dos Dados, eliminando atributos que não são relevantes para a tarefa de mineração de dados, além de prover mecanismos de discretização dos dados.

A partir dessa base de dados gerada após o pré-processamento, a próxima etapa foi a aplicação de uma técnica que pudesse correlacionar os dados obtidos para extração de conhecimento. Neste aspecto, o modelo de inteligência computacional utilizado foi rede bayesiana.

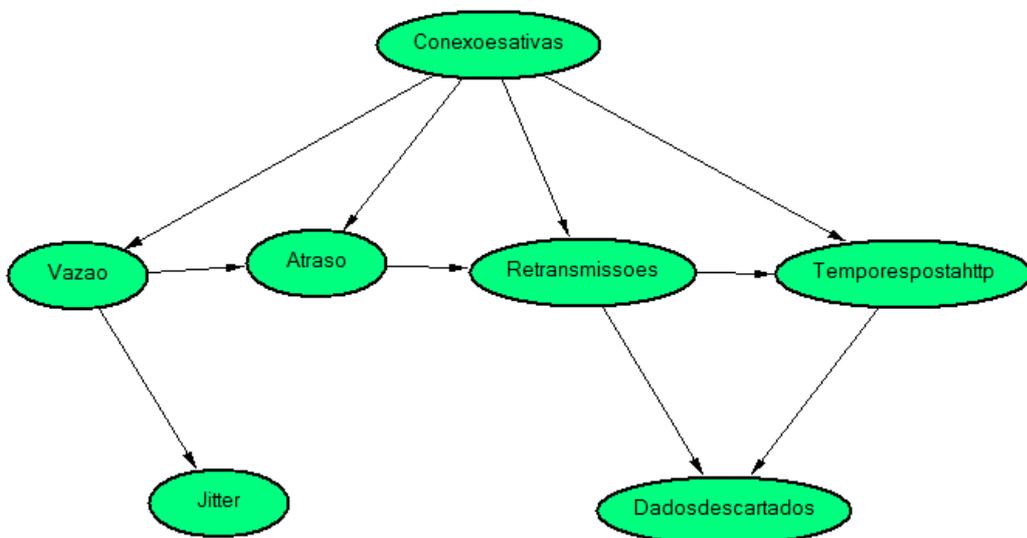
5.5 – GERAÇÃO DO VETOR PESO

A etapa 4 consiste na aplicação de uma técnica de correlação de dados para obtenção do vetor peso, que servirá de entrada para o uso dos métodos analíticos. O vetor peso representa a relação que uma variável possui sobre outra, expressa de forma quantitativa.

A técnica de correlação utilizada nesta etapa pode ser, por exemplo: redes bayesianas, sistemas *fuzzy* e redes neurais. Para a estratégia proposta, foi utilizada redes bayesianas (contudo, outros estudos podem ser feitos com outros modelos de inteligência computacional, inclusive para mesma base de dados, para efeito de comparação). Esta fase é a responsável pela transformação de dados em conhecimento. A escolha de RB neste processo de extração de conhecimento é motivada pelo fato de que a influência calculada das variáveis já está considerando as correlações/relações de dependência entre as variáveis (devido à estrutura da RB) e os cálculos utilizam os próprios parâmetros (probabilidades) advindos da rede.

Baseando-se nos conceitos pertinentes sobre redes bayesianas, revisados neste trabalho e consolidados na literatura, foi tratada a base de dados gerada pelo conjunto de testes realizados no OPNET. As métricas¹³ definidas pelo modelo foram utilizadas na tomada de decisão.

Foi gerada uma rede bayesiana utilizando o algoritmo de busca e pontuação K2, bastante difundido na literatura (COOPER; HERSKOVITS, 1992) e (CHEN, 2001). Para tal, foi utilizado o aplicativo *Bayesware Discoverer Student*¹⁴. A Figura 5.15 mostra a rede montada no aplicativo, contendo sete nós e suas respectivas dependências condicionais.



¹³ Neste caso, as métricas definidas para tomada de decisão podem também ser chamadas de critérios e em alguns casos, quando relacionadas à rede Bayesiana montada, são chamadas de variáveis.

¹⁴ Disponível em <http://bayesware-discoverer-student.software.informer.com/>

Figura 5.15 - Rede Bayesiana Gerada

O objetivo da montagem da rede bayesiana é observar o comportamento dos critérios definidos, além disso, analisar a influência que um critério tem sobre o outro. Desta forma, considerou-se que a influência de uma variável sobre a outra seria a entrada para os métodos de tomada de decisão multicritério.

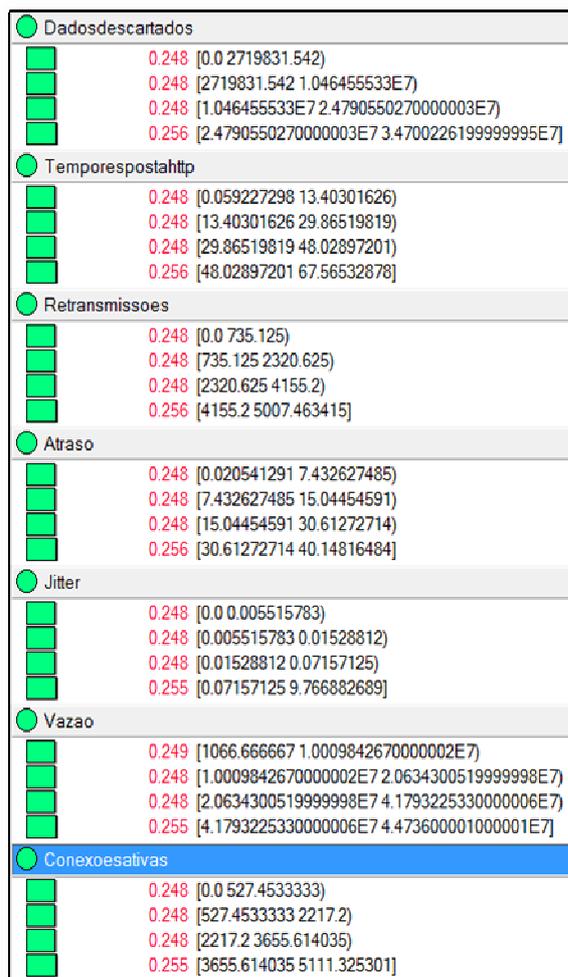


Figura 5.16 - Distribuição de Probabilidade

A Figura 5.16 mostra a distribuição de probabilidades discretizada por frequência em quatro faixas (extraída do aplicativo *Bayesware Discoverer*). A utilização dos métodos analíticos selecionados requer um vetor de entrada chamado de vetor de peso, que é utilizado para tomada de decisão. O vetor de peso realiza a ponderação do desempenho de cada critério, via de regra, definido pelo decisor (*expertise* do especialista da área). Buscou-se um recurso que pudesse definir um valor à atribuição dos pesos que, em última análise, é um conjunto de

variáveis de natureza numérica, que determina a influência que cada critério possui sobre os demais. Após pesquisas bibliográficas para determinação dos pesos, encontrou-se o conceito de entropia condicional.

Pode-se definir a entropia condicional como a medida da incerteza que obtem-se o valor de Y dado que é conhecido o valor de X. Se $(X,Y) \sim p(x,y)$, então a entropia condicional $H(Y|X)$ é a apresentada na Equação 3.26, (BARÃO, 2003).

$$H(Y|X) = \sum_{x \in X} p(x)H(Y|X = x) \quad (3.26)$$

Norteando-se na teoria proposta para redes bayesianas, citada na seção 3.2.1, verificou-se o impacto que as alterações entre os estados da variável X, causam nos estados na variável Y, ou seja, ao se inferir o estado $X_{i=1}$, por exemplo, determina-se o impacto que o primeiro estado de X está ocasionando nos estados da variável Y. Verifica-se então o impacto que cada estado X está influenciando sobre Y (quatro ao todo, conforme distribuição de frequências mostrada na Figura 5.16). Essa influencia de cada estado na variável X sobre Y são multiplicados entre si, conforme analogia da fórmula 3.26, e se chega a uma valor para variável X sobre Y. O processo é feito para todas sete alternativas.

Desta forma, com a rede Bayesiana montada e com a distribuição de probabilidades disponível, baseou-se no conceito de Entropia Condicional, para avaliar o impacto que uma variável tem sobre a outra.

Assim, pensando-se no estudo de caso a ser usado, a meta proposta é montar uma matriz de comparação entre critérios, composta por valores c_{ij} , onde i =indica a linha e j =a coluna da matriz 7×7 , contendo a comparação entre os sete critérios já definidos na estratégia de tomada de decisão. Cada valor c_{ij} indica o impacto que uma variável (ou critério) tem sobre outra. Neste caso $H(Y|X)$, ou seja, o impacto que X tem sobre Y. Quando a variável é comparada com ela mesmo, este valor é igual a um, já que esta influência é máxima.

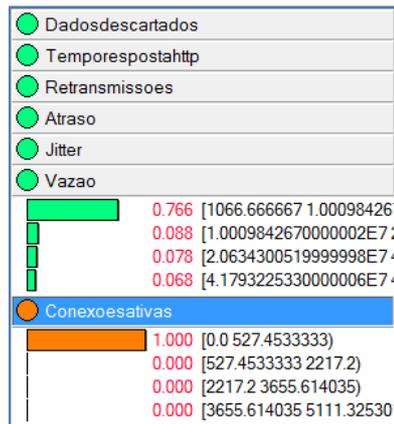


Figura 5.17 - Impacto do primeiro estado de conexões ativas sobre vazão

Um exemplo do processo citado anteriormente é o impacto que a variável conexões ativas está causando sobre vazão. Assim, é feita a inferência do primeiro estado de conexões ativas e verificado o impacto que esta inferencia gera sobre a vazão (Figura 5.17). São observados quatro valores em vazão 0,766; 0,088; 0,078 e 0,068, oriundos da inferencia de conexoes ativas. Estes valores representam o impacto que o primeiro estado de conexões ativas gerou sobre os estados em vazão. O mesmo processo é repetido para todos estados de conexões ativas.

