

ESPECIFICAÇÃO DE UM MODELO
DE PLATAFORMA DE
REFERÊNCIA PARA A NOVA
GERAÇÃO DE REDES SEM FIO

GETÚLIO EMÍLIO OLIVEIRA PEREIRA

DEZEMBRO/2013

Especificação de um Modelo de Plataforma de Referência para a Nova Geração de Redes sem Fio

Getúlio Emílio Oliveira Pereira

Dissertação apresentada ao Instituto Nacional de Telecomunicações como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Telecomunicações.

Prof. Dr. Antônio Marcos Alberti – orientador

Santa Rita do Sapucaí

2013

Pereira, Getúlio Emílio Oliveira

P436e

Especificação de um Modelo de Plataforma de Referência para Nova Geração de Redes sem fio. / Getúlio Emílio Oliveira Pereira. – Santa Rita do Sapucaí, 2014.

139 p.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Marcos Alberti.

Dissertação de Mestrado – Engenharia de Telecomunicações – Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL.

Inclui bibliografia e anexo.

1. Internet do Futuro 2. Rádio Cognitivo 3. Desacoplamento de Identificadores e Localizadores 4. Virtualização 5. Redes cognitivas. 6. Engenharia de Telecomunicações I. Alberti, Antônio Marcos. II. Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL. III. Título.

CDU 621.39

Dissertação defendida e aprovada em 16/12/2013 pela comissão julgadora:

Prof. Dr. Antônio Marcos Alberti (orientador) – Inatel

Prof. Dr. Rodrigo da Rosa Righi – Universidade Vale do Rio dos Sinos – Unisinos

Prof. Dr. Estevan Marcelo Lopes – Inatel

Prof. Dr. José Marcos Câmara Brito – Coordenador
do Curso de Mestrado – INATEL

Dedico este trabalho aos meus pais por seu apoio,
dedicação e amor incondicionais.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter abençoado...

Agradeço aos meus pais Sebastiana e Ney, meu irmão Edney e minha namorada Mayara, que juntamente com Deus são os personagens mais ilustres dessa minha vitória. Pois, sempre estiveram presentes em minha vida, principalmente nos momentos de mais dificuldades e em suas contribuições mais singelas, me enchiam de carinho, preces e conselhos, recarregando, assim, minhas energias para mais uma etapa. Sou muito grato a vocês por tudo o que me proporcionaram, por me ensinarem a lutar por meus objetivos, por me ensinarem a escolher caminhos com sabedoria, por me ensinarem a viver.

Agradeço a orientação, colaboração e incentivo do meu orientador Prof. Dr. Antônio Marcos Alberti.

Enfim, agradeço a todos que apoiaram e incentivaram diretamente ou indiretamente para que essa conquista fosse alcançada.

So far as the laws of mathematics refer to reality, they are not certain, and so far they are certain, they do not refer to reality.

Albert Einstein

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS.....	XI
LISTA DE TABELAS.....	XIII
CAPÍTULO 1.....	22
INTRODUÇÃO.....	22
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	23
1.2 MOTIVAÇÃO.....	24
1.3 OBJETIVOS.....	25
1.4 CONTRIBUIÇÕES.....	25
1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	26
CAPÍTULO 2.....	27
APRESENTAÇÃO DAS TECNOLOGIAS ESTUDADAS.....	27
2.1 FUNÇÕES AUTÔNOMAS (AUTO – *).....	28
2.1.1 <i>Projetos com propriedades auto-*</i>	32
2.1.1.1 <i>Selfware</i>	34
2.1.1.2 <i>Selfman</i>	34
2.1.1.3 <i>Grid4All</i>	34
2.1.1.4 <i>ANA (Autonomic Network Architecture)</i>	35
2.1.1.5 <i>CASCADAS (Component-ware for Autonomic Situation-aware Communications, and Dynamically Adaptable Services)</i>	35
2.1.1.6 <i>BIONETS (BIologically inspired NETwork and Services)</i>	36
2.1.1.7 <i>HAGGLE</i>	36
2.1.1.8 <i>Winner</i>	36
2.1.1.9 <i>Gandalf</i>	37
2.1.1.10 <i>AutoI (Autonomic Internet)</i>	37
2.1.1.11 <i>4WARD</i>	38
2.1.1.12 <i>EFIPSANS</i>	39
2.1.1.13 <i>SOCRATES (Self-Optimization and self-ConfiguRATion in wireless networkS)</i>	39
2.2 RÁDIO COGNITIVO.....	39
2.2.1 PROJETOS DE PLATAFORMAS DE RÁDIO.....	46

2.2.1.1 E ³ (End to End Efficiency).....	46
2.2.1.2 GNU Radio	49
2.2.1.3 SORA (Software Radio)	51
2.2.1.4 WiNC2R.....	52
2.2.1.5 CREW	55
2.2.1.6 Self-Net	57
2.3 VIRTUALIZAÇÃO.....	59
2.3.1 Tipos de Virtualização Tipicamente Encontrados na Literatura	62
2.3.1.1 Virtualização Total.....	63
2.3.1.2 Paravirtualização	64
2.3.1.3 Virtualização de Hardware	65
2.3.1.4 Virtualização de Redes de Comunicações.....	66
2.4 DESACOPLAMENTO DE IDENTIFICADOR E LOCALIZADOR DE HOST	68
2.4.1 PROJETOS DE DESACOPLAMENTO DE IDENTIFICADOR E LOCALIZADOR DE HOST.....	72
2.4.1.1 Mobile IP.....	72
2.4.1.2 HIP – Host Identity Protocol.....	74
2.4.1.3 MILSA – Mobility and Multihoming Supporting Identifier Locator Split Architecture	75
2.5 CONCLUSÕES PARCIAIS.....	77
CAPÍTULO 3	79
PLATAFORMA REFERENCIAL CONVERGENTE PARA NOVA GERAÇÃO DE REDES SEM FIO	79
3.1 ESPECIFICAÇÃO DOS REQUISITOS E DIRECIONADORES PARA A PLATAFORMA DE RÁDIO	80
3.2 COMPORTAMENTO DESEJADO DO RÁDIO COGNITIVO	85
3.2.1 CARACTERÍSTICAS AUTÔNOMAS	85
3.2.1.1 Características para Aquisição e Síntese de Conhecimentos	87
3.2.1.2 Características para Sinalização de Conhecimentos.....	88
3.2.1.3 Sensoriamento de Espectro	89
3.2.1.4 Controle de Acesso ao Meio.....	93
3.2.1.5 Auto-organização e Ciclo de Decisão	94
3.2.1.6 Suporte a Redes Legadas.....	97
3.2.2 VIRTUALIZAÇÃO	97

3.2.3 DESACOPLAMENTO DE IDENTIFICADOR E LOCALIZADOR DE <i>HOSTS</i>	98
3.2.4 GERENTE AUTÔNOMO DO RÁDIO COGNITIVO.....	100
3.3 ESPECIFICAÇÃO DE UMA PLATAFORMA DE REFERÊNCIA PARA O RÁDIO OPORTUNÍSTICO .	102
3.4 <i>Comparação das Abordagens Existentes com a Plataforma de Referência</i>	111
3.5 CONCLUSÃO	120
CAPÍTULO 4	122
CONCLUSÃO	122
ANEXO A	126
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	127

Lista de Figuras

Figura 2.1 Representação contextual do Ciclo autônomo.....	29
Figura 2.2. Plataforma do RT [38].	40
Figura 2.3. Plataforma RDS [38].	41
Figura 2.4. Ciclo Cognitivo. Adaptado de [5].....	43
Figura 2.5. Visão geral de plataforma do E3. Adaptado de [47].....	47
Figura 2.6. Plataforma GNU <i>Radio</i>	50
Figura 2.7. RCB (Radio Control Board). Adaptado de [53].....	52
Figura 2.8. Plataforma proposta pelo WiNC2R. Adaptado de [55].....	53
Figura 2.9. Anéis de Privilégios. Adaptado de [68].	63
Figura 2.10. Virtualização Completa.	64
Figura 2.11. Paravirtualização.	65
Figura 2.12. Virtualização de hardware.	66
Figura 2.13. Virtualização de rede. Adaptado de [62].....	67
Figura 2.14. Arquitetura de nomes planos. Adaptado de [76].	71
Figura 2.15. Arquitetura de nomes hierárquicos. Adaptado de [76].....	72
Figura 2.16. Funcionamento do Mobile IP. Adaptado de [84].	74
Figura 2.17. Comparação entre Internet atual (lado esquerdo) com o protocolo HIP (lado direito). Adaptado de [84].	75
Figura 2.18. Arquitetura MILSA.	76
Figura 2.19. Exemplo de nome na arquitetura MILSA.	77
Figura 3.1. Processo de síntese de conhecimento.....	88
Figura 3.2. Oportunidades espectrais que podem ser conhecidas através do sensoriamento espectral.	90
Figura 3.3. Processo de sensoriamento de espectro. Adaptado de [110].....	91
Figura 3.4. Visão geral da auto-organização. Adaptado de [116].	94
Figura 3.5. Virtualização dos recursos de rádio.	98
Figura 3.6. Gerente Autônomo.	101
Figura 3.7. Estrutura básica do FPGA.	103
Figura 3.8. Diagrama em blocos simplificado da estrutura da plataforma proposta.	107
Figura 3.9. Diagrama em blocos de um sistema de transmissão a ser implementado na plataforma proposta.	108

Figura 3.10. Processo de atualização da sequência de roteamento na cadeia de transmissão.	109
Figura 3.11. Diagrama lógico da plataforma de Rádio Cognitivo.....	110
Figura 3.12. Estrutura de software da plataforma de referência.	110
Figura 3.13. Especificação da Plataforma Referencial Convergente para a nova Geração de Redes sem fio.....	111

Lista de Tabelas

Tabela 1. Comparação das plataformas de rádio existentes com a plataforma referencial proposta.....	112
Tabela 2. Comparação de algumas das plataformas utilizadas para implementação da Camada Física dos Rádios Oportunísticos.....	126

Lista de Siglas, Acrônimos e Abreviações

3G	Terceira geração de telefonia móvel
4G	Quarta geração de telefonia móvel
5G	Quinta geração de telefonia móvel
ACF	<i>Autonomic Communications Forum</i>
ADC	<i>Analog to Digital Converter</i>
AEM	<i>Autonomic Entity Management</i>
AGC	Amplificador de Ganho Variável
ANA	<i>Autonomic Network Architecture</i>
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
API	<i>Application Programming Interface</i>
ASIC's	<i>Application Specific Integrated Circuits</i>
AutoI	<i>Autonomic Internet</i>
Auto-*	Funções Autônomas
BIONETS	<i>BIologically inspired NETwork and Services</i>
C3MAC	<i>Cognitive Cooperative Control Medium Access Control</i>
CAPEX	<i>Capital EXpenditure</i>
CASCADAS	<i>Component-ware for Autonomic Situation-aware Communications, and Dynamically Adaptable Services</i>
CTSS	<i>Compatible Time-Share System</i>
CO₂	Dióxido de carbono
CORBA	<i>Common Object Request Broker Architecture</i>
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
DAC	<i>Digital to Analog Converter</i>
DARPA	<i>Defense Advance Research Products Agency</i>
DARPA XG	<i>DARPA neXt Generation</i>
DCMS	<i>Distributed Component Management Service</i>
DNS	<i>Domain Name System</i>
DoD	<i>Department of Defense</i>

DoS	<i>Deny of Service</i>
DPC	<i>Dynamic Protocol Composition</i>
DSNPM	<i>Dynamic Self-Organizing Network Planning and Management</i>
DSP	<i>Digital Signal Processor</i>
E³	<i>End to End Efficiency</i>
EE	<i>Environment Emulator</i>
EUA	<i>Estados Unidos da América</i>
FP6	<i>6th Framework Program</i>
FP7	<i>7th Framework Program</i>
FEC	<i>Forward Error Correction</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FIND	<i>Future Internet Design</i>
FPGA	<i>Field Programmable Gate Array</i>
GA	<i>Gerente Autônomo</i>
GENI	<i>Global Environment for Network Innovations</i>
GPP	<i>General Purpose Processor</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GSM	<i>Global System for Mobile communication</i>
H2H	<i>Human to Human Communication</i>
HI	<i>Host Identifier</i>
HIP	<i>Host Identity Protocol</i>
HMS	<i>HUI Mapping Sublayer</i>
HSDPA	<i>High-Speed Downlink Packet Access</i>
HTTP	<i>Hypertext Transfer Protocol</i>
HUI	<i>Hierarchical URI-like Identifier</i>
I/O	<i>Input/Output</i>
ICT	<i>Information and Communication Technology</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IETF	<i>Internet Engineering Task Force</i>
IFFT	<i>Inverse Fast Fourier Transform</i>
IMT-2000	<i>International Mobile Telecommunications-2000</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>

IPv4	<i>Internet Protocol version 4</i>
IPv6	<i>Internet Protocol version 6</i>
IRIS	<i>Implementing Radio in Software</i>
ISM	<i>Industrial, Scientific, and Medical</i>
ISP	<i>Internet Service Provider</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
J2EE	<i>Java 2 Platform, Enterprise Edition</i>
JESS	<i>Java Expert System Shell</i>
JMS	<i>Java Message Service</i>
JPRC	<i>Joint Power Rate and Channel</i>
JVM	<i>Java Virtual Machine</i>
LTE/LTE <i>advanced</i>	<i>Long Term Evolution</i>
LNA	<i>Low Noise Amplifier</i>
LO	<i>Local Oscillator</i>
LRA	<i>Lei do Retorno Acelerado</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
LVDS	<i>Low Voltage Differential Signaling</i>
MANA	<i>Management and Service-aware Networking Architectures</i>
MAC	<i>Media Access Control</i>
MDE	<i>Monitoring, Decision making, and Execution</i>
MILSA	<i>Mobility and Multihoming Supporting Identifier Locator Split Architecture</i>
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
M-PSK	<i>M-ary Phase Shift Keying</i>
M-QAM	<i>M-ary Quadrature Amplitude Modulation</i>
MRV	<i>Máquina de Rádio Virtual</i>
MTC	<i>Machine Type Communications</i>
NDCM	<i>Network Domain Cognitive Manager</i>
NEC	<i>Network Element Controller</i>
NECM	<i>Network Element Cognitive Manager</i>
NGN	<i>Next Generation Networks</i>

NwGN	<i>New Generation Networks</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiplexing</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiple Access</i>
OMF	<i>Control and Management Framework</i>
OO	<i>Orientação a Objetos</i>
OPEX	<i>Operational Expenditure</i>
P2P	<i>Peer-to-Peer</i>
PA	<i>Power Amplifier</i>
PCIe	<i>Peripheral Component Interconnect Express</i>
PGS	<i>Proxy Gateway System</i>
PLLs	<i>Phase Locked Loops</i>
PPI	<i>Primeira Padronização Internacional</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QoE	<i>Quality of Experience</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
RAN	<i>Radio Access Networks</i>
RC	<i>Rádio Cognitivo</i>
RCA	<i>Redes de Comunicações Autônomas</i>
RCB	<i>Radio Control Board</i>
RDS	<i>Rádio Definido por Software</i>
RF	<i>Rádio Frequência</i>
RFC	<i>Request for Comments</i>
RRC	<i>Rede de Rádios Cognitivos</i>
RRM	<i>Radio Resource Management</i>
RT	<i>Rádio Tradicional</i>
RZBS	<i>Realm Zone Bridging Server</i>
Self-NET	<i>Self-Management of Cognitive Future Internet Elements</i>
SINR	<i>Signal to Interference plus Noise Ratio</i>
SLAs	<i>Service Level Agreements</i>
SO	<i>Sistema Operacional</i>
SOCRATES	<i>Self-Optimization and self-ConfigurATIOn in</i>

	<i>wireless networks</i>
SON	<i>Self-Organizing Networks</i>
SORA	<i>Software Radio</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TI	Tecnologia da Informação
TV	Televisão
TWIST	<i>Wireless Indoor Sensor Network Testbed</i>
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
UML	<i>Unified Modelling Language</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
URI	<i>Uniform Resource Identifier</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
USRP	<i>Universal Software Radio Peripheral</i>
VHF	<i>Very High Frequency</i>
VLAN	<i>Virtual Local Area Network</i>
VM	<i>Virtual Machine</i>
VMM	<i>Virtual Machine Monitor</i>
VPN	<i>Virtual Private Network</i>
XML	<i>eXtensible Markup Language</i>
WARP	<i>Wireless open-Access Research Platform</i>
WebLogic LOC	<i>Liquid Operation Control</i>
WebSphere 6.1 XD	<i>eXtended Deployment</i>
WiNC2R	<i>WINLAB Network Centric Cognitive Radio</i>
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>
WNG	<i>Wireless and Networking Group</i>

Lista de símbolos

Gbytes

GHz

Kbps

Mbps

MHz

MS/s

Gigabytes

Giga Hertz

Kilo bits por segundo

Mega bits por segundo

Mega Hertz

Mega Samples per second

RESUMO

Centenas de iniciativas estão interessadas em redefinir a Internet, visando atender as necessidades da sociedade de informação nas próximas décadas. Estes esforços são coletivamente chamados de Internet do Futuro. Já no que se refere aos sistemas de comunicação digital sem fio, as pesquisas avançam na direção de aumentar a eficiência de utilização do espectro de radiofrequência, bem como na criação de plataformas que facilitem a migração para novas tecnologias e protocolos. Os novos terminais de comunicação de dados devem ser capazes de aprender com o ambiente em que se encontram, utilizando os canais de comunicação disponíveis e evitando interferências com usuários licenciados. Estes terminais de radiocomunicação são denominados de rádios cognitivos. Neste trabalho, tecnologias provenientes de ambas as frentes são integradas com o objetivo de criar um modelo de referência de rádio cognitivo para os terminais sem fio da Internet do Futuro.