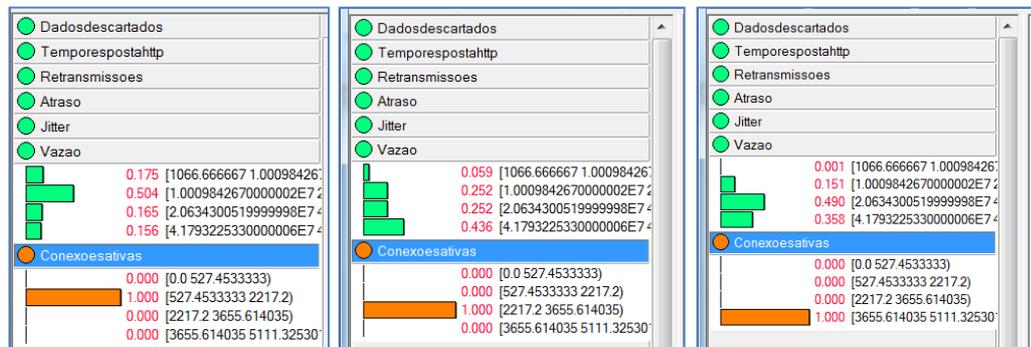


Figura 5.18 - Impacto do segundo, terceiro e quarto estado de conexões ativas sobre vazão

Nota-se que, para a segunda inferência em conexões ativas, os valores obtidos em vazão foram 0,175; 0,504; 0,165 e 0,156. No terceiro estado de conexões ativas tem-se: 0,059; 0,252; 0,252 e 0,436. E, finalmente, no quarto estado de conexões ativas, tem-se 0,001; 0,151; 0,490 e 0,358 na vazão.

O passo seguinte é realizar a multiplicação entre todos os valores obtidos nos estados da variável que está sendo observada, neste caso, vazão. Assim, o produto para o primeiro

estado de vazão ficaria: $0,766*0,175*0,059*0,001$. É realizado então o somatório dos valores obtidos do produto de cada estado da variável analisada (conforme equação 3.26), gerando o resultado de 0,00494 para vazão. Este valor irá alimentar o elemento c_{ij} da matriz critério, que relaciona o critério conexões ativas à vazão, ou seja, estabelece a inferência que a variável conexões ativas possui sobre vazão.

O mesmo processo é repetido para 672 interações¹⁵ que devem ser feitas sobre a rede bayesiana, então, é obtida a Matriz Comparação entre Critérios (Tabela 5.8).

Tabela 5.8 - Matriz de Comparação entre Critérios

	C	V	A	R	T	J	D
C	1	0.00494	0.00325	0.00096	0.00002	0.01157	0.00038
V	0.00416	1	0.00016	0.00116	0.00471	0.00518	0.00142
A	0.00219	0.00039	1	0.00000	0.00255	0.00725	0.00015
R	0.00022	0.00186	0.001	1	0.00000	0.00878	0.00000
T	0.00003	0.00476	0.00245	0.00020	1	0.01083	0.00014
J	0.01174	0.00579	0.01082	0.00903	0.01117	1	0.01061
D	0.00021	0.00221	0.00037	0.00000	0.00003	0.00913	1

Após a obtenção da matriz de comparação entre critérios, desenvolveu-se um aplicativo para definição dos pesos de cada critério. Este aplicativo realiza a divisão dos elementos de cada coluna pela soma daquela coluna (normalização) e posteriormente soma os elementos em cada linha resultante, dividindo esta soma pelo número de elementos na linha, conforme estabelece Saaty (1991). Após os cálculos necessários, o vetor obtido foi:

$$V_p = [0.1432 \quad 0.1424 \quad 0.1420 \quad 0.1429 \quad 0.1428 \quad 0.1440 \quad 0.1427]$$

Ressalta-se que o vetor acima obtido, chamado de vetor de pesos, é uma analogia feita ao vetor necessário para inserção no método analítico, sendo obtido se valendo dos dados (probabilidades) já existentes na rede. Assim, este vetor expressa a porcentagem de influencia que cada critério possui sobre os outros, conforme Tabela 5.9.

Comparou-se o vetor gerado com os valores da literatura e as porcentagens dos critérios obtidas apresentaram-se dentro dos níveis encontrados na revisão literária.

¹⁵ Já que são 42 possíveis combinações entre alternativas, cada uma contendo 16 grupos de produtórios.

Tabela 5.9 - Atribuição de pesos para cada critério

C	14,32 %
V	14,24 %
A	14,20%
R	14,29%
T	14,28%
J	14,40%
D	14,27%

Conforme mencionado anteriormente, o vetor de pesos, alcançado a partir da rede bayesiana, expressa a influência que cada critério possui sobre outro. Desta forma, é assumida nesta estratégia que a influência de cada variável sobre a outra é o vetor peso necessário para aplicação dos métodos analíticos utilizados. Existem diversas literaturas que apontam a obtenção deste vetor peso baseada em *expertise* de especialistas na área. Outras correntes criticam este pensamento por considerar que diferentes opiniões de especialistas de determinada área podem gerar resultados discrepantes para mesma base. Assim, a proposta desta estratégia é prover um mecanismo eficiente e confiável que utilize informações aferidas no próprio sistema para tomada de decisão e não informações passíveis de dupla interpretação.

A escolha de RB neste processo de extração de conhecimento é motivada pelo fato de que a influencia calculada das variáveis já está considerando as correlações/relações de dependência entre as variáveis (devido à estrutura da RB) e os cálculos utilizam os próprios parâmetros (probabilidades) advindos da rede.

Após a utilização da técnica de inteligência computacional para correlação de dados, é definido então o vetor de pesos. Na etapa 4, o auxílio de um especialista do domínio é fundamental, pois é possível comparar os dados obtidos com o que se espera na literatura. Contudo, como o modelo utilizou uma técnica de extração de conhecimento implícito, os dados não foram unicamente baseados na opinião de especialistas da área e sim adquiridos pelo próprio sistema. Para dar mais consistência à estratégia, os resultados obtidos nesta etapa foram comparados à literatura da área e se apresentaram dentro do esperado.

Extrapolando-se o modelo montado e partindo do pressuposto que um provedor de serviço possui mais de uma opção de tecnologia de acesso para determinado cenário, a proposta é definir qual tecnologia deverá ser escolhida, utilizando como entrada o vetor

supracitado e tendo como saída um *ranking* de alternativas. Neste aspecto, os métodos analíticos de tomada de decisão podem auxiliar o processo de escolha de tecnologia.

5.6 – MÉTODOS ANALÍTICOS DE TOMADA DE DECISÃO

A etapa 5 consiste na aplicação de métodos analíticos e pode ser realizada com os mais diversos tipos de métodos encontrados na literatura, tais como: AHP, ELECTRE, MACHBETH, TOPSIS, SAW, etc. Os métodos analíticos escolhidos para tomada de decisão foram TOPSIS e ELECTRE III. A ideia é utilizar cada um destes métodos e estabelecer um comparativo entre ambos.

A seleção destes métodos foi motivada pelas suas respectivas difusões em diversas áreas de pesquisa, conforme relatado nos trabalhos correlatos, além disso, a fácil implementação e os bons resultados que foram obtidos nos testes de performance. Após a aplicação dos métodos analíticos, pode-se ter um *ranking* de preferência de escolha de tecnologia a ser implantada. A aplicação destes métodos será mostrada no próximo capítulo.

Por fim, após as 5 etapas concluídas, é possível a escolha da solução ótima (melhor canal de retorno) com base na análise feita dos resultados obtidos.

5.7 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

A estratégia proposta foi apresentada neste capítulo, contudo, a montagem da mesma apresenta algumas dificuldades encontradas, dentre estas se destaca que a aferição das medidas de rede deve ser feitas de forma periódica, para que o modelo possa ser aplicado de forma dinâmica, já que os valores obtidos em cenários reais apresentam variações no decorrer do tempo. Aliado a isto, outro esforço para aplicação deste método está relacionado com o fato de que para outros tipos de serviços que deverão ser disponibilizados (diferente do serviço analisado), novos vetores de pesos deverão ser construídos.

Após os valores obtidos dos cenários montados para extração das características de carga de TV Digital; a definição dos fluxos de *background* que irão ser utilizados nos testes de carga; a definição dos critérios que seriam utilizados para tomada de decisão; e a definição das entradas do sistema a partir da montagem da rede bayesiana, verificou-se a necessidade de realizar um estudo de caso considerando cenários reais em que tivesse mais de um canal de retorno a ser escolhido. Desta forma, o capítulo 5 detalhou a estratégia utilizada para

montagem do modelo de tomada de decisão, e o próximo capítulo trata de validar este modelo, através de uma análise prática.

6. ESTUDO DE CASOS E RESULTADOS NUMÉRICOS

6.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A partir da definição da estratégia no capítulo anterior, aplicou-se esta metodologia em um cenário. Para tal, se usou tecnologias que representassem os mais diversos tipos de canais de retorno encontrados no mercado, cabeadas e sem fio. A arquitetura geral de testes é a mesma já mostrada na Figura 5.3.

6.2 – AFERIÇÕES DE CANAIS DE RETORNO PARA TOMADA DE DECISÃO

Visando legitimar o estudo de caso, não foram utilizadas referências da literatura e sim, montados cenários reais, para que a avaliação dos experimentos fosse fidedigna com o aferido em campo. Assim, quatro tecnologias foram escolhidas para serem avaliadas: PLC, WiMAX, ADSL e 3G¹⁶.

A escolha destas diferentes tecnologias é baseada na disponibilidade de recursos de ensaio e ao fato do foco destes testes serem em redes heterogêneas. É importante notar que as métricas analisadas fornecem valores diferentes devido a peculiaridades de cada tecnologia, tais como, as redes WiMAX, que sofrem interferência causada por fatores externos, como a distância entre as antenas, frequências semelhantes e número de usuários ativos, assim como redes 3G. Redes PLC utilizam eletricidade para transferir dados, sofrendo interferências causadas por dispositivos que operam em bandas de frequência semelhantes aos utilizados para a transmissão de dados. A tecnologia ADSL usa telefonia fixa para a transmissão de dados e é caracterizado por ruídos impulsivos e do fundo.

¹⁶ De forma mais específica, a tecnologia usada foi a 3G HSPA (*High Speed Packet Access*), pois é a atualmente distribuída no Brasil, o que possibilitou testes com diferentes provedores de serviço 3G.

6.2.1 – CENÁRIOS PARA ANÁLISE DAS REDES

Para análise experimental das tecnologias abordadas, se utilizou um cenário típico de transmissão de TV Digital interativa montado no LPRAD da UFPA. A Figura 5.3, citada no capítulo anterior, ilustra o cenário geral proposto, onde se tem um *set-top box*, responsável pela recepção do sinal digital e interação com o canal de retorno, recebendo a programação televisiva via equipamento de propagação de sinal digital – do fabricante EiTV – modelo *playout*.

Para testar cada tecnologia utilizada como canal de retorno, se fez necessárias adaptações no cenário montado. Para o caso do PLC, se utilizou um enlace de aproximadamente um quilômetro, de forma *outdoor*. Assim, um computador cliente, situado em um ponto da rede PLC (001 – Figura 6.1), enviava solicitações a um servidor, situado em outra ponta desta rede (025 – Figura 6.1).



Figura 6.1 – Cenário geral dos testes com PLC

A Figura 6.1 mostra todo caminho do sistema PLC que interliga o LPRAD ao CTIC (Centro de Tecnologia da Informação e Comunicação) da UFPA. Esta malha PLC fornece suporte para os testes realizados com esta tecnologia. A ligação do trajeto percorrido pela rede PLC e feita através de postes.



Figura 6.2 - Poste com acoplador que interliga o PLC

A Figura 6.2 apresenta um dos postes que recebe os acopladores para difusão da informação na rede energia. Ao todo, neste cenário foram utilizados quatro postes, quatro acopladores e quatro *gateways* PLC. As faixas de frequência utilizadas para *Upstream* e *Downstream*, foram respectivamente: 2,460 MHz a 4,960MHz e 7,925 MHz a 11,725 MHz. As taxas de transmissão nominais desta tecnologia variam de 17 Mbps a 40 Mbps.

Para montagem do cenário com WiMAX foi construído um *testbed* que liga dois pontos geográficos também na UFPA, separados por uma distância de 500 metros. A Base Stations (BS) WiMAX está localizada no topo de um edifício de 4 pavimentos e a *Subscriber Station* (SS) WiMAX está no topo de um edifício no 3º andar. Entre estes dois pontos há diversas árvores que caracterizam uma condição sem visada direta, peculiar da região, que apresenta um alto índice de árvores espalhadas. A Figura 6.3 mostra o mapa contendo a estrutura feita na UFPA para teste.

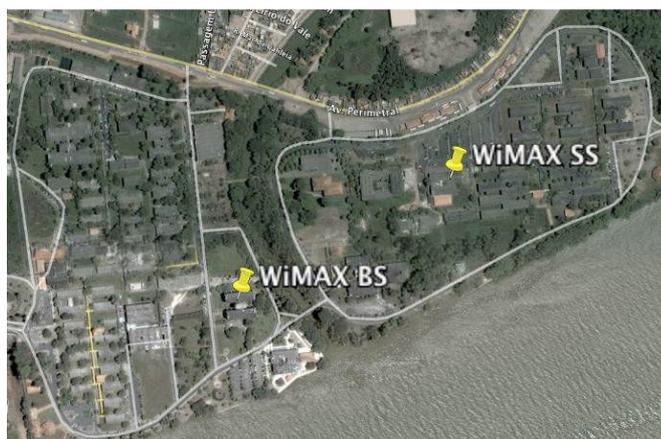


Figura 6.3 – Cenário geral das antenas na Universidade Federal do Pará

A Figura 6.4 mostra a visão, a partir do terraço do edifício de três andares, onde está localizada a SS. Nota-se na sua localização a dificuldade de visada em relação à BS.

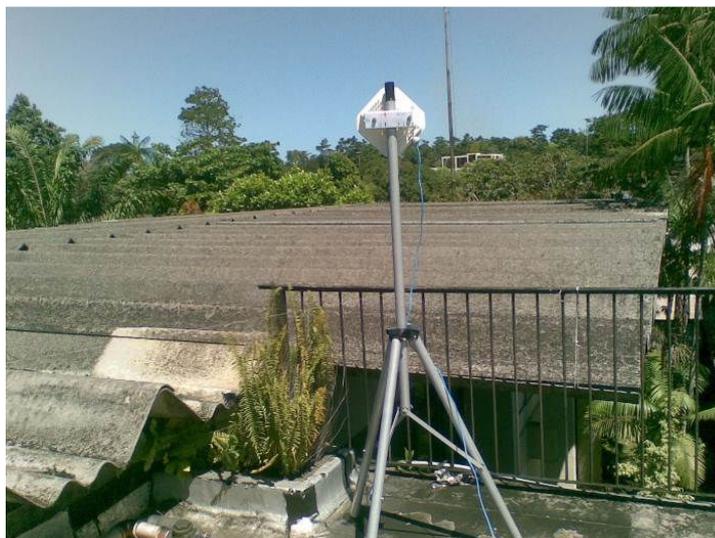


Figura 6.4 - Visão da SS e BS

Dadas as características climáticas da região amazônica, o padrão escolhido para teste foi o IEEE 802.16-2004. Os equipamentos utilizados nesses experimentos utilizaram frequências de 5,8 GHz (*licença-exempt band*), modulação OFDM, método de acesso *Time Division Duplex*, potência de transmissão de entre 10 dBm e 21 dBm com sistema de controle automático de transmissão de potência e canais de 20 MHz, com sistema automático de seleção de canal. Assim como nos testes com PLC, se colocou um cliente enviando solicitações do lado SS e um servidor respondendo estas solicitações do lado BS.

Para montagem do cenário com a tecnologia ADSL, se utilizou a infraestrutura do LaBIT (Laboratório de Inovação Tecnológica em Telecomunicações) da UFPA. O cenário de testes para análise de canal de retorno ADSL foi composto de *modems*, DSLAM, cabos de telecomunicações, gerador de ruído e computadores.

Para dar mais veracidade nos testes, houve geração de ruído impulsivo, feita pelo DSL 5500, um gerador de ruído da *Spirent Communications*, sendo que o ruído é gerado na faixa de operação do ADSL2+ (4,3125 kHz a 2,208 MHz). Um analisador de protocolo da marca

RADCOM¹⁷ também foi utilizado com a função de filtrar os pacotes que irão trafegar na rede, isolando fluxos específicos para geração das medidas de desempenho.

O conjunto DSLAM / EDA(Ethernet DSL *Access*) compõe o equipamento existente no lado da central telefônica, permitindo assim a comunicação de dados via um enlace DSL. O computador conectado ao DSLAM possui a função de gerar fluxo de TV digital (solicitações) que serão distribuídos através do canal e tratados pelo servidor.

Como meio de acesso para o canal de retorno, escolheu-se utilizar cabos metálicos reais (Figuras 6.5 e 6.6), os quais estão dispostos ao redor do prédio do Laboratório de Engenharia Elétrica e Computação (LEA) da UFPA. A utilização de tais cabos permitiu uma maior veracidade dos resultados obtidos, uma vez que os mesmos sofreram influências externas específicas da região, tais como calor, alta umidade e chuva; além de condições reais em que os cabos foram submetidos, tais como conectores ao longo do cabo, curvaturas, influências externas de ruído, etc.



Figuras 6.5 e 6.6 - Cabos reais que rodeiam o prédio de Engenharia Elétrica

Para determinação do comprimento dos cabos, utilizou-se a norma brasileira padrão Telebrás 225-540-788 de abril de 1997, a qual propõe a distância de 2.800 para um enlace de testes. Entretanto, neste experimento foram utilizados 2.750 metros, já que os cabos estão disponíveis apenas em tamanhos de 500 e 250 metros.

O ruído impulsivo utilizado nos testes é denominado *Repetitive Electrical Impulse Noise* (REIN – Ruído Impulsivo Elétrico Repetitivo). Tal ruído possui uma característica não-

¹⁷ Disponível em <http://www.radcom.com>

estacionária e é originário de espúrios oriundos de estações de rádio, ignição de motores e descargas atmosféricas. O ruído implementado no gerador DSL 5500 e utilizado nestes experimentos possui uma potência de -85 dBm e -95 dBm, com uma duração de 100 microssegundos e está de acordo com (043T09, 2004).

Testes similares aos citados foram aplicados para tecnologia 3G, contudo, para esta tecnologia foi utilizada a infraestrutura de três provedores de serviço consolidados no mercado. Os testes para a 3G foi feito apenas com a tecnologia HSPA, uma vez que as tecnologias mais recentes, 3G LTE (*Long Term Evolution*), ainda estão sendo regulamentada no Brasil.

A Figura 6.7 mostra um *briefing* do cenário montado para testes com 3G. Os celulares utilizados possuem plataforma Android 2.3 para rodar os aplicativos de teste. Foi realizada ainda uma pesquisa sobre a localização das antenas que seriam percorridas entre os celulares comunicantes e constatou-se que foram percorridas 3 torres de comunicação para troca de informações, cada uma com distância de aproximadamente 1 quilometro entre si. As frequências, modulações e técnicas da tecnologia já foram descritas na seção 2.4.4.

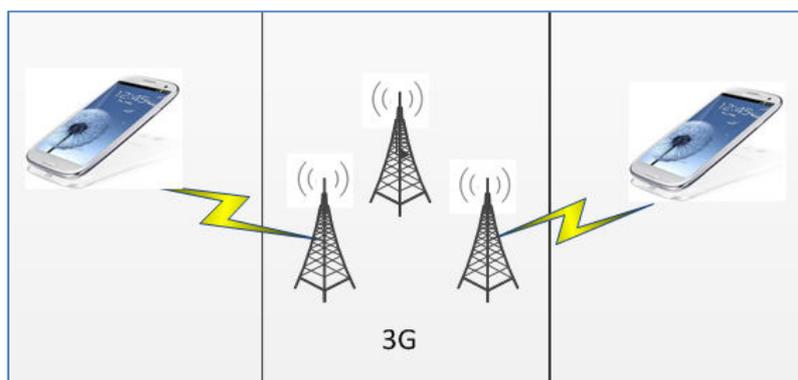


Figura 6.7 - Cenário para testes com 3G

Uma aplicação Java foi desenvolvida para obter os resultados dos critérios estabelecidos. Com base na teoria das amostras, os testes forma realizados repetidas vezes, para que se pudesse obter uma média aceitável de comparação. Os resultados médios são apresentados na seção posterior.

6.2.2 – RESULTADOS ALCANÇADOS

Os testes com todas as tecnologias foram feitos de forma individual, contudo, os resultados foram aglutinados para que se pudesse ter uma melhor visualização dos mesmos. Serão apresentados alguns resultados individualizados, outros comparados aos pares, apenas para ilustrar algumas das métricas aferidas. De forma ampla, cada tecnologia foi testada em grupos de usuários, sua variação foi a mesma aplicada na estratégia montada, sendo esta: 4, 8, 16, 32, 40, 64, 128, 200, 256, 512 usuários. Cada cenário montado foi testado cem vezes, para que se pudesse ter uma média confiável.