Palavras chave: Internet do Futuro, Redes Autônomas, Rádio Cognitivo, Desacoplamento de Identificadores e Localizadores, Virtualização, Redes Cognitivas.

ABSTRACT

Hundreds of initiatives to redefine the Internet are being undertaken to meet the needs of our information society in the coming decades. These efforts are collectively called the Future Internet. Meanwhile, the research on digital wireless communication systems proceeds in the direction of increasing the radio spectrum utilization efficiency, as well as in creating platforms that facilitate migration to new technologies and protocols. The new data communication terminals must be able to learn about the environment in which they are using the available communication channels and avoiding interference with licensed users. These radio terminals are called cognitive radios. In this work, technologies from both fronts are integrated in order to create a reference model for the cognitive radio terminals of the Future Internet.

Keywords: Internet of Future, Autonomic Networks, Cognitive Radios, Split ID-loc, Virtualization, Cognitive Networks.

Capítulo 1

Introdução

Ultimamente, o mundo das comunicações vem sofrendo mudanças, como por exemplo, o grande número de fabricantes de equipamentos, tornando as redes mais heterogêneas; o crescimento da Internet; a aumento das tecnologias móveis; a convergência fixo-móvel; e ainda a convergência plena de serviços que é a meta de todos os operadores de telecomunicações [1]. O alvo de qualquer operadora é ser uma provedora de múltiplos serviços, por exemplo, de televisão, banda larga, telefonia fixa e móvel e, aos poucos, serviços de valor agregado, como segurança de rede, conectividade doméstica, conteúdos sob demanda, vigilância, etc. Esse é o mundo *triple-play*, *quadruple-play* e quantos mais serviços forem possíveis se agregar ao consumidor [2]. Aliado a estes fatores tem-se o aumento da complexidade de computação e das soluções de *software*, que têm tornado as infra-estruturas das redes de comunicações maiores e mais complexas [1]. Estas alterações fazem com que fiquem cada vez mais árduas as tarefas de gerência em tais redes. Este fato, dificulta para o operador da rede fazer a implantação, configuração, otimização e manutenção em tempo de resposta hábil a essas mudanças [3]. Está cada vez mais difícil atender as demandas de serviços e tem-se a sensação de que está se aproximando a cada dia da capacidade humana de realizar tais tarefas. Tais evidências levantam uma série de discussões. Algumas delas são: será que as redes existentes conseguirão suportar todo esse rápido crescimento das comunicações? Novas redes surgirão ou as redes existentes serão adaptadas a esse novo cenário? Quais são as tendências para as novas tecnologias, novas soluções e serviços? Como gerenciar as redes neste novo cenário? Este trabalho aborda estas perguntas, buscando respondê-las após o estudo de diversas tecnologias emergentes no contexto das redes sem fio.

1.1 Contextualização

Uma das propostas consideradas como possível solução para os problemas das redes é o paradigma das redes autônomas e auto-organizáveis SON (*Self-Organizing Networks*) [1]. Esta rede deve ser capaz de se auto-gerenciar, auto-configurar, auto-otimizar e em alguns casos se auto-reparar, minimizando, ou até mesmo no futuro, eliminando muitas das tarefas rotineiras do operador, como por exemplo, medição e utilização dos equipamentos. Sendo assim, é necessário um controle descentralizado, o que deve trazer uma enorme explosão de criatividade e novas atividades econômicas que são impossíveis de serem alcançadas em um ambiente mais restrito. [3].

No ambiente móvel, uma solução é a utilização de Rádios Cognitivos (RC). Essa proposta foi apresentada por Joseph Mitola III [4], cientista do Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América (EUA) DARPA (*Defense Advance Research Products Agency*), em um seminário da *KTH The Royal Institute of Technology* em 1998. Posteriormente foi publicada por Mitola e Gerald Q. Maguire em 1999 [5]. Segundo Mitola, um Rádio Cognitivo é um dispositivo de rádio definido por *software* capaz de mudar seus parâmetros de transmissão e recepção de acordo com informações sobre o meio no qual se encontra, como por exemplo, condições de utilização do espectro de radiofrequência e condições de utilização da rede. Estas alterações são feitas a fim de garantir mais eficiência e menos interferência entre dispositivos, proporcionando assim uma melhor experiência ao usuário.

Outra tecnologia considerada para atender os requisitos das novas redes de comunicação é a virtualização. Ela surgiu com o propósito de criar uma camada de abstração entre o *hardware* e *software* para que mais de um Sistema Operacional (SO) pudesse ser executado em paralelo sobre um mesmo *hardware* de forma flexível, genérica, homogênea e isolada. A virtualização foi um tema muito estudado e utilizado nos anos 60 e 70 e vem ganhando força novamente [6].

Além das propostas apresentadas anteriormente, tem-se o desacoplamento entre identificadores e localizadores de *host*¹. Atualmente, o endereçamento IP é

¹ *Host* é qualquer dispositivo ou computador que esteja conectado a uma rede.

sobrecarregado com funções de localização e identificação de *hosts*. Tais funcionalidades fazem com que o endereço IP mantenha um acoplamento lógico entre a identificação e a localização dos *hosts*. Com isso, as conexões se perdem quando o endereço IP é modificado. Esta dupla funcionalidade causa diversos problemas na Internet atual, principalmente no suporte à mobilidade. Portanto, serão apresentadas algumas abordagens que lidam com o desacoplamento de identificadores e localizadores de *hosts* e de conteúdos em redes atuais e futuras. Tais abordagens propõem soluções para diversos problemas como o de mobilidade e *multihoming*² de entidades físicas e lógicas, bem como para o problema de escalabilidade, segurança e de distribuição de conteúdo.

Devido ao rápido crescimento das tecnologias de comunicação e informação pode-se enfrentar nos próximos anos um gargalo nos serviços oferecidos. Entretanto, as tecnologias citadas devem proporcionar uma arquitetura de rede que resolva os problemas atuais de forma inteligente e que esteja apta a suportar a demanda de serviços atuais e os novos que poderão surgir.

1.2 Motivação

Devido à velocidade que novos dispositivos surgem e se conectam à rede, as tecnologias tradicionais de hoje em dia, estão chegando ao seu limite de capacidade e operação, como por exemplo, o endereçamento IP (*Internet Protocol*) atual. E ainda, as redes que conhecemos foram projetadas e coordenadas de maneira centralizada, seguindo um único plano de gerência, o que dificulta a realização de tal tarefa. Pois, quanto maior o número de dispositivos para serem gerenciados mais sobrecarregados os operadores da rede ficarão, tornando a tarefa árdua e penosa. Levando em consideração esse cenário e o fato de que para as redes de próxima geração é esperado um crescimento de forma imprevisível em diversos aspectos da rede, como por exemplo, topologia e componentes que as compõem [1], pesquisadores da área vêm trabalhando para encontrar propostas que visam lidar com estes problemas [1] e [3]. Com base nessas pesquisas o autor se motivou para propor

² *Multihoming* significa ter múltiplas interfaces de conexão com múltiplos localizadores para um mesmo *host*, ao mesmo tempo.

um modelo de referência para as redes sem fio do futuro.

1.3 Objetivos

Neste trabalho, acredita-se que a combinação das tecnologias citadas na contextualização tem o potencial de criar novas arquiteturas de rede. Essas novas soluções deverão ser capazes de promover o crescimento econômico e a mudança social, agregando mais valor para as operadoras de conteúdo, de rede e para o usuário final, oferecendo uma melhor experiência vivenciada aos serviços existentes e futuros. Portanto, esta dissertação tem o objetivo de apresentar um modelo de referência que integra soluções autônomas, rádios cognitivos, virtualização e desacoplamento de identificador e localizador de *host*. Objetiva-se que o modelo seja capaz atender às redes legadas com seus requisitos atuais e ainda os que podem surgir em redes futuras. A proposta do trabalho é oferecer uma base para pesquisa na área de soluções autônomas, rádios cognitivos, virtualização e desacoplamento de identificador e localizador de *host* e, ainda ser um ponto de partida para discussões a respeito de modelos e tecnologias que possam ser utilizadas na implantação do modelo proposto.

1.4 Contribuições

Este trabalho apresenta os principais conceitos de redes autônomas, rádios cognitivos, virtualização e desacoplamento de identificador e localizador de *host*. Tais conceitos, investigados em diversos artigos, são mostrados neste trabalho de forma sintetizada. Acredita-se que essa é uma importante contribuição para aqueles que iniciam suas pesquisas em novos paradigmas para redes sem fio. As informações organizadas formam uma base para que pesquisadores possam rapidamente se inteirar dessas novas tecnologias e as referências bibliográficas citadas possibilitam o aprofundamento das pesquisas.

Está proposto neste trabalho um modelo de referência para as redes sem fio, com suporte a virtualização, características autônomas e desacoplamento de identificador e localizador de *host*.

1.5 Estrutura da dissertação

Esta dissertação de mestrado está estruturada em 4 capítulos. O Capítulo 1 traz uma introdução. O Capítulo 2 apresenta um levantamento bibliográfico a respeito da origem, histórico e projetos existentes no escopo das tecnologias estudadas. O Capítulo 3 faz um levantamento dos direcionadores para criação do modelo e apresenta a proposta da plataforma referencial convergente para nova geração de redes sem fio. O Capítulo 4 traz as considerações finais, conclusões e as propostas para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Apresentação das tecnologias estudadas

Neste capítulo são apresentados os principais conceitos das redes autônomas, rádio cognitivo, virtualização e desacoplamento de identificador e localizador de *host*. É feito um levantamento bibliográfico mostrando o estado da arte de cada uma delas. Conforme será visto, algumas utilizam uma abordagem totalmente nova para o desenvolvimento de suas soluções. Esta abordagem é denominada *Clean Slate* [7]. O termo *Clean-Slate* significa começar do zero com o que já se sabe hoje. Ou seja, utilizar todo o conhecimento já existente para desenvolver uma nova arquitetura capaz de resolver os problemas atuais com soluções mais inteligentes, adaptativas e que fazem o melhor uso dos recursos como os de transmissão, processamento, energia e memória. Esta abordagem não tem como limitante, para a nova arquitetura, a manutenção da compatibilidade com os sistemas atuais. Ainda sobre *Clean Slate*, de acordo com [8], tal abordagem defende que os projetos sejam focados em uma direção que não seja vinculada aos requisitos impostos pelas redes atuais. O desafio não é adaptar estas redes para suprir as novas demandas. Mas, fazer uma especulação das necessidades futuras, trabalhar cuidadosamente nas exigências arquitetônicas, instigar a pesquisa em conceitos inovadores de redes para atender tais requisitos. Além disso, deve-se produzir um argumento concreto a favor da arquitetura proposta.

Outra abordagem que é considerada pelas tecnologias estudadas é a incremental. Esta tem como proposta adicionar novas funcionalidades e protocolos à arquitetura existente, ou seja, adaptar as redes existentes para prover as soluções do futuro.

2.1 Funções Autônomas (Auto – *)

As redes autônomas tem a característica principal de se auto-gerenciar. As funções que devem constituir estas redes são comumente conhecidas como funções auto-* ou propriedades auto-*. Estas propriedades foram originalmente definidas pelos pesquisadores da IBM Kephart e Chess em 2001 [9]. Elas fazem parte da proposta chamada computação autônoma, que é um novo paradigma de construção de sistemas inspirados na biologia. Segundo eles, os sistemas computacionais devem operar de forma independente e distribuída, em analogia ao sistema nervoso humano que regula funções vitais, como por exemplo, batimentos cardíacos sem um controle consciente do cérebro. Esta proposta visa reduzir a complexidade das soluções de *software* atuais. Ao invés de construir um único *software* composto de dezenas de milhares de linhas de código, os sistemas de computação autônoma obtêm o resultado esperado a partir da colaboração de diversos sistemas distribuídos. Essa visão pode ser resumida como auto-gerência sendo a essência da proposta da computação autônoma. Ela tem o objetivo de livrar o operador dos detalhes de operação e manutenção e ao mesmo tempo prover para o usuário um sistema operante de alto desempenho, vinte e quatro horas por dia, sete dias por semana.

Kephart e Chess definem quatro aspectos que devem compor a auto-gerência:

- Auto-Configuração – configurar automaticamente o sistema e os elementos que o compõem visando atingir objetivos de alto nível.
- Auto-Otimização – otimizar continuamente e proativamente o consumo de recursos do sistema de forma a melhorar a eficiência, qualidade e desempenho.
- Auto-Reparo – detectar, diagnosticar e reparar automaticamente problemas e falhas.
- Auto-Proteção – defender automaticamente o sistema e seus elementos contra ataques, vulnerabilidades e falhas em cascata.

As propriedades citadas acima são fundamentais para a construção do elemento autônomo proposto pelos pesquisadores da IBM. Cada uma destas funções deve operar de acordo com o ciclo autônomo apresentado na Figura 2.1. Este ciclo

forma um laço de retro-informação, através da coleta de informações de diferentes meios e fontes. A Figura 2.1 mostra as seguintes etapas: coleta, análise, decisão e ação. Na fase de coleta, o sistema colhe informações pertinentes ao seu funcionamento. Estes dados são apresentados para a fase de análise, a qual procura entender tais informações e determinar se o elemento está operando da maneira desejada. A decisão, com base nos dados vindos da fase de análise, determina, caso necessário, um plano de ações para reconfiguração do sistema. A fase de ação por sua vez, aplica todas as medidas necessárias. Este ciclo constrói um modelo de evolução do sistema, o qual é utilizado como base para decisões de adaptação do elemento e que posteriormente podem ser aplicados para a configuração do mesmo.