Os testes com redes cabeadas foram realizados com PLC e ADSL2+. A Figura 6.8 apresenta alguns dos resultados das métricas aferidas para estas tecnologias. Pode ser visto que a tecnologia ADSL2+ apresentou resultados mais satisfatórios, já que os valores de atraso são menores. Este comportamento já era esperado, a questão é a quantificação dos resultados desta tecnologia e se todos os critérios apresentariam superioridade nesta tecnologia em relação à sua concorrente, já que, caso algum critério fosse inferior e o peso atribuído a este critério fosse elevado, esta tecnologia (considerada melhor) poderia ser mais mal avaliada.

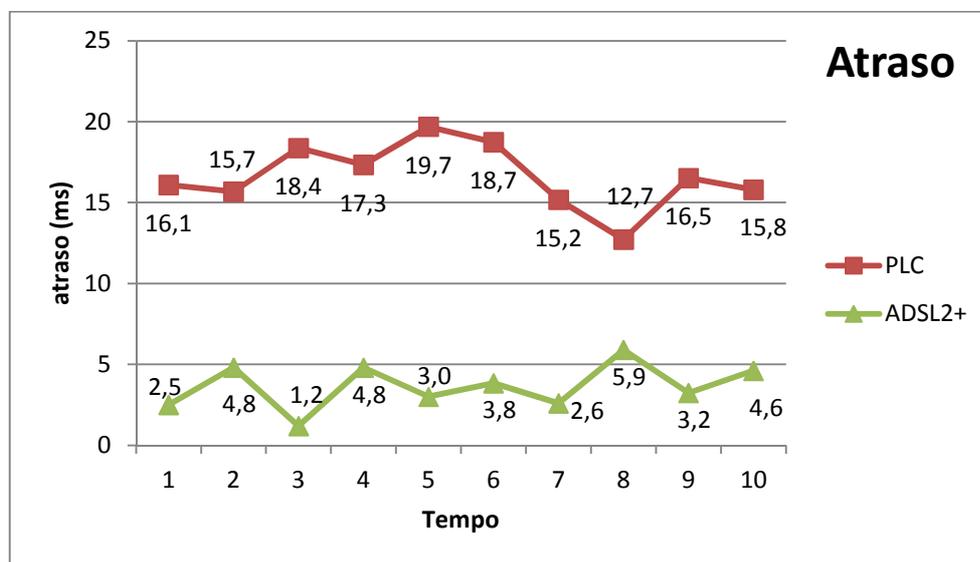


Figura 6.8 - Valores de atraso para redes cabeadas

A Figura 6.9 apresenta os valores da vazão no decorrer do tempo para redes cabeadas. Novamente a tecnologia ADSL2+ apresenta um melhor comportamento para esta métrica avaliada.

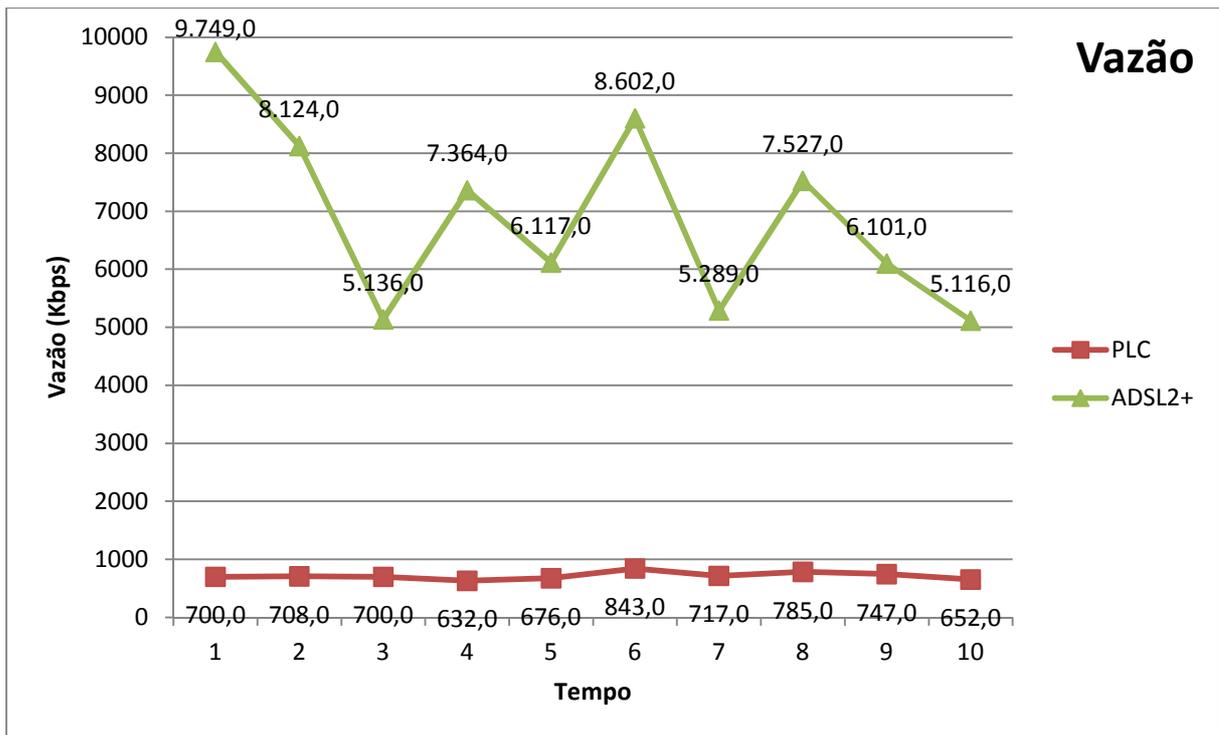


Figura 6.9 - Valores de Vazão

Com relação às redes sem fio, conforme mencionado anteriormente, os testes para tecnologia 3G, foi utilizada a infraestrutura de três provedores de serviço. A Tabela 6.1 mostra alguns dos resultados obtidos para cada provedor 3G. Os resultados que serão mostrados a seguir deixam claro que o fornecedor de serviços de 3G no Brasil ainda tem um longo caminho a percorrer, quando os valores obtidos são comparados com outros fornecedores no mundo. Os resultados foram muito instáveis durante os testes. Para obter um valor médio de confiança, os testes foram realizados mais de cem vezes em diferentes horários do dia.

Tabela 6.1 - Alguns resultados obtidos com diferentes provedores de serviço 3G

	Provedor 1	Provedor 2	Provedor 3
<i>Average Delay (ms)</i>	165	110	130
<i>Average Jitter (ms)</i>	35	11.3	50
<i>Average Throughput (Kbps)</i>	3210	3802	1400
<i>Packet Loss (%)</i>	0.5	0.5	0.5

Após a análise dos resultados obtidos, foi montada a Tabela 6.2, contendo todos os critérios avaliados para todas as tecnologias aferidas (cabeadas e sem fio).

Tabela 6.2 - Resultados Obtidos em Campo para as Diferentes Tecnologias

	PLC	WiMAX	ADSL	3G
Número de conexões ativas	1000	2227	3000	2500
Média do <i>Jitter</i> (ms)	4,8	4,7	6,1	32,1
Média do Atraso (ms)	16,6	21	13,5	135,00
Média da Vazão (Kbps)	716	1436,6	6912,5	1804
Tempo de Resposta do Objeto (s)	31,6	25,8	21,9	32,1
Quantidade de pacotes descartados	2500	1800	2100	3000
Numero de Retransmissões	3000	3700	2200	3200

Os valores mostrados na Tabela 6.2 mostram a média dos resultados obtidos para os mais diversos grupos de usuários testados. Estes números representam medições de cenários reais e foram utilizados no processo de decisão apresentado neste capítulo. Estes números são o reflexo de testes exaustivos sobre todas estas tecnologias, feitos em vários dias em diferentes horários, para que se pudesse chegar a resultados confiáveis. Também foram calculados os desvios padrões de cada critério analisado para cada tecnologia (Tabela 6.3).

Tabela 6.3 – Desvio Padrão das Diferentes Tecnologias analisadas

	PLC	WiMAX	ADSL	3G
Número de conexões ativas	1369	1500	1589	1209
Média do <i>Jitter</i> (ms)	1.17	2.9	1.3	5.2
Média do Atraso (ms)	1.53	3.11	1.14	33.0
Média da Vazão (Kbps)	145	300	1360	1500
Tempo de Resposta do Objeto (s)	18	22	36	102
Quantidade de pacotes descartados	6890	5236	3568	10369
Numero de Retransmissões	1569	1322	986	5689

A partir desses valores, uma estrutura de decisão usando os métodos analíticos escolhidos foi implementada para calcular a tomada de decisão com base nos pesos determinados no modelo, seção 5.6.

6.3 – APLICAÇÃO DE MÉTODOS ANALÍTICOS NO ESTUDO DE CASO

6.3.1 TOPSIS

Após a aferição das redes, a tomada de decisão sobre qual tecnologia seria escolhida foi empregada. Para isso, o método TOPSIS foi aplicado sobre os resultados obtidos na Tabela 6.1, tendo como base o vetor de pesos, que possui o valor de peso para cada critério avaliado.

Foi utilizado um aplicativo, que executa os procedimentos para aplicação do método TOPSIS, mostrando a proximidade relativa da solução ideal, fazendo um *ranking* das alternativas em ordem crescente.

A primeira matriz montada é a chamada matriz de decisão (Tabela 6.4), contendo todos os critérios e alternativas e seus respectivos valores aferidos. Também são definidos os critérios que devem ser maximizados e os que devem ser minimizados.

Tabela 6.4 - Matriz Decisão

	MAX	MIN	MIN	MAX	MIN	MIN	MIN
	C	J	A	V	T	D	R
PLC	1000	4.8	16.6	716	31.6	2500	3000
WiMAX	2227	4.7	21	1436.6	25.8	1800	3700
ADSL2+	3000	6.1	13.5	6912.5	21.9	2100	2200
3G	2500	32.1	135	1804	32.1	3000	3200
Peso	0.14320	0.14400	0.14200	0.14240	0.14280	0.14270	0.14290

Em seguida foi feita a normalização da matriz, obtendo-se os seguintes valores apresentados na Matriz 6.5.

Tabela 6.5 - Matriz critério normalizada

	C	J	A	V	T	D	R
PLC	0.21714	0.58577	0.57927	0.09779	0.04167	0.31623	0.40482
WiMAX	0.48356	0.58729	0.55775	0.19620	0.52504	0.75895	0.00000
ADSL2+	0.65141	0.55788	0.59444	0.94406	0.85006	0.56921	0.86747
3G	0.54284	0.00000	0.00000	0.24638	0.00000	0.00000	0.28916

Após a normalização, foi feita a ponderação dos critérios, através da multiplicação dos mesmos pelo peso atribuído a cada um (Tabela 6.6).

Tabela 6.6 - Matriz critério com pesos

	C	J	A	V	T	D	R
PLC	0.03109	0.08435	0.08226	0.01392	0.00595	0.04513	0.05785
WiMAX	0.06952	0.08466	0.07920	0.02794	0.07498	0.10830	0.00000
ADSL2+	0.09328	0.08033	0.08441	0.13443	0.12139	0.08123	0.12396
3G	0.07774	0.00000	0.00000	0.03508	0.00000	0.00000	0.04132

Foi realizada também a determinação do maior valor (situação ideal, positiva) para cada um dos itens avaliados (coluna). Neste caso, os valores ideais são os mostrados na Tabela 6.7.

Tabela 6.7 - Valores Ideias

C	J	A	V	T	D	R
0.09328	0.08466	0.08441	0.13443	0.12139	0.10830	0.12396

O mesmo procedimento é adotado para a escolha do menor valor (situação não ideal, negativa), conforme Tabela 6.8.

Tabela 6.8 - Valores Não ideais

C	J	A	V	T	D	R
0.03109	0.00	0.00	0.01392	0.00	0.00	0.00

Definidos os valores ideais e não ideais, o próximo passo é calcular o desvio em relação a cada valor atribuído e somá-los (Tabela 6.9), de acordo com as equações 3.6 e 3.7.

Tabela 6.9 - Desvio em relação ao atributo

S_i^+	S_i^-
0.20021	0.13892
0.17166	0.18012
0.02742	0.26205
0.24021	0.06581

Finalmente se obtém o resultado da aproximação das situações positivas e negativas, com o emprego da equação 3.8. A fase final é a ordenação decrescente dos valores obtidos, conforme mostrados na Tabela 6.10.

Tabela 6.10 - Ranking das tecnologias com TOPSIS em ordem de melhor escolha

Alternativa	C_i
ADSL2+	0.90528
WiMAX	0.51202
PLC	0.40965
3G	0.21505

Os resultados apresentados acima demonstram o percentual de indicação para utilização de determinado canal de retorno (alternativa). Assim, a tecnologia ADSL2+ apresentou maior indicação de uso, seguida por WiMAX, PLC e 3G.

6.3.2 ELECTRE III

Para comparar os resultados oriundos do método TOPSIS, foi desenvolvido um algoritmo para rodar o método analítico ELECTRE III. Os testes com ELECTRE III foram feitos com os mesmos valores utilizados no método anterior (Tabela 6.2). A Matriz decisão (Tabela 6.4) é a mesma utilizada no método anterior.

Para o emprego do método ELECTRE III, foi feita a construção das relações de subordinação, explicadas anteriormente (seção 3.1.4). Foram calculados os índices de concordância parcial, os índices de concordância global, o índice de discordância e o índice de credibilidade.

O segundo passo foi a ordenação das alternativas. A partir dos índices de credibilidade se construiu uma sucessão de relações de subordinação S (Tabela 6.11)

Tabela 6.11 - Matriz de Subordinação

	PLC	WiMAX	ADSL2+	3G
PLC	0.00000	0.28490	0.14400	0.71440
WiMAX	0.71510	0.00000	0.28670	0.57150
ADSL2+	0.85600	0.71330	0.00000	1.00000
3G	0.28560	0.42850	0.00000	0.00000

A última etapa foi a construção de uma preordenação de interseção. A interseção das duas preordenações conduz a uma classificação mais confiável, que evidencia as

incomparabilidades entre as alternativas, quando elas existem. Após a interseção de todas as alternativas, o *ranking* obtido foi o mostrado na Tabela 6.12.

Tabela 6.12 - *Ranking* das tecnologias com ELECTRE III

Alternativa
ADSL2+
WiMAX
PLC
3G

Novamente, como no método analítico anterior, a melhor opção seria ADSL 2+, seguido por WiMAX, PLC e 3G. Se por algum motivo (seja financeiro, político, disponibilidade, etc.) a primeira tecnologia indicada não pudesse ser escolhida, a tecnologia subsequente é a recomendada.

Nota-se que os diferentes métodos analíticos empregados apresentam o mesmo resultado, com pequenas variações de percentuais de indicação para as tecnologias. Assim, qualquer método poderia ser utilizado para tomada de decisão, ou ambos.

6.4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou um estudo de caso para aplicação da estratégia definida no capítulo 5, considerando estatísticas reais, de diferentes tipos de canais de retorno. Partindo do princípio que um provedor de serviço possui mais de uma opção de infraestrutura de telecomunicação para canal de retorno em um ambiente que possui TV Digital interativa, preocupou-se em realizar um estudo real para tomada de decisão, sendo que, a partir dos resultados obtidos, a tecnologia ADSL2+ seria a escolhida para ser implementada.

A escolha é baseada em uma heurística criada, norteadas por dois métodos analíticos difundidos na literatura: TOPSIS e ELECTRE III. Na estratégia proposta, os valores de entrada (pesos) foram obtidos a partir da análise feita por uma rede bayesiana. Desta forma, provedores podem planejar o provimento de seus serviços, considerando o padrão ISDB-T, e utilizando métricas de qualidade de serviço para tomada de decisão.

7. CONCLUSÃO

7.1 CONSIDERAÇÕES DA TESE

A convergência tecnológica da computação e das telecomunicações, culminando com o surgimento da grande área de tecnologia da informação e comunicação, encurtou distâncias e permitiu, entre outras inúmeras facetas, a reprodução e o repasse de conteúdo, com surpreendente rapidez e alcançando grandes distâncias. A natural evolução tecnológica e a mudança considerável do perfil de uso e de usuário estão exigindo dos provedores de serviço o aperfeiçoamento em sua forma de relacionamento no mercado, com seus clientes, natureza de serviços prestados e, cada vez mais em voga, estratégias de planejamento, monitoração e otimização de suas infraestruturas; tanto no que concerne à implantação de novos sistemas/serviços, quanto na manutenção deles.

Os artigos que apoiaram o desenvolvimento desta Tese mostram que diversos estudos estão sendo desenvolvidos nas áreas convergentes tratadas, tais como: TV Digital interativa, métodos de tomada de decisão, sistemas de suporte à decisão e tecnologias de acesso.

Após análise dos artigos correlatos, foram encontradas algumas lacunas que necessitam de especial atenção, entre as quais, destacam-se: (i) estudos que utilizem estratégias de análise multicritério, utilizando métodos analíticos e de inteligência computacional combinado; (ii) caracterização de fluxo de TV Digital interativa oriunda de aferições em cenários reais; (iii) utilização de métodos analíticos a partir de vetores de pesos analisados com redes bayesianas e não em expertise de especialistas da área, como propõe outros métodos como o AHP; (iv) utilização de diferentes tecnologias de acesso já consolidadas no mercado. Vale ressaltar que estudos isolados das linhas citadas anteriormente são encontrados, certas vezes, à mancha; entretanto, entendendo-se que há uma correlação estreita entre as abordagens, há que estudar-se uma estratégia conjunta, na qual se utilize o melhor de cada abordagem, para que se tenha uma capacidade maior e mais efetiva de planejar e otimizar sistemas tecnológicos, como os estudados nesta Tese.

Assim, esta Tese apresenta uma nova e inovadora estratégia de planejamento de provimento de serviço, considerando cenários reais, combinando métodos analíticos multicritério com inteligência artificial para tomada de decisão de cenários em que se utiliza a TV Digital interativa, padrão ISDB-T. Desta forma, provedores de serviço podem planejar/antever o comportamento dos serviços que serão oferecidos sobre a infraestrutura de telecomunicações existente, evitando, assim, possíveis gargalos e/ou ociosidades, nos mais variados cenários.

A estratégia proposta é genérica e flexível de tal forma que pode incorporar outros parâmetros e tecnologias não especificadas nesta Tese, proporcionando novos conjuntos de decisão para possibilidades de cenários diferenciados.

7.2 CONTRIBUIÇÕES E COMPROVAÇÃO DA HIPÓTESE

A hipótese desta Tese é a de que a estratégia multicritério proposta pode auxiliar na tomada de decisão de provedores de serviço, no que concerne à seleção ótima de canal de retorno em um determinado cenário, considerando o fluxo gerado pela TV Digital interativa, padrão ISDB-T.

Desta forma, são entendidas como principais contribuições desta tese as seguintes, as quais comprovam e certificam as premissas da hipótese:

- Concepção de uma estratégia de análise multicritério, utilizando, de maneira combinada, métodos analíticos e de inteligência computacionais;
- Realização de campanha de medidas (aferição) a partir de *testbeds* montados em cenários reais para validação dos preceitos fundamentais da proposta;
- Associação de estudos de aferição com modelagem, com objetivo de validação mútua;
- Desenvolvimento e implementação de algoritmos de heurísticas e meta-heurísticas para tomada de decisão, baseado em métodos analíticos e de inteligência computacional;
- Projeto e implementação de diversos tipos de aplicações de TV Digital interativa, visando à geração de carga para o sistema, tais como: *t-health*, *t-educ* e *t-commerce*;
- Utilização criteriosa de simulação discreta e de simuladores específicos, com vistas a extrapolar os dados obtidos nos experimentos reais;

- Caracterização de cargas de aplicativo de TV Digital interativa, oriunda de aferições em cenários reais;
- Utilização de métodos analíticos a partir de vetores de pesos analisados com redes bayesianas e não em expertise de especialistas da área, como propõe outros métodos mais tradicionais;
- Análise de diferentes tecnologias de acesso já consolidadas no mercado: PLC, WiMAX, ADSL2+ e 3G, mas com foco específico para o uso como canal de retorno em TV Digital interativa.
- Heurística para que provedores de acesso possam planejar/antever o comportamento dos serviços que serão oferecidos sobre a infraestrutura de telecomunicações existente, evitando assim, possíveis gargalos nos mais variados cenários.
- Combinação de diversos critérios de qualidade de serviço, de redes computacionais, para tomada de decisão;

7.3 DIFICULDADES ENCONTRADAS

Cabe ressaltar que, ao longo do desenvolvimento da Tese, foram encontradas dificuldades para a consecução do trabalho, as quais serão apresentadas aqui com o objetivo de orientar pesquisadores e estudantes que venham a utilizar os conhecimentos disponíveis neste trabalho.