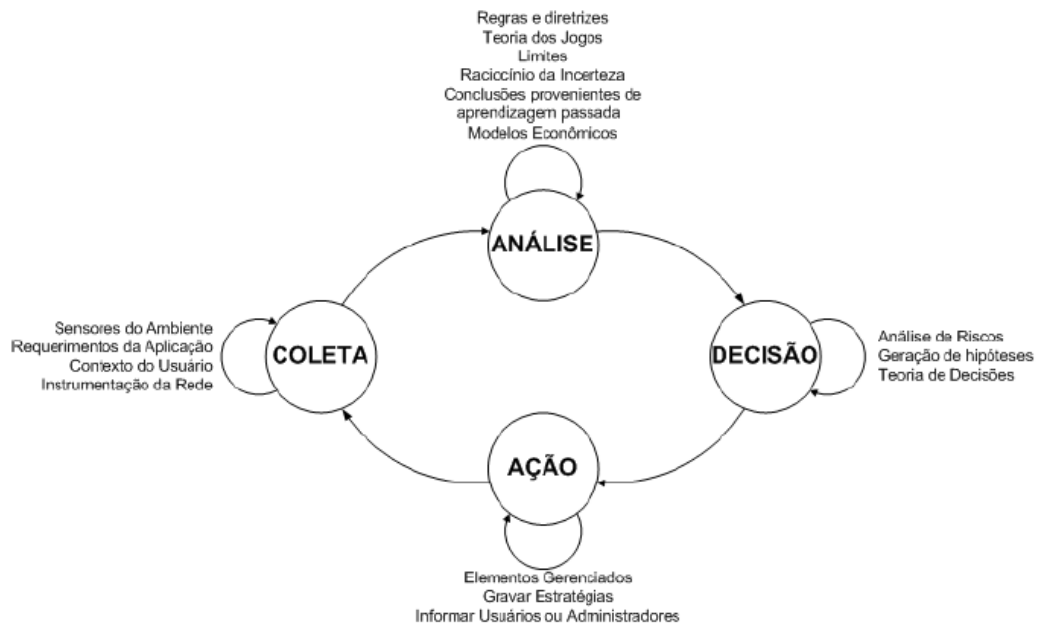


Figura 2.1 Representação contextual do Ciclo autônomo.

A partir desta idéia de Kephart e Chess, surgiram as Redes de Comunicações Autônomas (RCA), que incorporaram as propriedades auto-*. Existem várias definições para uma rede autônoma e de acordo com [10], ela é uma rede que opera e serve ao propósito de se auto-gerenciar sem, ou com o mínimo, de intervenção externa, até mesmo quando há mudanças no ambiente. Ainda, a rede de comunicação autônoma tem por objetivo abstrair como o comportamento de um elemento é influenciado ou modificado e como isso afeta outros elementos dentro de

uma rede [11]. De acordo com [12], a RCA propõe também acompanhar todo o ciclo de vida do elemento para aprender e avaliar o comportamento de um único elemento ou da própria rede.

A RCA é baseada na idéia do *selfware*. De acordo com [11], o termo *selfware* é um mecanismo para trocar políticas genéricas dentro de um grupo, como, regras, comportamento de uma dada função, etc. Portanto, *selfware* junta um controle autônomo local à auto-organização de um grupo ou rede para prover serviços auto-emergentes – sociais – do grupo ou rede. Através dessa definição podemos perceber similaridades entre as redes autônomas e computação autônoma, mas existem diferenças significativas entre elas. A computação autônoma é orientada para as aplicações de *software* e a gerência dos recursos computacionais. Já a rede autônoma é orientada a sistemas e serviços distribuídos e para o gerenciamento dos recursos de rede [11].

Embora existam algumas diferenças entre essas duas abordagens, ambas argumentam que as soluções tradicionais estão enfrentando uma diminuição dos benefícios com os avanços tecnológicos (CPU mais poderosas, memórias de maiores capacidades, etc.) uma vez que as complexidades do desenvolvimento e da gerência estão oprimindo os ganhos técnicos. Assim, estão alinhadas para identificar as necessidades das infra-estruturas de informação e comunicação do futuro, por exemplo, auto-organização, algoritmos descentralizados de gerência, etc. Além disso, pesa o fato de que o sistema deve estar ciente do estado de todos os processos envolvidos na rede (*self-awareness*) e do ambiente atual de operação (*self-situation*), detectar mudanças (*self-monitoring*) e ser adaptativo (*self-adjustment*) [13]. Também, de acordo com [14], é necessário estabelecer e atualizar um sistema de referência para identificar vizinhos e localizar recursos para esquemas cooperativos (*self-locating*). A fusão de todas essas técnicas é necessária para alcançar o objetivo da simplificação na implantação e gestão dos sistemas de comunicação [14].

No que diz respeito às soluções autônomas, a maioria ainda se encontra em estado de pesquisa. Vários projetos colaborativos vêm discutindo a arquitetura de *software* para sistemas autônomos. Certas soluções já estão presentes em alguns servidores de aplicação para Internet. Os líderes de mercado como, IBM e Oracle, usam propriedades autônomas para seus produtos, WebSphere 6.1 XD (*eXtended*

Deployment) e WebLogic LOC (*Liquid Operation Control*) [10], respectivamente. Os dois produtos têm propriedades autônomas que lidam com a implementação dinâmica e balanceamento de carga das aplicações. Os recursos mais avançados são propostos para as aplicações baseadas em Java³ e HTTP⁴ (*Hypertext Transfer Protocol*), que tiram vantagem da independência do sistema operacional, assim como facilidade para interceptar e encaminhar o fluxo de chamadas para um determinado servidor atual. Estas características autônomas seguem um conjunto de regras e há três níveis suportados:

- O sistema simplesmente notifica o administrador da detecção de violação.
- O sistema sugere um plano de ações para resolver a violação observada ou pede confirmação do usuário para aplicar um plano de ação.
- O sistema aplica o plano de reação automaticamente e informa o administrador.

Estes recursos podem ser considerados o primeiro passo para a auto-configuração, auto-reparo e auto-otimização. Organizar funções autônomas em torno de um sistema legado sem aumentar sua complexidade é um desafio. Por esta razão, vários projetos como *Selfware* [15], *Selfman* [16] e *Grid4All* [17] fizeram a proposta de uma plataforma baseada em componentes que é inspirada em objetos Fractais [18]. Os Fractais (do latim *fractus*, fração, quebrado) são objetos geométricos que podem ser divididos em várias partes, cada uma das quais semelhantes ao objeto original. Diz-se que os Fractais têm infinitos detalhes, são geralmente autossimilares e independem de escala. Em muitos casos, um Fractal pode ser gerado por um padrão repetido, tipicamente um processo recorrente ou iterativo [19]. Inspirado nessa autossimilaridade que os Fractais possuem, o consórcio *ObjectWeb*⁵ [20] fez uma especificação de componentes fractais de *software*. O objetivo de um componente

³ Java é uma linguagem de programação orientada a objeto.

⁴ HTTP é um protocolo de comunicação, situado na camada de aplicação do modelo OSI.

⁵ O Consórcio *ObjectWeb* é uma comunidade *open source* formada com o intuito de disponibilizar para qualquer pessoa a melhor e mais confiável tecnologia em *middlewares*. *Middlewares* referem-se aos sistemas de *software* entre as aplicações e o sistema operacional. O objetivo é facilitar o desenvolvimento de aplicações.

fractal é reduzir os custos de desenvolvimento, manutenção e distribuição de sistemas de *software*. O modelo é hierárquico, ou seja, os componentes podem ser compostos por outros componentes. Esse modelo apresenta alto grau de introspecção, que é a capacidade de descobrir e alterar, em tempo de execução, as informações estruturais de um componente. E intersecção, que é a capacidade de dois componentes compartilharem um terceiro. Os primeiros resultados desse modelo foram apresentados em [21] e [22]. Nesta especificação do *ObjectWeb*, a utilização de qualquer parte do modelo de componente é opcional. Ou seja, é possível utilizar ou não quaisquer de suas abstrações a depender do nível de controle que se espera alcançar. Além disso, pode ser usado com várias linguagens de programação para projetar, implantar, distribuir e reconfigurar sistemas e aplicações. Devido a esta característica de suportar gerenciamento durante o tempo de execução, o modelo fractal é uma ferramenta muito poderosa para lidar com a complexidade de sistemas em larga escala e para implantar as propriedades auto-*

Existe uma série de tecnologias novas ou existentes que podem se beneficiar com as soluções autônomas, como por exemplo: o paradigma de *cloud-computing*, que segundo [23], significa que a informação é permanentemente armazenada em servidores na Internet (*cloud*) e temporariamente em *caches*⁶ nos clientes (*computing*). Nesta tecnologia as soluções autônomas podem auxiliar no auto-dimensionamento das redes virtuais, visando otimizar a utilização dos servidores e outros recursos físicos; auto-reparo em servidores; auto-proteção (controle de acesso, identificação e autenticação) para combater ataques. A *Cloud Computing* é baseada principalmente no paradigma da virtualização, tema esse que será tratado mais a frente neste trabalho.

2.1.1 Projetos com propriedades auto-*

Projetos de pesquisa e esforços de padronização de soluções com propriedades autônomas estão surgindo em todos os lugares do globo. Em especial, na UE (União Europeia), pode-se citar o FP6 (*6th Framework Program*) [24], que foi

⁶ *Cache* – dispositivo de acesso rápido interno a um sistema, que serve de intermediário entre um operador de um processo e o dispositivo de armazenamento ao qual esse operador acede, armazenando os dados em meios de acesso mais rápidos.

um programa estruturante da comissão europeia no período de 2002 a 2006. O principal objetivo do FP6 foi criar uma rede europeia de pesquisas, promovendo integração e coordenação de todos os grupos de trabalho na Europa, que é largamente fragmentado. Com o sucesso do FP6, logo após seu término deu-se início ao FP7 (*7th Framework Program*) [25], que esteve em vigor de 2007 a 2013. O programa FP7 está dividido em quatro áreas (Cooperação, Ideias, Pessoas e Capacidades), mais uma área exclusiva para pesquisa e desenvolvimento de energia nuclear. Para maiores detalhes sobre as pesquisas realizadas veja [25]. O objetivo do FP7 é tornar ou manter a Europa líder mundial nesses setores. Outro exemplo é o *Celtic* [26], que é um programa completamente dedicado a apresentar soluções para aplicações e serviços fim-a-fim em redes de telecomunicações. Ele é apoiado pelos maiores *players* da Europa em tecnologias de comunicação [26]. Estes e vários outros esforços visam fomentar o desenvolvimento de soluções para as redes de próxima geração NGN (*Next Generation Networks*), as redes de nova geração NwGN (*New Generation Networks*) e as redes de acesso a rádio RAN (*Radio Access Networks*).

Com relação à padronização pode-se citar o ACF (*Autonomic Communications Forum*) [27]. O ACF tem foco em criar a PPI (Primeira Padronização Internacional) para as comunicações autônomas. Oficialmente, a PPI foi introduzida em Paris (setembro de 2006) e a primeira reunião do ACF foi realizada em Bruxelas (Março 2007). A visão do AFC é definida como:

- Unificar os pensamentos para criar o primeiro padrão de comunicações autônomas. O foco é primeiro no sistema de gerência e depois na computação e comunicação usando mecanismos autônomos.
- Criar uma estrutura organizacional para capacitar as indústrias e as universidades visando trabalhar juntas no desenvolvimento e manutenção dos objetivos citados acima.

A seguir será apresentada uma lista de projetos que consideram as tecnologias autônômicas. O objetivo não é apresentar uma lista exaustiva de projetos, mas apenas os que foram considerados relevantes para realização deste trabalho.

2.1.1.1 Selfware

O projeto *Selfware* [15], é uma arquitetura baseada em auto-reparo e auto-otimização, com casos de usos em servidores de aplicações J2EE (*Java 2 Platform, Enterprise Edition*) e *message-oriented middleware* (JMS – *Java Message Service*). Nesse projeto, a arquitetura fractal é baseada em:

- Adicionar *softwares* legados em componentes fractais (chamados elementos gerenciáveis), dando uma representação uniforme a todos os elementos do sistema. Também possibilita a configuração durante o tempo de execução.
- Introduzir um *loop* de controle (Observação – decisão – reação) parecido com o proposto pela IBM, que suporta as propriedades autônomas implantadas nos componentes de gerência autônoma.

2.1.1.2 Selfman

O projeto *Selfman* [16], visa à construção de um sistema distribuído em larga escala pela combinação de *software* e redes sobrepostas. Os principais resultados do projeto são:

- Modelo de componentes Kompics, os quais podem ser vistos como personalidades assíncronas do modelo genérico fractal. Kompics devem ser usados para programar redes P2P (*Peer-to-Peer*) sobrepostas. Nessas redes, cada nó P2P é desenvolvido e gerenciado como um componente. O projeto desenvolveu várias linguagens e ferramentas para implantar e monitorar tais infra-estruturas.

2.1.1.3 Grid4All

O projeto *Grid4All* [17], é principalmente voltado para pequenos grupos, como escolas e pequenos negócios. O projeto visa à construção de redes usando recursos de computação pouco explorados na Internet. Isto implica na redução de investimentos em infraestrutura. Gerências de tais redes requerem funcionalidades para configurar e criar organizações virtuais, fazer a manutenção de membros e

alocação de recursos, monitorar, controlar aplicações e recursos. Os custos resultantes para a implementação e gerência de tais redes podem gerar várias aplicações simples e pequenas que seriam economicamente inviáveis [15]. Então, o projeto provê soluções autônomas para compensar o aumento de complexidade de gerência, às quais estão listadas a seguir:

- Serviço distribuído de gerência de componentes DCMS (*Distributed Component Management Service*). É um componente baseado no modelo fractal que provê uma API⁷ (*Application Programming Interface*) para aplicações auto-*
- O DCMS é implementado usando P2P auto-organizável e lida com falhas e saída de nós de forma autônoma.

2.1.1.4 ANA (Autonomic Network Architecture)

O projeto ANA [28], tem como objetivo explorar novas formas de organização e utilização das redes, além da tecnologia legada da Internet, para criação de uma nova arquitetura de rede totalmente autônoma. Protocolos da pilha TCP/IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*) estáticos deverão ser substituídos por funções combináveis e variáveis de redes. Os nós deverão ser agrupados em compartimentos, por exemplo, domínios com funções comuns, mecanismos, políticas, etc.

2.1.1.5 CASCADAS (Component-ware for Autonomic Situation-aware Communications, and Dynamically Adaptable Services)

O projeto *CASCADAS* [29], pesquisou novas abordagens para arquiteturas de serviços baseados em componentes auto similares (componente fractal), utilizando funções autônomas como auto-organização, auto-gerência e auto-

⁷ API – rotinas estabelecidas por um *software* para a utilização das suas funcionalidades por aplicativos que não querem envolver-se em detalhes da implementação, mas apenas usar seus serviços.

preservação. O principal objetivo do projeto é prover uma plataforma capaz de apoiar a implantação de novos conjuntos de serviços através do desenvolvimento de aplicações distribuídas, capazes de lidarem e adaptarem dinamicamente seus componentes conforme o ambiente em que se encontram e, com isso criar um modelo de referência de alto nível para a produção de uma nova geração de elementos de comunicação programáveis que podem ser reutilizados em diferentes ambientes de rede.

2.1.1.6 BIONETS (BIologically inspired NETwork and Services)

O projeto *BIONETS* [30], procura novas composições de serviços e abordagens do ciclo de vida de gerência de serviços utilizando princípios bio-inspirados para alcançar as operações autônomas. Essa abordagem bio-inspirada faz a analogia da rede com o sistema nervoso. O *BIONETS* procura entender as características e funcionalidades de cada componente do sistema e a relação que eles têm com o sistema como um todo. O foco é na causa e efeito entre as características estruturais e o comportamento do sistema.

2.1.1.7 HAGGLE

O projeto *HAGGLE* [31], tem como objetivo definir um *design* de arquitetura de rede inovador para disponibilizar comunicação na presença de conectividade intermitente de rede. Essa arquitetura inovadora proposta é totalmente *Clean-Slate*. *HAGGLE* explora comunicação autônoma e oportunista, em particular na ausência de infra-estrutura de comunicação fim-a-fim.

2.1.1.8 Winner

O projeto *Winner* [32], foi estruturado em três fases, nas quais as duas primeiras (*Winner* I e II) foram realizadas pelo FP6 e teve como objetivo validar a interface aérea nas tecnologias 4G (quarta geração de telefonia móvel). A terceira fase é parte do *Celtic*, sob o nome *Winner* +. Esta última fase teve como foco

tecnologias e inovações para sistemas além do IMT-2000⁸. O *Winner +* investigou funcionalidades SON em sistemas OFDMA (*Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*). Em particular desenvolveu técnicas de auto-otimização usando balanceamento de tráfego, técnicas de escalonamento e coordenação de interferências entre células. Essas técnicas de auto-otimização dos recursos de gestão de rádio RRM (*Radio Resource Management*) aumentam o desempenho da RAN.

2.1.1.9 Gandalf

O projeto *Gandalf* [33], tem investigado tarefas de gerência autônoma e RRM, com foco particular em duas funcionalidades SON:

- Auto-configuração do RRM, tendo como objetivo adaptar as variações de tráfego ou mudanças nas condições de operação. O projeto mostrou os benefícios da auto-configuração para alocação de recursos e em particular para balanceamento de carga e tráfego nas RANs.
- Tarefas de diagnósticos autônomos nas RANs. O projeto estudou o uso de redes *Bayesian*⁹ para aprendizagem autônoma de interferência e estatísticas. O projeto *Gandalf* testou e validou a abordagem de diagnóstico autônomo em UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) e WLAN (*Wireless Local Area Network*) e mostrou a importância desses aspectos para o operador da rede.

2.1.1.10 AutoI (Autonomic Internet)

O projeto *AutoI* [34], tem como objetivo criar uma arquitetura de

⁸ IMT-2000 é um padrão global para a terceira geração (3G) de comunicação sem fio, definido pela International Telecommunication Union.

⁹ A rede *Bayesian* é uma estrutura de dados usada para representar as dependências entre variáveis e fornecer uma especificação concisa de *qualquer* distribuição de probabilidade conjunta total.

comunicação com características autônomas, com o propósito de entregar serviços de forma garantida e rápida. Dado este objetivo, o *AutoI* foi desenvolvido usando metodologias bem definidas, uma infra-estrutura de *software* aberto e ferramentas para habilitar a composição de serviços de maneira eficiente com execução de forma adaptativa. Para esse fim, foi introduzida a virtualização dos recursos de rede e políticas de gerência que descrevem e controlam as lógicas internas dos serviços. Utiliza modelos de dados para facilitar a implantação de serviços de Internet em termos de redes programáveis, visando à criação de redes convergentes. Esses recursos devem suportar as seguintes características.

- Entrega de serviços em um ambiente com mudanças dinâmicas de serviços e contextos.
- Suporte a mudanças ou introdução de novos serviços.
- Mobilidade sem fronteiras em ambientes de recursos com múltiplos domínios.
- Mecanismos para unificação e separação de recursos virtuais em nível de gerência.
- Suportar funções auto-*
- Garantir segurança e entrega de serviços de forma rápida.

2.1.1.11 4WARD

O projeto *4WARD* [35], desenvolve uma arquitetura radical (*Clean Slate*), na qual um novo paradigma centrado em informação é usado para substituir a velha abordagem *host-centric*¹⁰. Habilita a existência de múltiplas redes em uma plataforma comum, através da virtualização de recursos da rede. O *4WARD* deverá melhorar a utilização das redes tornando-as auto-gerenciáveis. Essa solução irá abranger desde *backbones* em fibra até redes *wireless* e de sensores.

¹⁰ *Host-centric* – Arquitetura de rede desenvolvida para interconectar *hosts* através de roteamento de datagramas.

2.1.1.12 EFIPSANS

O projeto *EFIPSANS* [36], tem por objetivo explorar ou estender o protocolo IPv6 (*Internet Protocol version 6*) para suportar funcionalidades e serviços autônomos.

2.1.1.13 SOCRATES (Self-Optimization and self-ConfiguRATion in wireless networkS)

O projeto *SOCRATES* [37], focou especialmente em auto-organização, auto-configuração, auto-otimização e auto-reparo, no contexto principal das redes LTE (*Long Term Evolution*), adaptando os vários parâmetros de rádio para variações suaves ou abruptas na rede. Alguns desses parâmetros são: potência de transmissão, lista de células vizinhas, parâmetros de *handover*, etc.

2.2 Rádio Cognitivo

Nos últimos 40 anos, observou-se uma ampla evolução tecnológica, como por exemplo, o aumento da capacidade e velocidade de memórias e microprocessadores. Cada vez mais as tecnologias estão sendo beneficiadas pelos avanços nos processadores digitais de sinais DSP (*Digital Signal Processor*). Esta era digital promete trazer para as comunicações sem fio a mesma convergência já alcançada pelas redes com fio [38]. De acordo com Peter et al. [39], hoje em dia há 3 bilhões de dispositivos de comunicação sem fio, na sua maioria celulares e computadores móveis. Espera-se que esse número cresça para aproximadamente 100 bilhões até o ano de 2025.

O espectro eletromagnético é um recurso limitado e seu uso é definido pelas autoridades competentes de cada país, para diferentes atividades e tecnologias. No Brasil, o órgão regulamentador é a ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações). Cada tecnologia licenciada para utilizar o espectro deve somente operar nas frequências determinadas para a mesma. Uma parcela está alocada para serviços de segurança, emergência e aviação. Outra parte está alocada para serviços comerciais, como a telefonia móvel, distribuição de rádio e televisão. Ainda existe

um fragmento não licenciado deste espectro que pode ser usado por todos. Portanto, mesmo que a maior parte do espectro esteja reservada para determinadas tecnologias, ele não está em uso por inteiro. O que acontece hoje é que partes estão sobrecarregadas sofrendo com o excesso de tráfego e usuários. Enquanto, outras parcelas são utilizadas de forma ineficiente, com bandas praticamente não usadas e que poderiam ser utilizadas para melhorar a qualidade e capacidade dos serviços existentes. Isto pode ser um limitante na utilização de rádios nas redes de próximas gerações. Então, seu uso demanda inovação, maior eficiência e dinamismo. O RC (Rádio Cognitivo) [5] é um exemplo de tecnologia que apresenta grande potencial para atender os serviços de comunicação sem fio.

Porém, para entendermos o RC temos, primeiramente, que entender o funcionamento dos rádios atuais, chamados aqui de RT (Rádio Tradicional) e da proposta do RDS (Rádio Definido por *Software*). Além disto, o conhecimento do ciclo cognitivo se faz necessário, pois este apresenta algumas diferenças fundamentais quando comparado ao ciclo autônomo apresentado na Seção 2.1 deste trabalho. A Figura 2.2 ilustra a plataforma do RT.

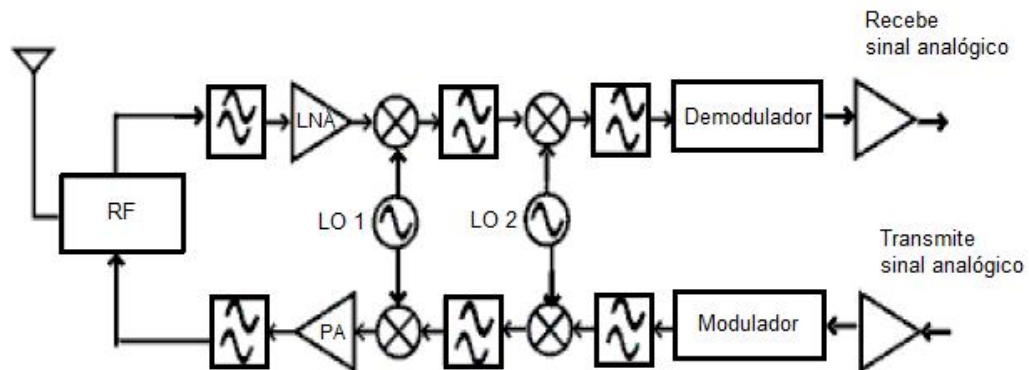


Figura 2.2. Plataforma do RT [38].

Conforme ilustrado na Figura 2.2, o funcionamento do RT é dado da seguinte maneira. Na primeira etapa, o sinal de RF (Rádio Frequência) recebido é filtrado e posteriormente amplificado pelo LNA (*Low Noise Amplifier*). Este sinal é então convertido para uma frequência mais baixa, denominada de banda base. Esta tarefa está sinalizada pelos osciladores LO1 e LO2. O sinal em banda base modulado é então demodulado. Funções recíprocas são realizadas no processo de transmissão.

Este modelo é muito utilizado em aplicações como transmissão de rádio e televisão. Porém, os departamentos de defesa dos EUA e Europa viram a necessidade de integração das várias interfaces aéreas existentes nos seus sistemas de comando. Para realizar tal tarefa, tornou-se necessário desenvolver rádios que interagissem simultaneamente com duas ou mais interfaces aéreas, nas várias faixas de frequências existentes; que pudessem ser modificados por uma simples troca de *software* sem a necessidade de maiores ajustes no *hardware* [40]. Em 1992, Joseph Mitola III [5], apresentou o conceito de rádio definido por *software*. O RDS é um rádio onde parte do processamento do sinal é definido por *software* ao invés dos tradicionais *hardwares* que são utilizados pelo RT. Portanto, o RDS traz os rádios que conhecemos atualmente para uma era digital. O que deve disponibilizar um maior grau de liberdade para desenvolvimento de sistemas de comunicação sem fio. A Figura 2.3 ilustra a plataforma do RDS.

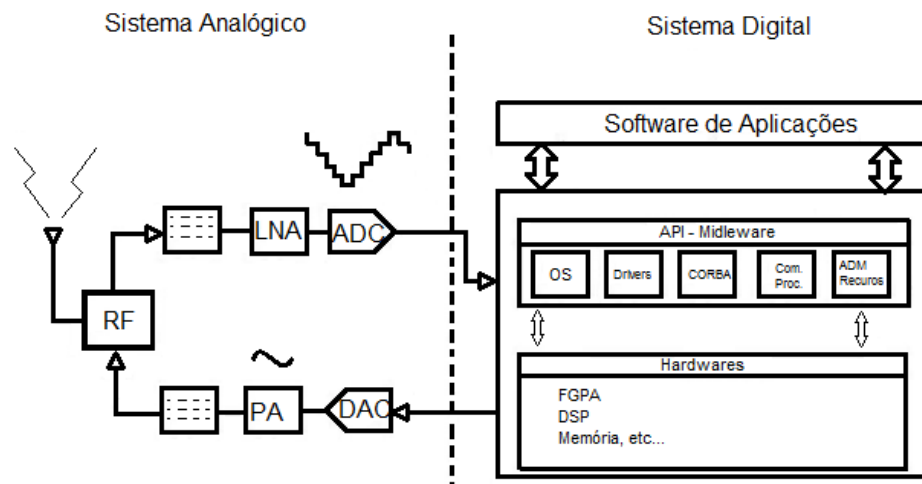


Figura 2.3. Plataforma RDS [38].

Na Figura 2.3 percebem-se duas etapas: uma analógica e outra digital. As funções analógicas são restritas de tal forma que não podem ser executadas em uma plataforma digital. Esta etapa é formada por antena, amplificador PA (*Power Amplifier*), conversores ADC/DAC (*Analog to Digital Converter/Digital to Analog Converter*). O subsistema analógico recebe um sinal de RF da antena e o encaminha ao LNA, que o regenera. Depois, faz a conversão ADC levando o sinal para uma frequência intermediária sendo processado pelo subsistema digital. Na transmissão, o

sinal recebido da etapa digital é convertido para analógico pelo DAC e posteriormente amplificado e transmitido. A separação das portadoras e a conversão para banda base são executadas pelos recursos digitais na fase de recepção. Da mesma forma, a codificação de canal e a modulação são realizadas pelos processadores digitais na etapa de transmissão. Este subsistema digital apresenta uma completa abstração do *hardware* que está estruturada em três camadas:

- *Hardware* – DSP, FPGA (*Field Programmable Gate Array*), memórias, microprocessadores, etc.
- *Middleware* – conjunto de API, composta pelo sistema operacional, *drivers*, comunicação entre processos, administração dos recursos, etc.
- *Software* de aplicação – é a camada que vai comunicar-se com a API, favorecendo o desenvolvimento de algoritmos complexos, sem preocupação com o *hardware*.

Partindo proposta do RDS, Joseph Mitola III, em 1999 apresenta o rádio cognitivo [5]. O RC pode ser definido como um rádio onde a camada física é definida por *software*. Os parâmetros usados para a configuração são dinamicamente configurados por *software* de acordo com as necessidades dos usuários e condições do ambiente. A filosofia RDS é a base do chamado rádio cognitivo. O RC estende o RDS para um dispositivo capaz de sensoriar, aprender e reagir ao ambiente em que se encontra de forma automática ou autonômica.

Para uma melhor compreensão do RC, se faz necessário entender o ciclo cognitivo apresentado na Figura 2.4. Este, embora parecido com o ciclo autônomo apresentado na Seção 2.1, tem algumas diferenças essenciais. Pode analisar essas diferenças através da computação, em que também existem essas duas classificações. Segundo Wang et al. [41], computação autônoma é definida como uma tecnologia orientada a metas e guiada por decisões próprias que não se apóiam em informações instrutivas ou processuais, enquanto que computação cognitiva é definida como uma tecnologia mais inteligente além da computação autônoma e imperativa, a qual abrange funcionalidades tipicamente encontradas nos processos mentais de inteligência do cérebro, tais como, pensar, deduzir, aprender e sentir. O termo autônomo remete a ausência de controle externo e restrição, enquanto o termo

cognição remete ao resultado psicológico da percepção, aprendizagem e argumentação [42]. Portanto, pode-se concluir que existe uma diferença entre esses dois termos que não devem ser vistos como fatores exclusivos, mas sim como complementares.