As dificuldades encontradas foram decorrentes de diversos fatores, entre os quais se destacam:

- Pelo fato de a Tese envolver diferentes domínios, foi realizado um levantamento bibliográfico muito complexo, em diversas áreas de conhecimento, para que se pudesse embasar de forma satisfatória a proposta. Portanto, como se trata de um estudo multi e interdisciplinar, há uma complexidade inerente que não pode ser desprezada.
- As montagens dos *testbeds* das tecnologias de acesso demandaram muito tempo, principalmente por ter envolvido tecnologias de acesso heterogêneas, o que gerou certo atraso para obtenção dos dados necessários à pesquisa.

- Durante as simulações, os cenários montados também consumiram bastante tempo de execução, já que os testes foram feitos de forma exaustiva com variações de quantidade de usuários para cada cenário;

- Compreensão do formalismo matemático próprio dos métodos que fundamentam as diversas técnicas empregadas;

- Estudo, implementação e teste com diferentes métodos analíticos até que se chegasse ao resultado final;

- Aquisição de equipamentos padrão ISDB-T para testes reais com a aplicação de TV Digital interativa.

De forma geral, os obstáculos encontrados não estão limitados ao estudo das técnicas matemáticas, mas também, na implementação dos *testbeds* e dos modelos computacionais.

Ao optar-se por trabalhar com uma abordagem multidisciplinar para solução de um problema intrinsecamente de seleção de tecnologias de acesso, de modo a definir propostas e objetivos em potencial a serem trabalhados, enfrentam-se de imediato os seguintes aspectos: o estudo exaustivo da literatura e trabalhos dos grupos de pesquisa existentes; a conseguinte análise das tendências futuras da área e do mercado, identificando as necessidades existentes; e a necessidade de se propor e introduzir contribuições que sejam significativas em uma área tão abrangente.

7.4 DESDOBRAMENTO E TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros podem-se destacar:

- Realização de novos estudos e testes de desempenho envolvendo outras tecnologias de acesso, uma vez que a metodologia é abrangente (tais como fibra ótica e 4G);

- Realização de novos estudos e testes de desempenho com outras técnicas de correlação de dados, (e.g. lógica *fuzzy* e redes neurais artificiais) e técnicas de otimização (e.g. processo markoviano de decisão, aprendizado por reforço, *particle swarm optimization*, algoritmos genéticos).

- Realização de testes com outros modelos de inteligência computacional e/ou utilização de técnicas de regressão linear, para extração do vetor peso, e comparação com os resultados obtidos com redes bayesianas;
- Definição de diferentes critérios para análise de rede, tal como o critério custo, que quantifique uma tecnologia, ou seja, diga se a mesma é cara ou barata para ser implantada;
- Definição de novos fluxos de aplicações, para que se estudem outros comportamentos típicos da Internet;
- Utilização do modelo proposto em um cenário real de um provedor de serviço, inclusive possivelmente embarcando-se a heurística definida em centrais de operadoras;
- Aplicação de outros métodos analíticos, para que se possa ter um leque maior de comparação de resultados;
- Ampliação dos cenários das simulações e testes com outros simuladores, para efeitos de comparação de resultados;
- Implementar um sistema de suporte à decisão, que possa automatizar toda a estratégia definida ao longo desta Tese;

7.5 DIVULGAÇÃO DOS RESULTADOS E APLICAÇÃO DOS CONHECIMENTOS GERADOS NESTA TESE

Artigos completos publicados em periódicos

- SERUFFO, M. C. R., SANTANA, A. L., FRANCÊS, Carlos, VIJAYKUMAR, N. L. *A Heuristic Algorithm based on multicriteria analysis for selection of first mile access in standard ISDB-T. IET Communications (Print). Fator de Impacto (2011 JCR): 0,8290, 2012. Engenharias IV (Qualis A1).*

Trabalhos publicados em anais de eventos (completo)

- SERUFFO, M. C. R., SILVA, C. N., Francês, Carlos, MONTEIRO, F. *Application for T-Health on Brazilian Digital TV System In: IADIS International Conference e-Health 2012, 2012, Lisboa. IADIS International Conference e-Health 2012. 2012.*

- SERUFFO, M. C. R., Francês, Carlos, SANTANA, A. L. *Multicriteria Strategies for Planning the Capacity of Interactive Services for the ISDB-T standard Return Channel In: Brazilian Congress on Fuzzy Systems (II CBSF), 2012, Natal. Second Brazilian Congress on Fuzzy Systems. 2012.*
- SERUFFO, M. C. R., Lisboa, Diego, Francês, Carlos *Traffic Performance Evaluation of Digital Interactive TV Application on WIMAX Simulation - Based Approach In: IADIS Internet Applications and Research 2012 (IAR 2012), 2012, Lisboa. IADIS Internet Applications and Research 2012 (IAR 2012). 2012.*
- KURIBAYASHI, H., SERUFFO, M. C. R., Francês, Carlos *Implementação de suporte a múltiplos canais de retorno na plataforma openginga: um estudo de caso na região amazônica In: Conferência IADIS Ibero Americana WWW/INTERNET 2011, 2011, Rio de Janeiro. Conferência IADIS Ibero Americana WWW/INTERNET 2011. 2011.*
- NASCIMENTO, C. V. C., Lisboa, Diego, JACOB JUNIOR, A. F. L., SERUFFO, M. C. R., OLIVEIRA, E. L., Costa, João, Francês, Carlos *Jogos Educativos para Crianças na Plataforma do Sistema Brasileiro de TV Digital In: 2o Simpósio Internacional de Televisão Digital, 2011, Bauru - SP. 2o Simpósio Internacional de Televisão Digital. 2011.*
- LOPES, N. M., Lisboa, Diego, JACOB JUNIOR, A. F. L., SERUFFO, M. C. R., Costa, João, Francês, Carlos *Prototipação de aplicações educacionais para TV Digital Interativa In: 2o Simpósio Internacional de Televisão Digital, 2011, Bauru - SP. 2o Simpósio Internacional de Televisão Digital. 2011.*
- SERUFFO, M. C. R., SILVA, C. N., Francês, Carlos *T-CRM: Um estudo de caso de aplicação comercial interativa para TV Digital In: Conferência IADIS Ibero Americana WWW/INTERNET 2011, 2011, Rio de Janeiro. Conferência IADIS Ibero Americana WWW/INTERNET 2011. 2011.*
- MONTEIRO, F. P., SILVA, C. N., JACOB JUNIOR, A. F. L., SERUFFO, M. C. R., Lisboa, Diego, Francês, Carlos *TVD-EDUC 2.0: um estudo de caso de aplicação educacional interativa para TV Digital In: 2o Simpósio Internacional de Televisão Digital, 2011, Bauru - SP. 2o Simpósio Internacional de Televisão Digital. 2011.*

- SERUFFO, M. C. R., SILVA, C. N., MACHADO, V. A., Francês, Carlos TVD-EDUC: Um Estudo de Caso de Aplicação Educacional Interativa para TV Digital *In: Conferência IADIS Ibero Americana WWW/Internet*, 2010, Carvoeiro - Algarve. TVD-EDUC: Um Estudo de Caso de Aplicação Educacional Interativa para TV Digital. , 2010.

- SERUFFO, M. C. R., Silva, Marcelino, Francês, Carlos, Lisboa, Diego, Costa, João, MACHADO, V. A. WiMAX como Canal de Interatividade para SBTVD na Amazônia *In: 1o Simpósio Internacional de Televisão Digital*, 2009, Bauru-SP. 1o Simpósio Internacional de Televisão Digital. 2009.

Trabalhos publicados em anais de eventos (resumo)

- SILVA, C. N., SERUFFO, M. C. R., Francês, Carlos. *A proposal for a metadata-based framework for interactive GINGA digital TV applications* *In: XVII WEBMEDIA*, 2011, Florianópolis. XVII WEBMEDIA. 2011.

- SOARES, F. F., SERUFFO, M. C. R., SILVA, C. N., Francês, Carlos Aplicativo Educacional de Conscientização Ambiental Para TV Digital *In: Conferência IADIS Ibero Americana WWW/INTERNET 2011*, 2011, Rio de Janeiro. Conferência IADIS Ibero Americana WWW/INTERNET 2011. 2011.

- GUSMAO, A. T. A., SERUFFO, M. C. R., JACOB JUNIOR, A. F. L., SILVA, C. N., Lisboa, Diego, Francês, Carlos Aplicativo para Avaliação de Diferentes Tecnologias de Canal de Retorno em TV Digital *In: 2o Simpósio Internacional de Televisão Digital*, 2011, Bauru - SP. 2o Simpósio Internacional de Televisão Digital. 2011.

Premiação Internacional

- BEST PAPER AWARD. IADIS *International Conference e-Health 2012. Paper: SERUFFO, M. C. R., SILVA, C. N., Francês, Carlos, MONTEIRO, F. Application for T-Health on Brazilian Digital TV System* *In: IADIS International Conference e-Health 2012*, 2012, Lisboa. IADIS *International Conference e-Health 2012*. 2012

Participação em Projetos

- Um *framework* para desenvolvimento e disponibilização de aplicações interativas para SBTVD: Um estudo de caso em Telesaúde utilizando a infraestrutura de telecomunicações do

Navegapará como canal de retorno. Financiador: Rede Nacional de Ensino e Pesquisa-RNP. 2010 – 2012.

- Pesquisa e desenvolvimento de aplicações interativas para TV Digital utilizando as plataformas GINGA-J e GINGA-NCL. 2010 – 2012. Financiador: UFPA.

- Estudos de Redes Industriais no processo de comunicação em indústrias de beneficiamento de minério. Financiador: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Pará-FAPESPA. 2012-2011.

- Planejamento de Redes ADSL2+ considerando Parâmetros Mínimos de Qualidade de Serviço para a Região Amazônica. Financiador: Companhia Vale do Rio Doce-CVRD/FAPESPA. 2009-2012.

- Linha de ação: Inclusão Digital Através do Uso de Redes PLC/DSL. Financiador: Processamento de Dados do Estado do Pará - PRODEPA. 2009-2011.

- Planejamento e Análise de Desempenho de Tecnologias de Acesso para Inclusão Digital utilizando a Infraestrutura de Telecomunicações do Programa NAVEGAPARÁ: estudo baseado na implementação de novas tecnologias de acesso para a aplicação de *t-learning*. Financiador: CNPq. 2010-1012.