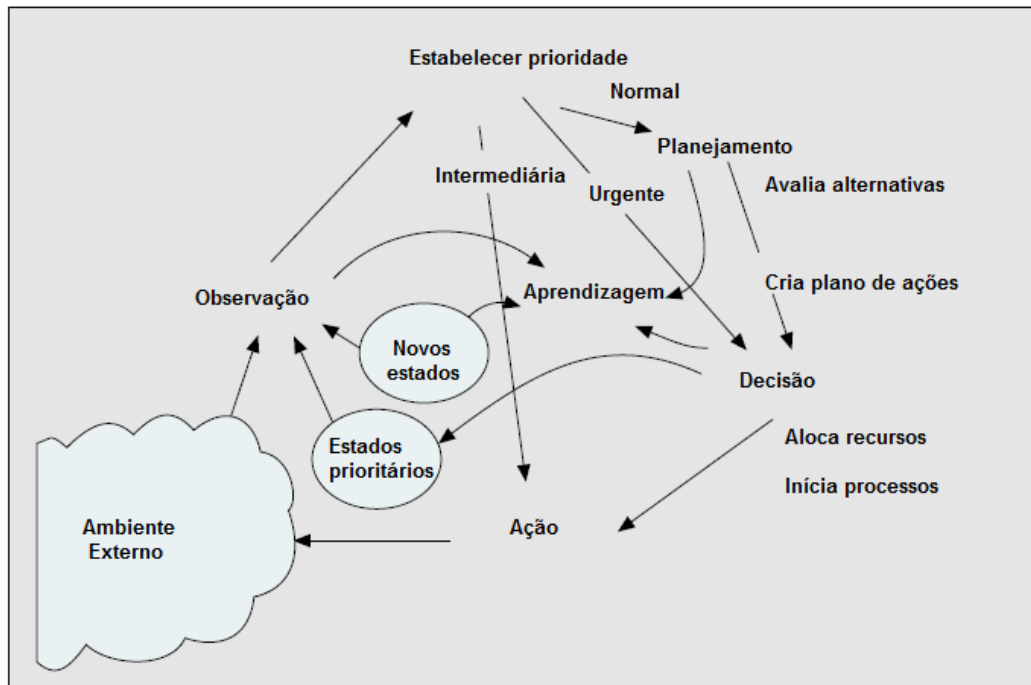


Figura 2.4. Ciclo Cognitivo. Adaptado de [5].

Na Figura 2.4, percebe-se o ciclo cognitivo suportado pelo RC. Neste contexto, o mundo externo provê estímulos. O RC analisa estes estímulos com intuito de extrair as informações pertinentes à realização das tarefas a qual está designado. Por exemplo, ele pode analisar as coordenadas do GPS (*Global Positioning System*), mais a temperatura e a luminosidade para determinar se está em um ambiente interno ou externo. Este tipo de processamento ocorre na fase de observação do ciclo cognitivo. Informações oriundas dos usuários e do rádio também devem ser analisadas para determinar a prioridade das tarefas e da comunicação. Esta tarefa é realizada na fase de estabelecimento de prioridade. Assim, o RC será capaz de agir imediatamente quando for detectada uma tarefa de extrema importância. Por exemplo, considere um dispositivo móvel com a bateria no final de sua carga, ele

pode imediatamente salvar todas as informações e ordenar que desligue o sistema. Outra possibilidade é a perda de todas as conexões, onde a fase urgente pode ser acionada, para assim que possível restabelecer a conexão. Ou ainda, em outros eventos de menor prioridade, resultar no ciclo de observar, planejar, decidir e agir parecido com o apresentado na Seção 2.1 para o ciclo autônomo. O ciclo cognitivo também propõe formas de aprendizagem supervisionadas ou não, de acordo com a sua percepção do ambiente.

Ainda, a proposta de Mitola para o RC tem como finalidade possibilitar o compartilhamento do espectro. Portanto, o RC deve trabalhar constantemente à procura de oportunidades ou “buracos” no espectro (“*spectrum holes*”) para realizar suas transmissões. A ideia é que o RC trabalhe em um ambiente de oportunismo e cooperação, onde o mesmo espectro de frequência seja usado por mais de um rádio, sendo um primário e os outros secundários. Vale ressaltar que nesse cenário o primário sempre terá prioridade na utilização do espectro. Então, caso um rádio (secundário) esteja usufruindo do espectro de outro (primário), ele deve liberar a faixa de frequência assim que o sistema primário desejar utilizá-la. Portanto, o rádio deve ter a capacidade de sensoriar o ambiente (sensoriamento do espectro), analisar essas informações e adaptar-se às condições do ambiente conforme demonstrado no ciclo cognitivo. Uma vez realizada essas tarefas e encontrado um espaço não utilizado, ele deve tomar a decisão de usar ou não esse espaço. A seguir algumas das propostas de funcionalidade que o RC deve possuir [43]:

- Sensoriamento do Espectro – o RC deve ser capaz de sensoriar o espectro e detectar oportunidades nas faixas de frequências que não estão em uso pelos usuários licenciados. A utilização dessas frequências não deve apresentar interferência com os outros rádios.
- Localização – estar ciente e agir de forma adaptativa ao ambiente em que se encontra. Portanto, ser capaz de determinar sua localização e as de outros dispositivos transmissores e ainda selecionar os parâmetros de operação apropriados de acordo com essas informações.
- Seleção Dinâmica de Frequência – um rádio cognitivo deve ser capaz de mudar sua frequência de operação, baseado nas informações recolhidas no sensoriamento do espectro. A decisão quanto às

mudanças pode utilizar as informações coletadas pelo sensoriamento do espectro, monitoramento da posição geográfica, entre outros fatores.

- Comunicação Adaptativa – técnicas de comunicação adaptativa podem modificar características e formas de onda para melhorar o acesso ao espectro e minimizar interferências com outros usuários não licenciados ou licenciados. Um rádio cognitivo pode também selecionar um tipo de modulação para permitir interoperabilidade entre sistemas diferentes.
- Controle de Potência de Transmissão: Controlar a potência de transmissão dinamicamente para permitir um dispositivo utilizar os limites máximos apenas quando necessário, em geral reduzindo a potência, para não interferir nas comunicações de outros dispositivos presentes no meio.

De acordo com [44], os RCs devem ser desenvolvidos não apenas para melhorar o desempenho da camada física da rede (reduzir interferência entre os rádios, melhorar a taxa de transmissão), mas também das camadas superiores, por exemplo, melhorar a QoS (*Quality of Service*), rotear de forma ótima. Portanto, o RC deve estar ciente do ambiente em que se encontra, assim como dos aspectos que o rege. Ao analisar as características do RC percebe-se que haverá uma disputa de interesse entre cooperação e competição muito similar ao que acontece com os grupos de espécies na savana africana. Eles precisam cooperar para alcançar o objetivo, mas existe competição para tirar proveito do resultado. A etiqueta social é que mantém o equilíbrio. Existe uma relação com a famosa teoria dos jogos de John Nash. A teoria dos jogos é amplamente utilizada no compartilhamento de espectro entre RCs. Haykin [45] analisou uma Rede de Rádios Cognitivos (RRC) como um jogo em 2005. Mais recentemente, ele sugeriu uma abordagem de gerência descentralizada e dinâmica, baseada em mecanismos auto-organizáveis e bio-inspirados [46]. Outras propostas de compartilhamento de espectro são baseadas em técnicas de otimização, processos estocásticos e teoria da informação.

2.2.1 Projetos de plataformas de rádio

Por serem tecnologias recentes, tanto o RDS quanto o RC ainda são alvos de muita pesquisa. A seguir, são apresentados alguns projetos que estão nessa linha de pesquisa. Mais uma vez, não se trata de mostrar uma lista exaustiva de projetos, apenas os que foram considerados mais relevantes para o desenvolvimento do trabalho.

2.2.1.1 E³ (End to End Efficiency)

No âmbito do projeto E³ foi desenvolvida uma plataforma que leva em consideração os rádios cognitivos, redes auto-organizáveis e sistemas reconfiguráveis. O principal objetivo foi projetar, desenvolver protótipos e soluções para o uso otimizado dos recursos de acesso sem fio existentes e futuros. Em particular, visa a utilização mais flexível do espectro de rádio frequência, terminais, estações rádio base e da rede.

A proposta do E³ é que o processamento das informações nas camadas mais altas (camadas acima da camada de enlace no modelo OSI) seja realizado pelo GPP (*General Purpose Processor*). Por outro lado, o processamento da informação em banda base é realizado através de FPGAs ou DSPs. A troca de informações entre as camadas superiores e a física (banda base) é realizada pela interface PCIe (*Peripheral Component Interconnect Express*) (FPGA) ou via interface IP (DSP). A Figura 2.5 ilustra a proposta da plataforma do projeto E³.

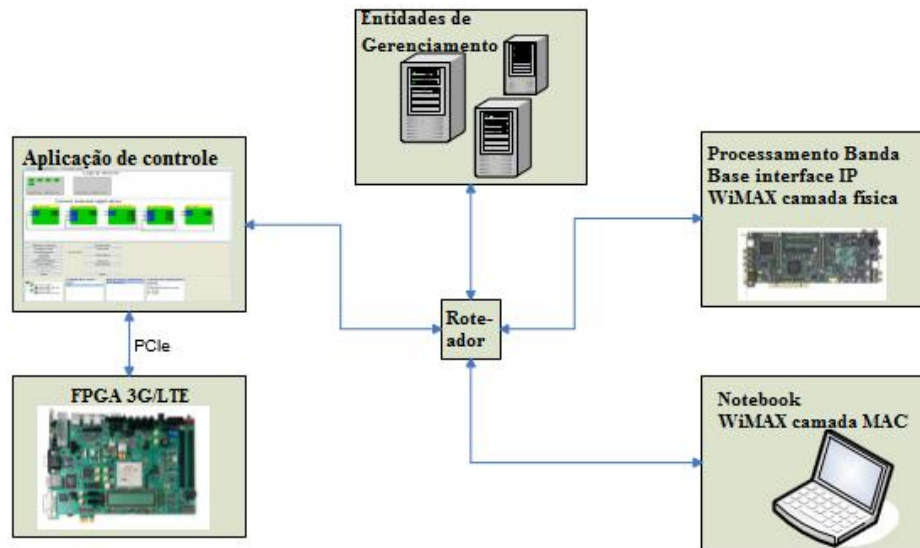


Figura 2.5. Visão geral de plataforma do E³. Adaptado de [47].

A plataforma inclui as Entidades de Gerenciamento, que fazem o processamento das informações das camadas superiores. Além disso, decidem sobre a configuração e reconfiguração dos recursos físicos de acordo com a necessidade do sistema. As Entidades de Gerenciamento são conectadas ao roteador onde transmitirão as informações a uma Aplicação de Controle da plataforma. Esta por sua vez, deve traduzir as decisões provenientes das Entidades de Gerenciamento e despachar para que os respectivos recursos físicos possam ser reconfigurados. Nesse cenário, a troca de informação entre a Aplicação de Controle e o FPGA é feito via barramento PCIe, enquanto que para o DSP é feito via UDP. O FPGA implanta as camadas MAC e física do LTE, e o DSP a camada física do WiMAX. O *notebook* nesta plataforma tem duas funções, sendo que a primeira é adaptar as informações da Aplicação de Controle para a lógica do DSP e a segunda, é implantar a camada MAC do WiMAX.

As Entidades de Gerenciamento podem ser de dois tipos. A primeira é a operação autônoma de entidades AEM (*Autonomic Entity Management*) ou de auto-organização DSNPM (*Dynamic Self-Organizing Network Planning and Management*). Elas constituem o núcleo da plataforma de experimentação da proposta E³. O AEM mantém informações atualizadas sobre as capacidades e estado dos dispositivos, bem como o seu perfil de uso e preferências dos usuários. Também monitora o ambiente de rádio e de rede ao seu redor e as aplicações em uso pelo

usuário. Todas essas informações alimentam um algoritmo autônomo que decide o modo de reconfigurar os terminais da rede para que os objetivos como qualidade e custo sejam atendidos. O objetivo é otimizar a operação do rádio. A entidade DSNPM é responsável por gerenciar os recursos de rádio da rede de acordo com políticas de uso pré-estabelecidas. Também é capaz de apreender sozinha com experiências prévias e estabelecer novas políticas para os terminais da rede.

O projeto também provê formas de sensoriamento cooperativo de espectro que é realizado pelo Controle Cognitivo do Rádio CCR (*Cognitive Control Radio*). O CCR contém funções de compartilhamento de esforço de sensoriamento, requisição para sensoriamento de espectro e coordenação dos períodos de silêncio no sensoriamento. Além de o CCR coordenar o sensoriamento cooperativo de espectro ele também é responsável pela troca de informação entre os dispositivos da rede, onde pode ser obtido mensagens de negociação, regulação e ciência do ambiente em que o rádio se encontra. Já para o acesso ao meio o E³ propõe dois algoritmos um deles é o JPRC (*Joint Power Rate and Channel*) e o outro é o C3MAC (*Cognitive Cooperative Control Medium Access Control*), apresentados na subseção 3.2.1.4

As entidades implantadas no GPP são representadas por um sistema com múltiplos agentes baseado em JADE (*JAVA Agent DEvelopment framework*) [48], de modo que cada entidade deve estar relacionada a um agente específico, para que possa interagir com as outras entidades. Esse agente define uma interface de alto nível que permite a mediação de cada entidade com o resto da plataforma. Os agentes proveem uma representação virtual das entidades da plataforma, abstraindo-as e traduzindo comandos de outras entidades para a entidade representada.

O ambiente da plataforma de experimentação do projeto E³ segue o paradigma orientado a serviços, onde cada entidade do ambiente pode oferecer vários serviços, bem como utilizar serviços providos por outras entidades. As entidades divulgam seus serviços e descobrem serviços disponíveis através de um diretório de serviços. Tanto o processo de orquestração de serviços, quanto o de operação conjunta é baseado na troca assíncrona de mensagens via JADE. Os agentes JADE são nomeados e se comunicam utilizando HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*), IIOP (*Internet Inter ORB Protocol*).

2.2.1.2 GNU Radio

O GNU Radio [49] é um projeto aberto de rádio definido por *software* que foi iniciado em 2001. O objetivo do projeto é desenvolver um ambiente em *software* que permita a implantação de rádios digitais. Os blocos necessários para implantar os sistemas de transmissão e recepção são desenvolvidos em *software*. Estes blocos podem ser conectados de forma flexível, além de permitir que novos blocos sejam criados e colocados em funcionamento enquanto o rádio está em operação. As aplicações de GNU Radio são desenvolvidas utilizando a linguagem de programação *Python*, enquanto o processamento de sinais, mais críticos em relação ao desempenho, é implantado na linguagem C++, que é mais rápida e eficiente. A integração entre as linguagens C++ e *Python* é feita utilizando a ferramenta SWIG (*Simplified Wrapper and Interface Generator*). Desta forma, é possível implantar sistemas de rádio de alta capacidade e desempenho que utilizam a eficiência e rapidez da linguagem C++, com a simplicidade de um ambiente de desenvolvimento de aplicações com a linguagem *Python* [50].

O projeto GNU Radio utiliza uma plataforma mínima de *hardware* necessária para implantar o *front end* de rádio frequência. Essa plataforma é chamada de USRP e foi desenvolvida pelo Ettus. Todo processamento do sinal é realizado em *software*, enquanto que o *hardware* é utilizado como interface de entrada e saída dos sinais de RF. Basicamente, o USRP é uma placa de circuito integrado que incorpora conversores ADC e DAC, transceptor de RF, um FPGA que faz o pré-processamento dos sinais para transmissão e recepção, e uma interface USB (*Universal Serial Bus*). Essa interface permite a troca de informação do USRP com o GPP que executa o GNU Radio sobre um sistema operacional de um computador convencional. O fato do GPP executar todas as funcionalidades necessárias para a transmissão e recepção resulta em uma limitação de vazão do rádio implantado com esta tecnologia. Porém, mesmo com este limitante o USRP é um dispositivo que pode ser empregado para provas de conceitos utilizando rádio definido por *software*. Uma nova versão desta placa já foi lançada, e se chama USRP2 [49]. O USRP2 contém algumas melhorias em relação ao USRP tais como, cartão SD usado para gravar imagem e *firmware* do FPGA e interface *Gigabit Ethernet* para comunicação com o GPP. O Anexo A mostra uma comparação entre essas plataformas.

O USRP e USRP2 não são apenas compatíveis com o GNU Radio podendo ser utilizados por outras plataformas.

A Figura 2.6 esquematiza o funcionamento do GNU Radio, seus componentes e suas diferentes linguagens, quando utilizado com dispositivos USRP2.

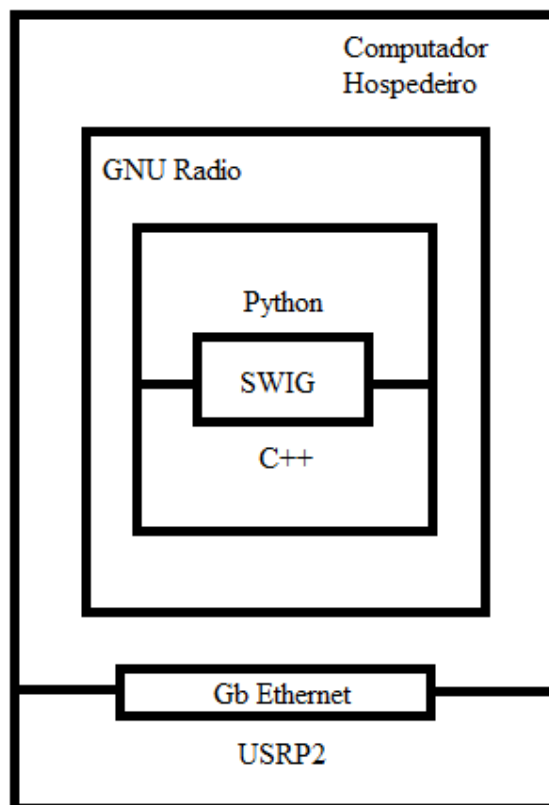


Figura 2.6. **Plataforma GNU Radio.**

Várias iniciativas utilizaram o GNU Radio para implementações de sensoriamento de espectro para os rádios oportunistas. No âmbito acadêmico utilizaram o GNU Radio para implantar algoritmos de sensoriamento de espectro tais como, detecção de energia, detecção por filtros casados, dentre outros [51] e [52].

Outra característica do projeto GNU Radio é que como ele é um pacote de *software* para instalar e executar em um sistema operacional qualquer. Ele pode ser instalado em uma máquina virtual e executar virtualizado dentro de um GPP. Portanto, em um ambiente de virtualização em tempo real pode ter várias instâncias

do GNU Radio executando em paralelo sobre um mesmo GPP. Tema esse que será abordado na Seção 2.3 deste trabalho.

2.2.1.3 SORA (*Software Radio*)

SORA [53] é uma plataforma de rádio definido por *software* que teve origem no WNG (*Wireless and Networking Group*) da Microsoft na Ásia. O projeto teve como objetivo fornecer uma plataforma de rádio definido por *software* que permita a implantação dos atuais padrões de comunicação digital móvel. No projeto SORA, todo processamento digital de sinais é realizado por *software* no sistema operacional Windows™. O *software* do SORA é todo baseado em linguagem C e pode ser adquirido pelo site do projeto. Esta plataforma desenvolveu também uma placa aceleradora, denominada de RCB (*Radio Control Board*), que é responsável por realizar a conexão entre os transceptores de rádio e o GPP. O RCB foi desenvolvido para solucionar o problema dos rádios definidos por *software* que é a baixa taxa de transmissão entre o GPP e os transceptores de rádio, problema esse que acontece, por exemplo, com o GNU Radio. O RCB consegue transmitir com altas taxas de dados (16.7 Gbps) e com baixa latência. Outra inovação do projeto SORA é um novo serviço do kernel do sistema operacional, chamado *core dedication*, ou dedicação de núcleos, que aloca núcleos de processadores exclusivamente para a execução de tarefas críticas. A plataforma SORA é compatível com dois *hardwares* distintos para implantação dos transceptores. Um deles é o USRP, também empregado pelo GNU Radio. Já a segunda opção é o WARP (*Wireless open-Access Research Platform*) [54]. A Figura 2.7 ilustra a plataforma SORA.

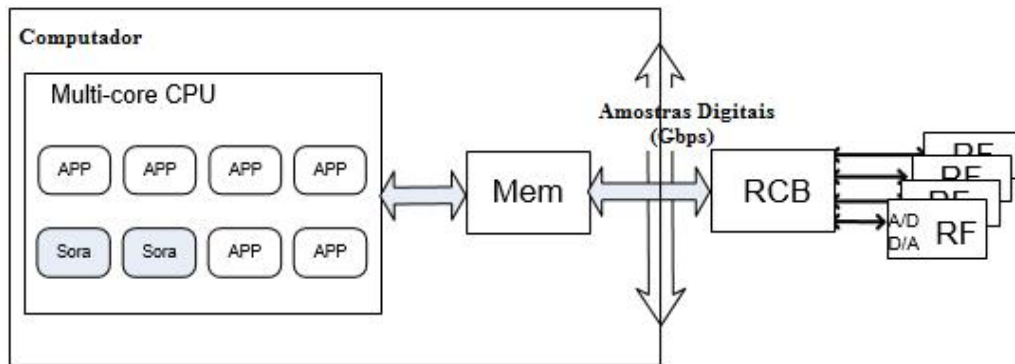


Figura 2.7. RCB (*Radio Control Board*). Adaptado de [53].

O projeto desenvolveu também um analisador de espectro nos padrões IEEE 802.11 a/b/g, capaz de mostrar graficamente todas as informações da camada física.

Outra característica do projeto SORA é que ele é análogo ao GNU Radio, ou seja, é um pacote de *software* para instalar e rodar em um sistema operacional, nesse caso, somente o Windows™. Então, ele pode ser instalado em uma máquina virtual e executar virtualizado dentro do GPP. Portanto, em um ambiente de virtualização em tempo real pode ter várias instâncias do SORA rodando em paralelo sobre um mesmo GPP.

2.2.1.4 WiNC2R

O *WiNC2R* (*WINLAB Network Centric Cognitive Radio*) [55] foi desenvolvido na universidade *Rutgers* pelo *WinLab* com objetivo de prover um protótipo de plataforma para rádio cognitivo capaz de transmitir entre 10 e 50 Mbps. O projeto iniciou em 2004 e teve seu protótipo pronto em 2007. A arquitetura desenvolvida está dividida em dois módulos, sendo um módulo de rede e outro de modem. O módulo de rede contém as funções e protocolos de rede e é implementado em um FPGA conectado a um computador. O módulo do modem realiza todo o processamento das informações em banda base da camada física, assim como controlar o módulo de RF como, por exemplo, potência e fluxo das informações (transmitir/receber). Esse controle é enviado através da interface SPI (*Serial Peripheral Interface*). Para comunicação externa existem interfaces USB, Ethernet e

serial RS232. A comunicação entre a camada física e a MAC e as outras camadas superiores é feita através de um barramento LVDS (*Low Voltage Differential Signaling*). Os módulos de rede e modem são desenvolvidos separados e podem ser interligados conforme ilustra a Figura 2.8.

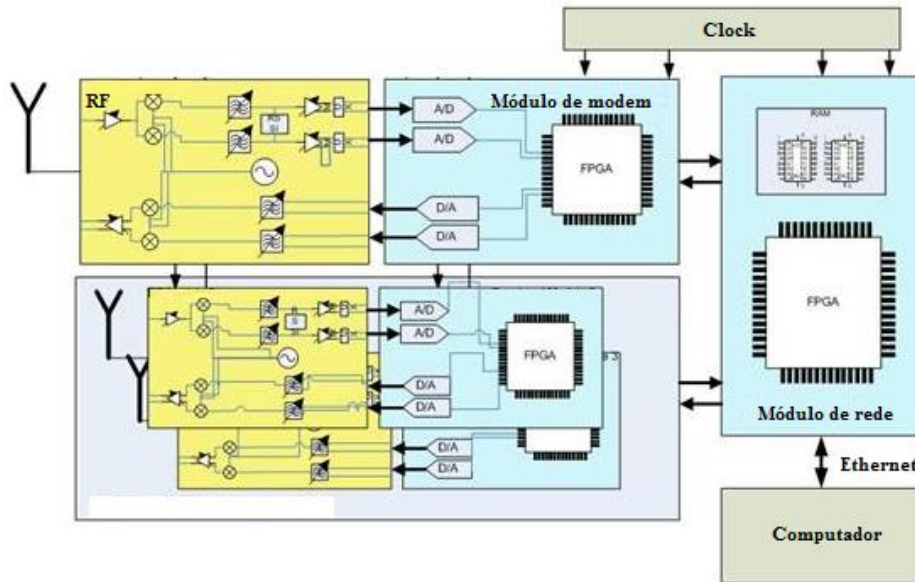


Figura 2.8. Plataforma proposta pelo WiNC2R. Adaptado de [55].

A arquitetura é baseada no reconhecimento da característica de carga de processamento dos protocolos das múltiplas camadas da comunicação sem fio. Essa abordagem é bastante diferente das aplicações de computação embarcada ou das aplicações de computação de propósito geral. Por exemplo, o fluxo do processamento é baseado em eventos, em vez de incrementos de um contador de programa. Os eventos que direcionam o fluxo de processamento são baseados em tempo ou dados e, os dois são gerados pelo ambiente ou como resultado de processos internos. Dada essa diferença em relação às aplicações tradicionais foi desenvolvida uma arquitetura para abordar tanto os requisitos funcionais quanto as características de carga de trabalho das aplicações dos rádios oportunistas e programáveis. A arquitetura WiNC2R endereça essas características de carga de trabalho dos protocolos sem fio com mecanismos de controle programáveis que integram de forma uniforme os módulos de *hardware* e *software* para satisfazer os requisitos funcionais e de desempenho. Isto é feito através do VFP (*Virtual Flow Pipeline*)

[56]. Os aspectos principais do VFP são:

- estrutura de controle no nível de sistema implantada em *hardware* para suportar os requisitos do fluxo de processamento dos protocolos, ou seja, garantir desempenho, sequência, sincronismo e comunicação.
- o conjunto das unidades funcionais será constituído de módulos genéricos de *hardware* e processadores programáveis de *software*. Esses dois são controlados pelo VFP.
- troca rápida de funções, baseada nos pacotes independente de ser feita por *hardware* ou *software*.
- unidades de processamento central baseado em *hardware* irão permitir rápidas mudanças de contexto, assim, evitando a necessidade de um sistema operacional embarcado.

Uma solução baseada somente em *hardware* sofre da falta de flexibilidade para mudanças futuras, ou seja, dificulta a evolução. Além disso, carece de generalização para acomodar múltiplos protocolos. Já o VFP acomoda esses requisitos sem deteriorar o desempenho.

O fluxo virtual de informações atravessa um conjunto de funções, cujos requisitos de programação são associados com uma entidade de protocolos de alto nível (aplicação, sessão, IP ou MAC). No VFP a sequência de operação é organizada por uma estrutura de dados de controle de fluxo que especifica para cada função concluída, a próxima função que deve ser executada. A real sequência é definida durante o tempo de execução, para cada pacote de processamento, baseado no resultado do processamento de cada unidade funcional. A potencial sequência é definida durante o tempo de provisionamento do fluxo, porém a sequência real deve ser terminada no tempo de execução. No VFP existe um mecanismo de sincronismo que assegura que uma unidade não inicie sua operação até que todas as outras do fluxo tenham completado seus processamentos. Dado isso o projeto teve como objetivo prover uma plataforma de alto desempenho para experimentação de vários protocolos adaptativos de rede sem fio.

Outro ponto interessante do projeto foi o desenvolvimento do CSCC (*Common Spectrum Coordination Channel*). O CSCC é um canal de banda estreita, que utiliza frequências não licenciadas do espectro (900MHz, 2,4 ou 5GHz),

compartilhado por todos os usuários com a finalidade de gerenciar o acesso ao espectro de rádio frequência. Cada dispositivo tem um rádio extra de banda estreita, baixa taxa de transmissão de dados e baixo custo, para trocar informações através desse canal. O protocolo CSCC é uma mensagem padronizada que inclui informações a respeito da condição de utilização do espectro de cada usuário. Quando diferentes dispositivos desejam usar o espectro, eles devem transmitir através do CSCC as informações da utilização do espectro (Identificação do usuário, endereço MAC, frequência utilizada, potência de transmissão, tipo da tecnologia, tipo do serviço, lista dos rádios vizinhos, etc.). Todas as transmissões do CSCC são feitas sob demanda, ou seja, somente os dispositivos que querem acessar o espectro ou aqueles que já estão utilizando vão anunciar as suas respectivas condições de utilização. Outros dispositivos deverão permanecer em silêncio para escutar as informações do CSCC. As observações desses anúncios permitem que novos usuários obtenham um mapa completo das atividades e oportunidades do espectro de rádio frequência onde eles se encontram. Além disso, o CSCC foi utilizado para prover algumas funcionalidades de auto-organização, principalmente no que diz respeito à auto-otimização, onde as informações provenientes do CSCC foram utilizadas para ajustar os parâmetros de transmissão de cada rádio para os níveis ótimos.

2.2.1.5 CREW

O projeto CREW [57], também financiado pelo programa FP7, visa criar uma plataforma de testes aberta a partir da federação de recursos de várias redes de teste europeias. Embora o escopo do projeto seja a experimentação no âmbito dos rádios cognitivos, vários experimentos satélites ao projeto avançam em outras áreas das redes sem fio futuras: exposição e orquestração dinâmica de recursos de rádio, reconfiguração de *hardware* e funcionalidades do rádio a distância, sensoriamento colaborativo, virtualização de componentes, avaliação comparativa de desempenho, metodologias para coleta e armazenamento de dados, linguagens para descrição de experimentos, propriedades auto-*, etc.

A proposta conta com 5 redes de teste sem fio espelhadas em vários países da Europa:

- w-iLab.t – Possui uma rede sem fio em malha (padrão IEEE 802.11) que pode ser usada em conjunto com uma rede de nós sensores (padrão IEEE 802.15.4), especialmente para testes de interferência. O *software* e o *firmware* dos nós podem ser reconfigurados à distância via servidores de gerência. Os nós de sensoriamento do tipo *TMote Sky* [58] e RM090 [59] são conectados via USB a um emulador de ambiente de propagação de sinais EE (*Environment Emulator*) implantado em *hardware*. Além desse emulador, os sinais seguem ainda via USB até um PC e depois via Ethernet até servidores de gerência de experimentação. Os nós Wi-Fi são conectados ao mesmo PC através de uma interface mini-PCI. A rede de teste também possui rádios USRP2, WARP e dispositivos para sensoriamento espectral.
- TWIST (*Wireless Indoor Sensor Network Testbed*) – Possui uma rede de sensores conectados a vários super nós através de cabos USB. Esses super nós enviam as informações coletadas a um servidor via Ethernet. Os super nós também atuam na reprogramação, configuração e monitoramento de logs dos nós sensores. Essa solução permite o controle ativo do fornecimento de energia aos nós sensores. São utilizados também nós de sensoriamento e análise espectral *Wi-Spy* [60] e um robô *iRobot Roomba* para experimentos com mobilidade de terminal.
- IRIS (*Implementing Radio in Software*) – Trata-se de uma plataforma de SDR com *software* escrito em linguagem de programação C++. O objetivo é realizar experimentos de uso dinâmico do espectro de radiofrequência. A plataforma é baseada em computadores de uso geral (*quad core*) com um rádio USRP2 em cada. A solução disponibiliza um repositório de componentes de rádio reusáveis que podem ser combinados via scripts em linguagem XML (*eXtensible Markup Language*). A plataforma pode ser reconfigurada *on the fly*. Uma rede de teste com 14 nós é disponibilizada para experimentos a distância. A fonte de alimentação dos nós pode ser acessada a distância, permitindo ligar e desligar os nós.