- MOODLE-i: Projeto e implementação de aplicações para aprendizagem à distância via Televisão Digital interativa e fabricação de *set-top box* com suporte a tecnologias de última milha e transmissão de voz. Financiador: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Bolsa. 2011-2013.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSI (AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE) T1.413 for Telecommunications – **Network and Customer Installation Interfaces** – Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL) Metallic Interface, 1998.

ARENAS, D. et al.. Challenges to expanding Fixed Broadband Services. **Alcatel telecommunications review**, e. 3, p. 215-219, 2006.

ARNOLDO, M. V. H. Ferramentas de Acessibilidade para TV Digital Interativa com Java. TVDI – Grupo de Pesquisas em TV Digital Interativa – Universidade Católica de Pelotas. 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) 15606-1. **Televisão Digital Terrestre- Codificação de dados e especificações de transmissão para radiodifusão digital. Parte 4: Ginga-J - Ambiente para a execução de aplicações procedurais.** Rio de Janeiro, Brasil, p. 2-3. 2010. Disponível em <<http://www.forumsbtvd.org.br>>. Acesso em: 01 maio 2011.

BAILLIE L. et al.. Exploring Social TV. In: International Conference on Information Technology Interfaces, 29. **Anais...** Cavtat, v. 25, p. 215-220, 2007

BANA C. A; COSTA, C. A. Absolute and relative evaluation problematiqués: the concept of neutral level and the MCDA robot technique. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL MULTICRITERIA DECISION MAKING WORKSHOP. **Anais...** Lieblitz, Março, p. 7-15, 1991.

BARÃO, M. Entropia, Entropia Relativa e Informação Mútua. Disponível em <http://www.di.uevora.pt/~mjsb/TI-02/Artigos/cap2.pdf>. Acesso em 16 out. 2012.

BARBOSA, S. D. J.; SOARES, L. F. G.. TV digital interativa no Brasil se faz com Ginga: Fundamentos, Padrões, Autoria Declarativa e Usabilidade. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE COMPUTAÇÃO, 28., Belém. **Anais...** Belém: Sociedade Brasileira de Computação. 2008.

BARI, F., LEUNG, V. Application of ELECTRE to Network Selection in a Heterogeneous Wireless Network Environment. IEEE Wireless Communications & Networking Conference. 2007.

BATES, P. J. T-learning Study: A study into TV-based interactive learning to the home. PJB ASSOCIATES (Inglaterra), 2003.

BORDIGNON, A. **Um framework para prover Comunicação segura em aplicativos de TV Digital.** Monografia para título de Bacharel em Sistemas de Informação. Universidade Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo, 2006.

BOYER, C.B. **História da Matemática.** São Paulo: Editora Edgar Blücher, e. 2, 1996.

BRACKMANN C. P. TVMark: Benchmarking para TV Digital. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE FATORES HUMANOS EM SISTEMAS COMPUTACIONAIS, 8. **Anais...** Porto Alegre, 2008.

BRAGA, A. P.; CARVALHO, A. C. P. L. F.; LUDERMIR, T. B. Redes neurais artificiais: teoria e aplicações. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

BRANCO, K. R. L. J. C. **Índices de Carga e Desempenho em Ambientes Paralelos/Distribuídos – Modelagem e Métricas**. Tese de Doutorado – Instituto de matemática e ciências da computação – Universidade de São Paulo. 2004.

BRANCO, K. R. L. J. C; ORDONEZ, E. D. M. Load Indices – Past, presente and future. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HYBRID INFORMATION TECHNOLOGY (IHIT'06). **Anais...** v.2, 2006.

BRASIL. Decreto-lei n 4.901, 26 de novembro de 2003. **Institui o Sistema Brasileiro de Televisão Digital**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Decreto/2003/D4901.htm>. Acesso em: 28 mar. 2010.

BRASIL. Decreto-lei Nº 5.820, 29 de junho de 2006. **Implantação do SBTVD-T**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2004-2006/2006/Decreto/D5820.htm>. Acesso em: 28 mar. 2010.

BANKMAZ, B; BOJKOVIC, Z.; BAKMAZ, M. Network Selection Algorithm for heterogeneous wireless environment. XXVII Annual IEEE International Symposium on personal, indoor and mobile radio communications. 2007.

BUDRI, A.K.; et al.. WiMAX Simulation Models for Return Channel in Digital Television Systems. In: INTERNATIONAL TELECOMMUNICATIONS SYMPOSIUM. **Anais...** Fortaleza, v. 3, p. 688-693, 2006.

CAMPISTA, M. E. M. et al.. The Ad Hoc Return Channel: a Low-Cost Solution for Brazilian Interactive Digital TV". **IEEE Communications Magazine**, v. 45, e. 1, p. 136-143, 2007.

CARVALHO F. B. S, et al.. On the use of Power Line Communications to Transmit the Return Channel for Digital Television. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SPREAD SPECTRUM TECHNIQUES AND APPLICATIONS, 9. **Anais...** Manaus, e. 28, p. 381-385, 2006.

CASTRO, M., 2004. Propostas de Implementação de Qualidade de Serviço na Arquitetura VPN MPLS, Utilizando Linguagem de Especificação Formal SDL Orientada a Objetos e Análise de Desempenho Utilizando o Simulador OPNET. Dissertação submetida à Faculdade de Engenharia Elétrica e Ciências da Computação - Unicamp, 2004.

CDMA DEVELOPMENT GROUP (CDG). WiMAX: oportunidades e desafios em um mundo wireless. 2005. **Publicação eletrônica**. Disponível em: <http://www.cdg.org/resources/white_papers/files/WiMAX%20FINAL%20Port.pdf>. Acesso em: 30 out. 2009.

CHARILAS, D. E. et al.. Application of Fuzzy AHP and ELECTRE to Network Selection. Mobile Lightweight Wireless Systems – Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences Social Informatics and Telecommunications Engineering. V. 13, pp 63-73. 2009.

CHEN, Y. Fuzzy AHP-based Method for Project Risk Assessment. In: CONFERENCE ON FUZZY SYSTEMS AND KNOWLEDGE DISCOVERY (FSDK). **Anais...** Yantai, Shandong, p. 1249 – 1253. 2010.

CHEN Z., Data Mining and Uncertain Reasoning - an Integrated Approach, John Wiley Professional, 2001.

CHEN, C. T. HUNG, W. Z. Applying Fuzzy Linguistic Variable and ELECTRE Method in R&D project Evaluation and Selection. Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. pg 999-1003. 2008.

CHENG, J., BELL, D. A., LIU, W. Learning Belief Networks From Data: An Information Theory Based Approach, Proceedings of the sixth international conference on Information and knowledge management, p. 325-331, 1997.

COOPER, G., HERSKOVITZ, E. A Bayesian method for the induction of probabilistic networks from data. Machine Learning, p. 309–347, 1992.

COSTANZO, B.P.; NETO, J.A. Analysis of the Brazilian Digital TV System (BDTVS) and Signal-Converting Devices. In: Management of Engineering and Technology. **Anais...** Portland International Center for. p. 1830 – 1838, 2007.

DUTTA-ROY, A. Bring home the Internet. **Journal IEEE Spectrum**. e. 12, v. 39, p. 32-38, 2002.

FAUDON, V. et al.. End-User Services for Broadband uptake in High-Growth Economies, **Alcatel telecommunications review**, e. 3, p. 206-209, 2006.

FU, Z.; DELCROIX, V. Bayesian network based on the method of AHP for making decision. 6th IEEE Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC), 2011.

GARTNER, I. R. Avaliação Ambiental de projetos em bancos de desenvolvimento nacionais e multilaterais: evidências e propostas. Editora Universa, Brasília. 2001.

GOMEZ, A. T., JUNIOR, C. A., FORMOLO, D. Um modelo computacional baseado em metaheurística aplicado a transmissão Internet Protocol Television (IPTV). Revista de Radiodifusão - SET, v. 6, n. 6. 2012.

GONDIM P. R. L.; CORRÊA R. G. C. J. Digital Television and Banking Inclusion in Brazil: Alternatives to Access Technologies. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DIGITAL SOCIETY, 3. **Anais...** v.1, p. 52-59, 2009.

GUMASTE, A.; ANTONY, T. **First Mile Access Networks and Enabling Technologies**. Indianapolis: Cisco Press, 2004.

GUSTAFSSON, E.; JONSSON, A. Always Best Connected, IEEE Wireless Communications, vol. 10, n.1, Feb 2003, p. 49-55.

- HABIBA, U.; ASGHAR, S.; A Survey on Multi-Criteria Decision Making Approaches. International Conference on Emerging Technologies. 2009. p. 321-325.
- HAYKIN, S. Redes Neurais – Princípios e Prática. Bookman. 2001.
- HECKERMAN, D.; GEIGER, D. e CHICKERING, D. Learning Bayesian networks: the combination of knowledge and statistical data. Machine Learning, 20: 197–243, 1995.
- HECKERMAN, D. Bayesian networks for Data Mining. Data Mining and Knowledge Discovery, Kluwer Academic Publishers, p. 79-119, 1997.
- HIDEYUKI K. et al.. Access Control Method based on Sample Monitoring for Volatile Traffic in Interactive TV Services. In: GLOBAL TELECOMMUNICATIONS CONFERENCE. **Anais...** p. 1-6, 2008.
- HIDEYUKI K. et al.. Combined Adaptive Congestion Control Method for Communication-Broadcasting Integrated Services. In: GLOBAL TELECOMMUNICATIONS CONFERENCE. **Anais...** p. 1, 2006.
- HWANG, C. L., LAI, Y. J., LIU, T. Y. “A new approach for multiple objective decision making”, Computers and Operation Research, nº 20, p. 889-899. 1993.
- HWANG, C. L, YOON, K., 1981, Multiple attribute decision making; methods and applications, Lecture Series in Economics and Mathematical Systems, Berlin, Germany, Springer-Verlag,.
- JAIME, G. D. G. et al.. User Level Fairness of a Multirate 3G Technology (EVDO) With Application to Digital TV Return Channel Technology. Broadcasting, IEEE Transactions on, 2008.
- JANIC, M., REGGIANI, A. An application of the multiple criteria decision making (MCDM) analysis to the selection of a new hub airport. In: European Journal of Transport and Infrastructure Research, v. 2, nº 2, p.113. 2002.
- KABAT M. R., PATEL M. K., TRIPATHY C. R. A heuristic algorithm for core selection in multicast routing. Journal Of Computer Science And Technology 26(6): 954-961. Nov. 2011.
- KANDEL, A. **Fuzzy Mathematical Techniques with Applications**, Estado Unidos: Addison-Weslwy Publishing Company. 1986.
- KAYA, T., KAHRAMAN, C. An integrated fuzzy AHP-ELECTRE methodology for environmental impact assessment. Journal Expert Systems with Applications, Volume 38, Issue 7, p. 8553-8562, 2011.
- KWONG, C. K.; BAI, H. A fuzzy AHP approach to the determination of importance weights of customer requirements in quality function deployment. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 13, p. 367-377, 2002.
- LAM, W., BACCHUS, F. Learning Bayesian Belief Networks: An Approach Based On The MDL Principle. Computational Intelligence, p. 269–293, 1994.