- LTE/LTE *advanced* (*Long Term Evolution*) – Possui dois ambientes (*indoor* e *outdoor*) disponíveis para experimentos de co-existência de rádio cognitivo com operadores primários LTE.
- Log-a-Tec – Rede de teste voltada para experimentos outdoor em redes cognitivas nas bandas de TV e ISM (*Industrial, Scientific, and Medical*). A rede é equipada com 50 nós VESNA para sensoriamento espectral *standalone* ou distribuído. A plataforma VESNA suporta diversos protocolos para redes de sensores sem fio, bem como Wi-Fi e Ethernet. A solução suporta experimentos de detecção de interferências em transmissões baseada em sensoriamento espectral.

O projeto CREW cria os mecanismos para que experimentos individuais ou colaborativos sejam executados à distância. Existem trabalhos que investigam: (i) o uso oportunístico do espectro de radiofrequência, em especial nas bandas ISM e de TV; (ii) a inicialização de terminais cognitivos; (iii) a coordenação de redes de rádio diversas e nós secundários cognitivos; (iv) a co-existência de sistemas oportunísticos com sistemas tradicionais, como por exemplo de microfone sem fio e câmeras de vigilância; (v) implantações flexíveis e adaptáveis para a funcionalidade de múltiplo acesso ao espectro de frequências (usando IRIS e sensoriamento espectral); (vi) o sensoriamento espectral colaborativo; (vii) a troca de ponto de acesso de terminais; (viii) a utilização de robôs (*iRobot Roomba*) para a elaboração de mapas de uso do espectro eletromagnético; (ix) consumo de energia em nós sensores.

2.2.1.6 Self-Net

O projeto Self-NET (*Self-Management of Cognitive Future Internet Elements*) [61] é mais um projeto financiado pelo FP7. O projeto foca na convergência das pesquisas em Internet do Futuro, rádio definido por *software* (e cognitivo) e auto-gerência autônômica. O objetivo é desenvolver uma arquitetura baseada em comportamentos cognitivos com um alto grau de autonomia dos elementos de rede. Elementos de rede são gerenciados por gerentes cognitivos de elementos NECM (*Network Element Cognitive Manager*). Esses por sua vez são gerenciados por gerentes cognitivos de domínios NDCM (*Network Domain Cognitive Manager*). Ambos baseiam-se em um ciclo de decisão chamado de MDE

(*Monitoring, Decision making, and Execution*). Empregam portanto uma hierarquia desses ciclos de decisão. A proposta é que os sistemas aprendam com a tentativa e erro, criando uma rede de conhecimento, melhorando a ciência do ambiente em que estão inseridos e dos seus próprios estados operacionais. Dados brutos são coletados, filtrados e correlacionados (usando lógica *fuzzy*) para produzir informações contextualizadas, alimentando a base de conhecimento dos gerentes, que é formada por ontologias e políticas de operação dos elementos de rede. A tomada de decisão é feita considerando o estado do ambiente, de si próprio e da base de conhecimento.

Os elementos da rede podem ser tecnologias já consolidadas, como por exemplo WiMAX, Wi-Fi e LTE, ou de tecnologias emergentes, como as baseadas na composição dinâmica de protocolos DPC (*Dynamic Protocol Composition*). Eles podem possuir recursos computacionais para executar internamente seu próprio gerente cognitivo ou não (o gerente é executado em servidores a parte). O projeto demonstra a execução de NECMs junto a um *access point Wi-Fi net5501* fabricado pela empresa *Soekris Engineering*. Nesse caso, o gerente cognitivo é executado sobre Linux e parte do protocolo Wi-Fi é implantado em *software*. De fato, o projeto utiliza uma ampla gama de equipamentos, dentre eles estações rádio base e de assinante WiMAX do fabricante *Redline*, placas de rede Ethernet D-Link, placas de rede Wi-Fi TP-Link, *switches* Ethernet.

A estrutura interna dos NECMs e dos NDCMs é bastante semelhante. Ela é composta de um serviço de topologia, que permite que os gerentes cognitivos descubram a topologia física da rede, bem como iniciem contato uns com os outros através de mensagens de “*hello*” transportadas por um serviço de comunicação. Possui também um serviço de descoberta, que permite que os gerentes cognitivos cooperem e coordenem ações em conjunto. Para interoperar com elementos de rede de tecnologias já consolidadas, os gerentes autônomos de elementos possuem um componente chamado NEC (*Network Element Controller*). Ele implanta o monitoramento de dados e a configuração de parâmetros de acordo com interfaces proprietárias de diversos fabricantes. A síntese de conhecimento é feita por um componente de correlação que emprega lógica *fuzzy*. Os gerentes possuem ainda um repositório de “comportamentos” que realizam tarefas inerentes à um dado objetivo. Os “comportamentos” podem ser executados uma única vez, periodicamente ou com

estilo publica e assina. Um agendador executa “comportamentos” de acordo com o seu tipo. O gerente possui também um barramento de comunicação interno, chamado de “quadro negro”, onde os componentes podem escrever conhecimentos para outros componentes interessados. A tomada de decisão é implantada através de um mecanismo de inferência JESS (*Java Expert System Shell*). As decisões tomadas são mapeadas para sequências de “comportamentos”, que podem envolver um ou mais NECs. O gerente cognitivo do domínio possui um módulo adicional para aprendizado baseado em redes neurais e meta heurísticas. O objetivo é ajustar as regras políticas de acordo com experiências passadas.

O projeto é focado em seis estudos de caso: (i) encaminhamento e roteamento cognitivo de unidades de dados de protocolos; (ii) mecanismos de compensação de perda de pacotes; (iii) formação de compartimentos (agrupamentos lógicos de gerentes cognitivos) para auto-organização das funcionalidades da rede; (iv) acesso cognitivo as capacidades da rede sem fio; (v) auto-configuração e auto-otimização dos recursos de rádio; (vi) formação de ciência de problemas de comunicação. A concepção feita resulta da generalização da proposta visando atender esses estudos de caso.

Um experimento em laboratório foi conduzido para demonstrar a auto-otimização da cobertura e capacidade de uma rede sem fio com estações *dual mode* Wi-Fi e WiMAX [61]. Nesse experimento, uma estação é iniciada em WiMAX, recebendo configurações iniciais de seu gerente cognitivo. Após a inicialização, o mesmo gerente cognitivo percebe uma alta utilização do enlace de rádio WiMAX e decide por fazer um *handover* da estação para Wi-Fi. A estação é configurada para utilizar Wi-Fi. Após a mudança, o gerente cognitivo mede alto grau de interferência com outras estações Wi-Fi da mesma rede. Dessa vez, é feita uma troca da canalização utilizada.

2.3 Virtualização

Para entender o que significa virtualização deve-se ter em mente o que é real e o que é virtual. Seguindo esse pensamento, o real é tudo aquilo que tem características físicas concretas, algo tangível, já o virtual é algo simulado, abstrato. Na língua portuguesa o virtual é definido pelo dicionário Aurélio [62], como algo

que não é tangível ao ser humano e que não existe como realidade, mas sim como simulação. De forma análoga, a virtualização pode ser trazida para o ambiente computacional e das redes e ser definida como a criação de um ambiente virtual que simula um ambiente real. A virtualização proporciona a utilização de diversos sistemas e aplicativos sem a necessidade de acesso físico à máquina na qual estão hospedados. De acordo com [63], é uma técnica que introduz uma camada de abstração de *software* entre o *hardware* e o SO. Essa camada é chamada de VMM (*Virtual Machine Monitor*) ou *Hypervisor*. Ela tem a capacidade de controlar os recursos físicos do sistema livrando o SO desta tarefa. Uma vez que os recursos físicos são controlados pelo VMM, é possível que mais de um SO possa ser executado em paralelo em um mesmo *hardware*, criando uma ou mais máquinas virtuais VM (*Virtual Machine*). Assim, uma VM é um ambiente de *software* criado pelo VMM no qual um SO completo é executado sem restrições em um *hardware*, como se fosse um computador físico. Em um artigo publicado em 1974 por Popek e Goldberg [63], foram listados os seguintes requisitos para se ter um ambiente eficiente de virtualização.

- Equivalência – executar uma aplicação em uma VM deve ser equivalente em termos de funcionalidades a usar essa aplicação fora do ambiente de virtualização.
- Controle de recursos – o VMM deve ter controle total sobre os recursos de *hardware*, impedindo que os sistemas virtualizados tenham acesso direto e sem restrições a esses recursos.
- Isolamento – as VM devem ficar isoladas umas das outras para proporcionar estabilidade (o mau funcionamento de uma não deve afetar as outras), segurança (uma VM não pode ter acesso à outra) e consistência da informação.
- Eficiência – o *overhead* causado pela virtualização deve ser pequeno a fim de não comprometer a eficiência do sistema.
- Encapsulamento – as VM's devem ser criadas de maneira que seja fácil sua migração para outro sistema ou sua cópia.

Por incrível que pareça, a virtualização era um tópico muito comentado e utilizado nos anos 60 e 70. Nesta época, usavam-se os *mainframes* para realizar todos

os processamentos de dados. Estes contavam com uma respeitável capacidade de processamento e alta disponibilidade, mas eram muito grandes e caros. Ainda neste período, foi observado que a utilização destes *mainframes* não era alta e que recursos eram desperdiçados. Viu-se então, a necessidade de executar múltiplos sistemas operacionais dentro de um mesmo *hardware* maximizando sua utilização e evitando desperdícios. Foi a partir desse cenário que surgiu a idéia da virtualização. Nos anos 60 o conceito de virtualização teve seu uso mais precoce realizado no antigo *IBM 7044 CTSS (Compatible Time-Share System – Sistema Compatível com Compartilhamento de Tempo)*. Segundo Jones [64], este equipamento foi denominado "Projeto Atlas".

O Projeto Atlas foi oriundo de um estudo realizado em conjunto com o MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), a *Ferranti Ltd.* e a Universidade de *Manchester*. Foi utilizado um *mainframe IBM 704 M44/44X* com implantação de chamadas supervisoras. O sistema operacional deste *mainframe*, chamado "*Supervisor*", executava duas máquinas virtuais, uma para o sistema e uma para execução de programas. Este sistema serviu de base para outros computadores que viriam após ele. Assim, com base nesta tecnologia, em 1966 foi lançado o *mainframe IBM System/360 modelo 67*, onde o *hardware* do equipamento era inteiramente acessado através de uma interface chamada VMM. A partir daí, o antigo termo "*Supervisor*" foi então denominado "*Hypervisor*". Ou seja, um *software* que provê ambiente de virtualização para o sistema operacional executando em cima dele.

No início da década de 70, a *IBM* anunciou a série de *mainframes System/370*. E em 1972 anunciou o sistema operacional *VM/370*, que permitia a criação de múltiplas máquinas virtuais para os *mainframes* desta série. O *VM/370* foi atualizado em conjunto com toda a linha de *mainframes* da *IBM*. Hoje ele é conhecido como *IBM z/VM*, um dos sistemas operacionais para os *mainframes* da série *System/Z*. Nessa época, foram definidos dois tipos de VMM [56]. O primeiro tipo chamado de nativo ou *bare-metal* que era executado diretamente sobre o *hardware*. E o segundo tipo chamado de *hosted* ou hospedado, que era executado dentro de um SO completo. Por muito tempo a virtualização dos *mainframes* foi essencial para a computação. Porém, com o surgimento dos microcomputadores a queda no preço do *hardware* assim como, o aparecimento de SO capazes de realizar

múltiplas tarefas, tornou aceitável manter computadores com baixa utilização.

Enquanto nos anos 70 as arquiteturas de computadores eram desenvolvidas pensando na virtualização [65], a substituição dos *mainframes* por microcomputadores retirou da arquitetura das máquinas o suporte necessário para as VMM's [65]. Nos anos 80 a virtualização foi deixada de lado e virou história, mas, ela vem conquistando importância novamente nos últimos anos tanto no setor de pesquisa, como na indústria. Em 1990, a VMM foi trazida de volta à vida por pesquisadores da universidade de *Stanford* em um projeto que deu origem a *VMware Inc.* Esta foi a primeira empresa a fornecer virtualização para *hardware* doméstico [65]. Hoje a virtualização é proposta em máquinas e aplicativos, com objetivo de aperfeiçoar o uso do *hardware* e reduzir os custos [66]. Um estudo da consultoria Gartner [67] mostra que 80% das empresas do mundo planejam fazer uso da virtualização. Outro motivo extremamente importante que está alavancando o interesse pela tecnologia de virtualização é a economia de energia, dado que a maior parte das máquinas tem consumo alto, mesmo mantendo baixa utilização.

2.3.1 Tipos de Virtualização Tipicamente Encontrados na Literatura

Nesta subseção serão apresentados os três principais tipos de virtualização: virtualização total, paravirtualização e virtualização de *hardware*. Em seguida, será apresentado o conceito de virtualização de rede. Porém, antes será feita uma breve explanação sobre os níveis de permissões no sistema operacional. Na arquitetura do processador x86 foram definidos quatro anéis, numerados de 0 a 3, contendo as permissões de acesso do sistema operacional. O nível mais alto, nível 3, é o nível menos privilegiado e pertence ao usuário (*User Level*). Nesse nível, encontram-se as aplicações usadas pelo mesmo. Já o nível 0 é considerado o nível privilegiado (*Privileged Level*) e é usado pelo SO. Os anéis intermediários 1 e 2 tem como objetivo adicionar mais controle, porém, não são utilizados pela maioria dos SO. Para que um processo de nível 3 acesse funções privilegiadas de nível 0, são utilizados *drivers* (mecanismos controladores de acesso a um *hardware*). Estes *drivers* fazem a interconexão e o controle da utilização de recursos essenciais do

sistema, como por exemplo, uma placa de interface de rede. A Figura 2.9 ilustra esses anéis de privilégios.

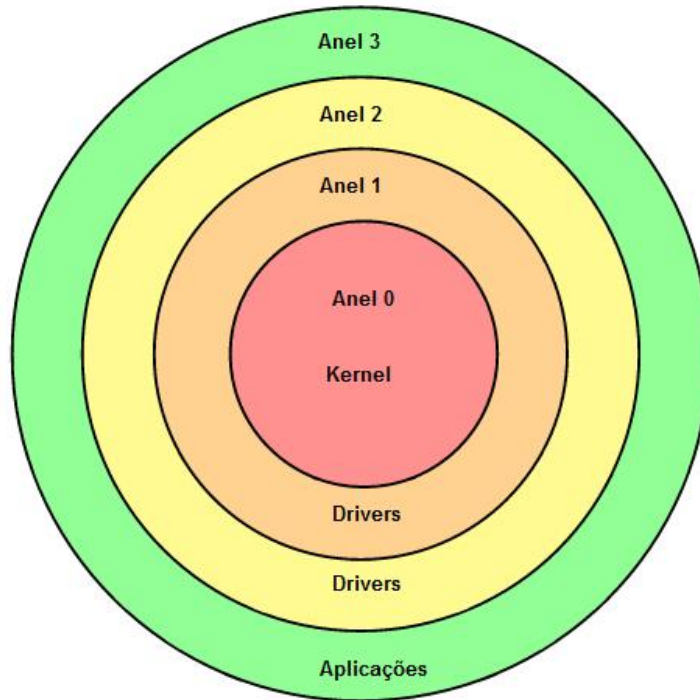


Figura 2.9. Anéis de Privilégios. Adaptado de [68].