LEITE, L. et al. FlexTV - Uma Proposta de Arquitetura de Middleware para o Sistema Brasileiro de TV Digital. **Revista de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais**. São Paulo, Brasil. v.2, p. 29-50, 2005.

LEVIN, M. Selection of user's connection in last-mile problem. **IEEE transaction on system, man, and cybernetics – part a: systems and humans**. v. 41, n. 2. 2011.

LIN, S; W. WU, C G; LU, M T. Decomposition of Variation in Expert's Judgments in the Analytical Hierarchy Process. 40th Conference on Computers and Industrial Engineering (CIE), 2010.

LO, C. et al.. Service selection based on fuzzy Topsis method. Conference Waina. 2010.

LUZ, J.F.; RIBEIRO, G. Tecnologia da Terceira Geração, 3G. Canoas RS: Engenharia das Telecomunicações, Centro Universitário La Salle, 2008.

MAHMOODZADEH S., SHAHRABI, J., PARIAZAR, M., ZAERI, M.S. Project Selection by Using Fuzzy AHP and TOPSIS Technique. International Journal of Humanities and Social Sciences Volume 1 Number 3. 2007.

MALUTTA, C. Método de apoio à tomada de decisão sobre adequação de aterros sanitários utilizando a Lógica Fuzzy. 2004. **Publicação eletrônica**. Disponível em: <<http://teses.eps.ufsc.br/defesa/pdf/11633.pdf>>. Acesso em: 01 jan. 2011.

MARGALHO, M. et al. Canal de Retorno para TV Digital com Interatividade Condicionada por Mecanismo de Sinalização Contínua e Provisionamento de Banda Orientado a QoS. **IEEE Latin America Transaction**, v. 5, n. 5, 2007.

MONTEIRO, F., SILVA, C., JACOB, A., SERUFFO, M., CARDOSO, D. E FRANCÊS C., 2011 TVD-EDUC 2.0: um estudo de caso de aplicação educacional interativa para TV Digital. In: 2o Simpósio Internacional de Televisão Digital, Bauru – SP, 2011.

MUKAIDONO, M. **Fuzzy Logic for Beginners**. World Scientific Pub Co Inc, 2001.

NASSER, NIDAL. A Theoretical Approach for Service Provider Decision in Heterogeneous Wireless Networks. IEEE Communications Society subject matter experts for publication in the IEEE CCNC 2006 proceedings. 2006.

OLIVEIRA, M. et al.. Implementing home care application in brazilian digital TV. In: Proceedings of the international conference on Global Information Infrastructure Symposium, 2. **Anais...** Hammemet, p. 1-7, 2009.

OLSEN, B. et al..Technoeconomic Evaluation of the Major Telecommunication Investment Options for European Players. **IEEE Network**, v. 20, e. 4, p.6-15, 2006.

OHRTMAN, F. **WiMAX Handbook: Building 802.16 Networks**. McGraw-Hill Professional, 2005.

OPNET Modeler. Extracted from <http://www.opnet.com>. 2012.

PARKER, R. The Economics of Digital TV's future. **D. Gerbarg, The economics, technology and content of digital TV**. USA: Kluwer Academic Publishers. 1999.

- PENG X., DAI F. Information Systems Risk Evaluation Based on the AHP-Fuzzy Algorithm. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON NETWORKING AND DIGITAL SOCIETY. **Anais...** v. 2, p.178-180, 2009.
- POLO, E. I. et al.. PLC as a return channel for interactive digital TV. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATIONS AND NETWORKING IN CHINA. **Anais...** Shangai, China, p. 1-5, 2007.
- PRADO, G. M; ZORZO, S. D. Interactive Service Provider Architecture for Interactive Digital Television Systems. In: Conference International on Computer Information Systems and Industrial Management Applications (CISIM), 2010.
- REZENDE. S. O. *Sistemas inteligentes: Fundamentos e Aplicações*. Editora Manole. 2003
- ROGERS, M.; BRUEN, M. A new system for weighting environmental criteria for use within ELECTRE III, *European Journal of Operational Research*, 107, 552-563. 1998.
- ROY, B. *Méthodologie Multicritère d'Aide à la Décision*, Economica, Paris. 1985.
- ROY, B. The outranking approach and the foundations of Electre methods. *Theory and Decision* 31:49–73. 1991.
- SAATY, T. L. **The Analytic Hierarchy Process** , New York: McGraw-Hill, 1980.
- SAATY, T. L. **The Analytic Network Process: Decision Making with Dependence and Feedback**. Pittsburgh: Rws Pubns, 370 p, 1996.
- SAATY, T.L. **Método de Análise Hierárquica**, São Paulo: Editora Makron, 1991.
- SAGHAFIAN, Soroush, HEJAZI, S. Reza, 2005, “Multi-criteria group decision making using a modified fuzzy TOPSIS procedures”, In: proceedings of International Conference on Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation, Computer Society. 2005.
- SALEHI, M.; MOGHADDAM, T. R. Projetc Selection by using a Fuzzy Topsis Technique. *World Academy os Science, Engineering and Technology*. p 85-90. 2008.
- SANTOS, A. C. O. Reflexões sobre a convergência tecnológica: A TV digital interativa no Brasil. 2003. **Biblioteca On-line de Ciências da Comunicação**. Disponível em <www.bocc.ubi.pt>. Acesso em: 02 jun. 2011.
- SANTOS, J. B. et al.. Trends on Building Interactive Applications in the Brazilian Digital Television System. In: CONSUMER COMMUNICATIONS AND NETWORKING CONFERENCE (CCNC), 7. **Anais...** Las Vegas, e. 1, p. 1-5, 2010.
- SGORA, A. et al.. An Access Network Selection Algorithm for Heterogeneous Wireless Environments. *ISCC 2010*.
- SGORA A. et al.. Network selection in a WiMAX-WiFi Environment. *Journal of pervasive and mobile computing*. 2011.

- SOARES, L.; RODRIGUES, R.; MORENO, M. Ginga-NCL: The Declarative Environment of the Brazilian Digital TV System. **Journal of the Brazilian Computer Society**. Porto Alegre, Brasil. v. 13. n. 1. p. 45 – 50, 2007.
- SOUZA, F. G. L.; LEITE, L. E.; BATISTA, C. E.. Ginga-J: The Procedural Middleware for the Brazilian Digital TV System. **Journal of the Brazilian Computer Society**. Porto Alegre, Brasil. v. 13. n. 4. p. 47-56, 2007.
- SPIRITES, P.; GLYMOUR, C., SCHEINES, R. Causation, Prediction, And Search. MIT Press, 2001.
- TAN, P.; STEINBACH, M.; KUMAR, V. Introduction to Data Mining. Addison Wesley (2005).
- TELECO: Conhecimento em Telecomunicações. 3G: 3ª Geração de celular no Brasil. Disponível em: <http://www.teleco.com.br/3g_brasil.asp>. Acesso em: 15 nov. de 2010.
- TORFI, F. et al.. Fuzzy AHP to determine the relative weights of evaluation criteria and Fuzzy TOPSIS to rank the alternatives. **Journal Applied Soft Computing**, Elsevier. 2009.
- TSOUKALAS, L. H.; UHRIG, R. E.. **Fuzzy and Neural Approaches in Engineering: Adaptive and Learning Systems for Signal Processing, Communications and Control Series**. Nova Iorque: Wiley Interscience, 1997.
- VIANA; N. S. et al. Convergence proposal between the brazilian middleware for iDTV and home network platforms. In: CONSUMER COMMUNICATIONS AND NETWORKING CONFERENCE, 6. **Anais...** Las Vegas, p. 1-5, 2009.
- VINCKE, P. Multicriteria decision-aid. Wiley, Bruxelles. 1992.
- WANG, J., CHENG, C., CHENG, H. K. Fuzzy hierarchical TOPSIS for supplier selection. *Journal of applied soft computing*. 2009.
- XIAO Y. et al.. Internet Protocol Television (IPTV): The Killer Application For The Next-Generation Internet. **IEEE Communications Magazine**. v. 45, e. 11, p. 126–134, 2007.
- XUAN S.; A Novel Kind of Decision of Weight of Multi-attribute Decision-Making Model Based on Bayesian Networks. International Seminar on Business and Information Management, 2008. ISBIM '08.
- XUAN, S.; QINZHOU, N; HEFEI X; A Bayesian Method for Decision of Weight for MADM Model with Interval Data. International Conference on Advanced Computer Control, 2009.
- ZIMMERMANN, H. J. **Fuzzy sets theory and its applications**. Boston: Kluwer Academic Publishers, Ed. 3. 1991.
- ZIMMERMANN, M.; DOSTERT, K.. Analysis and Modeling of Impulsive Noise in Broad-Band Powerline Communications. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 44, n. 1, 2002.

ZIMMERMANN, M.; DOSTERT, K. The low voltage power distribution network as last mile access network-signal propagation and noise scenario in the HF-range. **AEÜ International Journal Electronics and Communications**, v. 54, n. 1, 2000.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS COMPLEMENTARES

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios 2009**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/trabalhoerendimento/pnad2009/default.shtm>>. Acesso em: 31 maio 2011.

HRASNICA, H. et al. **Broadband Powerline Communications Networks – Network Design**. John Wiley & Sons, e.1, 2004.

NUAYEDUM, E. S. Software para aplicação do método ELECTRE. Monografia apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade da Amazônia. Belém – Pará, 2010.

ROY, B. ELECTRE III: Algorithme de Classement Base Sur Une Représentation Floue des Préférences en Présence des Critères Multiples, Cahiers du CERO, vol. 20, n° 1, pp. 3-24. 1978.