2.3.1.1 Virtualização Total

Nesse tipo de virtualização todas as instruções são analisadas pelo VMM a fim de identificar aquelas que não têm permissão para serem executadas diretamente no processador. Normalmente, essas instruções pertencem ao anel 0 e servem para modificar algum estado do sistema. Para essas instruções, cabe aos desenvolvedores do VMM criar respostas que satisfaçam as necessidades da VM. Estas respostas devem ser do mesmo modo que, um *hardware* usado exclusivamente para esse fim responderia. Já as instruções consideradas não privilegiadas devem ser encaminhadas diretamente ao processador com o propósito de melhorar o desempenho da VM. Este tipo de abordagem faz com que na virtualização total o sistema hospedado fique separado da camada de *hardware* por uma camada de virtualização, ou VMM. Essa camada controla e responde a todo acesso de recursos não compartilháveis, ou privilegiadas, como mostra a Figura 2.10.

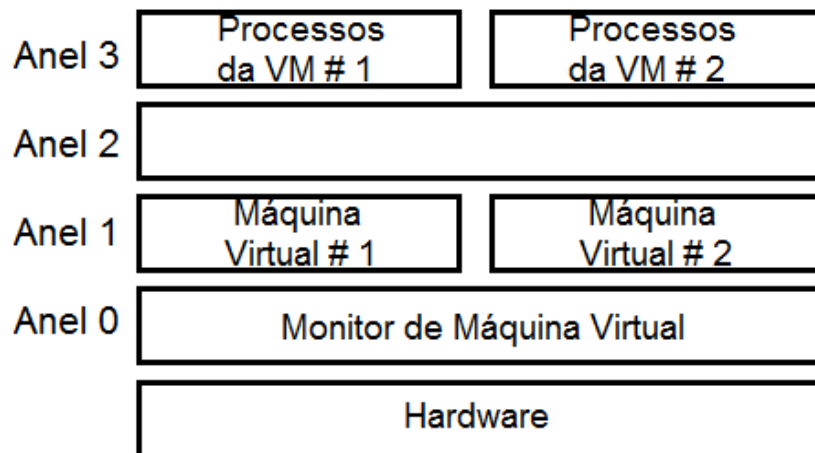


Figura 2.10. Virtualização Completa.

2.3.1.2 Paravirtualização

O conceito de paravirtualização é semelhante ao da virtualização total, porém, tem uma modificação fundamental. Enquanto na virtualização total todas as instruções devem obrigatoriamente passar pelo VMM, para identificar aquelas pertencentes ao anel 0 ou privilegiadas, na paravirtualização é serviço do SO identificar tais instruções e enviá-las ao VMM. Enquanto as instruções não privilegiadas são direcionadas diretamente para o *hardware*, aumentando o desempenho do sistema. Para que o SO consiga distinguir as instruções, é necessário que sejam feitas mudanças em diversas partes do núcleo do sistema. O que pode ser uma desvantagem, pois é uma área de muita dificuldade, necessitando de muitos recursos das empresas desenvolvedoras. A Figura 2.11 ilustra o conceito de paravirtualização.

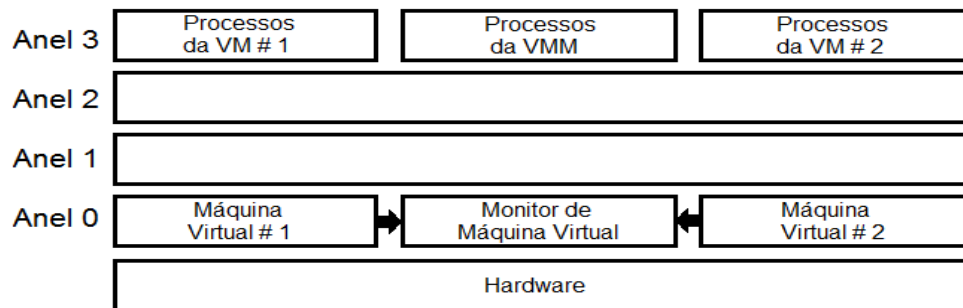


Figura 2.11. Paravirtualização.

2.3.1.3 Virtualização de *Hardware*

Para realizar a virtualização de *hardware* foram desenvolvidos dois novos modos, um modo raiz (privilegiado) e um modo não raiz (não privilegiado). Esses modos de privilégios fazem parte do modelo de privilégios visto anteriormente. Quando o computador é inicializado, o VMM é executado e obtém o privilégio de utilizar o modo raiz, enquanto, quando uma VM é inicializada, ela deverá utilizar do modo não raiz. Dessa maneira, o próprio processador consegue identificar as instruções provenientes da VM (modo não raiz) e as que vêm do VMM (modo raiz). E, cabe ainda ao processador selecionar aquelas que são privilegiadas, portanto, poderão ser executadas diretamente e encaminhá-las para o VMM. Com isso, há uma redução na carga de processamento utilizada para analisar as instruções, uma vez que o próprio processador tem uma área dedicada para tal tarefa. A Figura 2.12 ilustra este conceito.

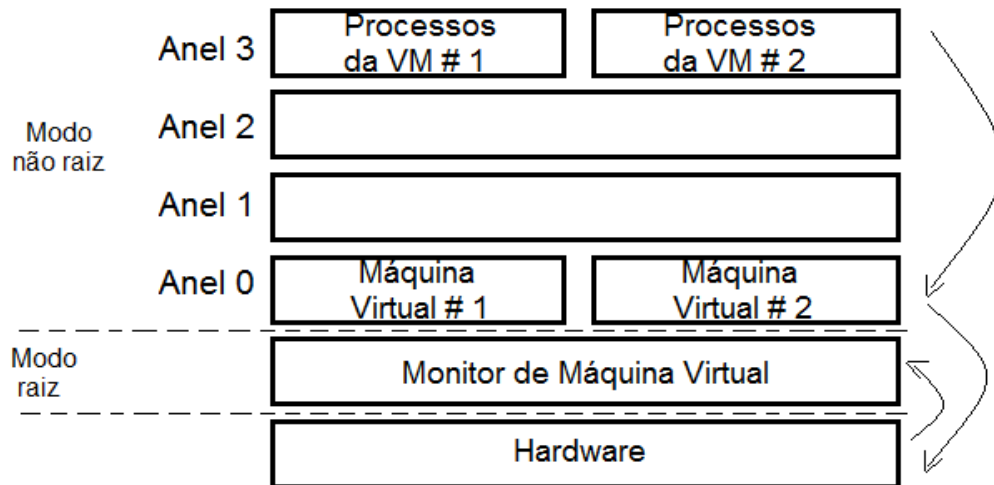


Figura 2.12. Virtualização de hardware.

2.3.1.4 Virtualização de Redes de Comunicações

Uma rede virtual consiste de nós virtuais conectados por *links* virtuais, formando uma topologia virtual [69]. De acordo com Carapinha e Jiménez [70], a virtualização de *link* permite o transporte de múltiplos *links* virtuais separados sobre o mesmo *link* físico. Ainda de acordo com Carapinha [70], a virtualização de nós é baseada no isolamento e particionamento dos recursos do *hardware* físico, como por exemplo, CPU, memória, banda no *link*, capacidade de armazenamento, etc. Portanto, esses recursos são divididos em partes e cada uma é alocada para um nó virtual diferente. A combinação dessas duas técnicas permite a criação de redes virtuais com funcionalidades equivalentes às redes físicas. A Figura 2.13 ilustra este conceito.

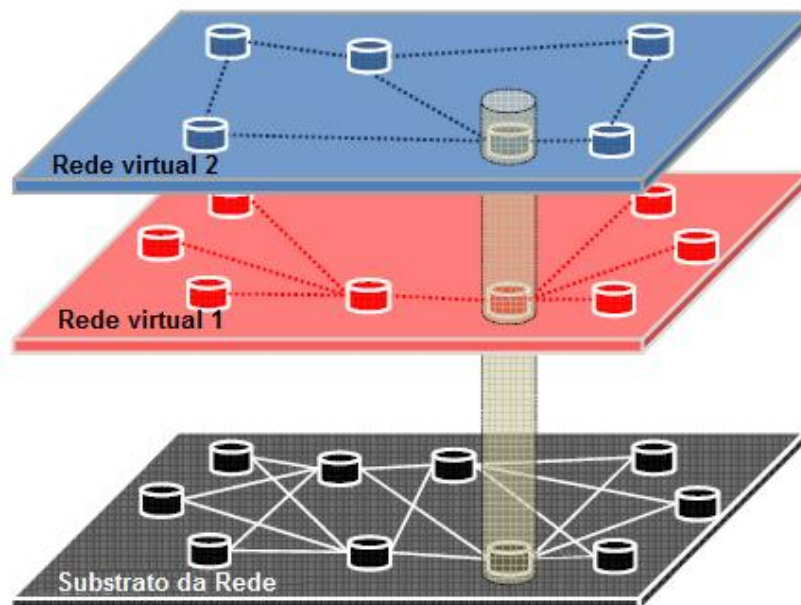


Figura 2.13. Virtualização de rede. Adaptado de [62].

Como podemos perceber pela Figura 2.13, a virtualização de redes provê a capacidade de que múltiplas redes sejam criadas ao mesmo tempo usando a infraestrutura de uma rede física, além de manterem o isolamento entre as redes virtuais. Ainda, de acordo com Carapinha [70] a virtualização de redes provê a capacidade de que múltiplas redes sejam customizadas para um objetivo específico e ao mesmo tempo compartilhem de uma mesma rede física. Assim, como todos os outros tipos de virtualização, seu conceito não é totalmente novo. Versões mais limitadas desse conceito foram utilizadas para criar algumas redes virtuais como, VPN (*Virtual Private Network*) [71] e VLAN (*Virtual Local Area Network*) [72]. De acordo com Touch et al. [73] [74] em 1998, pesquisadores do projeto X-bone receberam dinheiro da DARPA para desenvolver e gerenciar redes sobrepostas na Internet [73] [74]. O resultado do projeto foi usado para desenvolver Internets virtuais sobre a Internet tradicional, utilizando a virtualização de *links* e da camada de rede. Dado que a virtualização permite a criação de várias redes virtuais compartilhando os mesmos recursos físicos, diversas redes podem ser criadas para executar uma série de experimentações em paralelo.

Ainda em 1998, surgiu a proposta de redes de testes virtuais. Em 2002, o

X-bone evoluiu para suportar essas redes de testes virtuais e também outros projetos apareceram na mesma linha, como foi o caso do PlanetLab [75]. O PlanetLab tem como objetivo permitir a experimentação em larga escala baseada no tráfego de usuários reais. O projeto usa a virtualização para alocar partes da rede sobreposta em cada experimento. Cada nó da rede tem uma VMM que aloca e agenda processos, capacidade de armazenamento e transmissão para cada experimento. Com o sucesso do PlanetLab, várias iniciativas espalhadas pelo mundo surgiram como por exemplo, GENI (*Global Environment for Network Innovations*) nos EUA [76], OneLab2 [77] na Europa, CoreLab [78] no Japão e G-lab [79] na Alemanha.

Com todo esse esforço, a virtualização de rede pode ser usada para que arquiteturas inovadoras amadureçam a partir dos experimentos com as redes de testes virtuais. Assim, a virtualização de rede rapidamente está se tornando fundamental para o desenvolvimento de novas arquiteturas de Internet. Projetos como, Akari [80], 4WARD [35], MANA (*Management and service-Aware Networking Architectures*) [81] e FIND (*Future Internet Design*) [82] e os principais fabricantes de equipamentos, Cisco, Juniper, Huawei, HP e IBM consideram a virtualização como uma ferramenta importante para prover generalização, isolamento, transparência e customização dos recursos da rede [44]. Contudo, não apenas os recursos cabeados podem usufruir da virtualização. Com a crescente importância das redes sem fio, é desejável que as mesmas também possam utilizar destes benefícios.

Em um ambiente sem fio surgem alguns desafios para a virtualização, como por exemplo, suportar a mobilidade dentro de uma rede virtual, isolamento entre as redes virtuais para que não causem colisão ou interferências umas às outras. Existem vários pesquisadores trabalhando para que as redes virtuais sem fio se tornem realidade. Em 2005, o projeto ORBIT [83] chamou a atenção para redes de testes virtuais em ambiente sem fio. Mais recentemente o GENI, motivado pelo ORBIT, começou a desenvolver métodos para integrar os experimentos sem fios com os cabeados.

2.4 Desacoplamento de Identificador e Localizador de Host

Ultimamente, o usuário está cada vez mais deixando de ser mero consumidor de conteúdo, para se tornar também produtor. Este fato leva a uma série

de limitações da rede atual, pois a abordagem utilizada tem a preocupação centrada nos *hosts*, não nos conteúdos que estes geram e armazenam. Esta abordagem gera um conflito de interesse, pois enquanto os usuários estão cada vez mais interessados em acessar o conteúdo, a rede está interessada na localização do *host* que armazena este conteúdo [84]. Além de que, conforme escrito anteriormente no primeiro capítulo deste trabalho, a localização do *host* é feita através do endereçamento IP. Isso faz com que o IP tenha dupla funcionalidade, a de identificar e localizar o *host* na rede e, portanto, o IP mantém um acoplamento lógico entre a identificação e a localização. Com isso, as conexões se perdem quando o endereço IP é modificado. Este fato gera uma série de problemas, tais como disponibilidade de conteúdo, de segurança, dependência da localização do conteúdo, suportar conectividade simultânea (*multihoming*), comunicação *multicast* e o suporte à mobilidade.

O *multihoming* oferece redundância e otimização de rede, além de dar suporte para selecionar o ISP (*Internet Service Provider*) que melhor disponibiliza recursos para um determinado serviço.

Já a comunicação *multicast* está relacionada em como enviar informações eficientemente de uma fonte para vários destinatários, evitando redundâncias desnecessárias.

E por fim, tem-se a mobilidade, que é a garantia de que os usuários podem se mover não apenas dentro da sua rede local, mas também mudar de rede de acesso sem que a conectividade seja interrompida.

Então, já que hoje a Internet é basicamente uma rede de transferência de conteúdos e informações, porque não centrar sua evolução neste aspecto ao invés de centrar a sua evolução nos terminais [85]. E ainda, para Van Jacobson [85], a forma direta e unificada de resolver estes problemas é substituir o “onde” pelo “o que” em relação ao conteúdo. O que nos leva a uma necessidade de quebra de paradigmas da abordagem *host-centric* para uma *information-centric* (centrada na informação).

A velha abordagem *host-centric* citada anteriormente e, na qual a Internet atual foi projetada, colocou os terminais da rede no centro do projeto. Como resultado, a rede evoluiu para conectar *hosts* através do roteamento IP. Funções complexas foram retiradas do núcleo da rede e movidas para os terminais.

Já na abordagem *information-centric*, as informações são dirigidas para os

nós que manifestam o seu interesse através de assinaturas de conteúdo, em vez de nomes de interfaces de *hosts* [86]. Do ponto de vista do usuário, toda informação terá um identificador único e esta informação poderá ser recuperada de forma mais eficiente, já que a informação pode ser encontrada em um local mais próximo ou até mesmo no seu ambiente local, além do aumento do desempenho e a facilidade no acesso a estas informações.

As redes centradas na informação possuem como funcionalidade principal a interconexão dos produtores de conteúdo aos consumidores, independente das localizações dos *hosts* envolvidos na comunicação. Desta forma, consegue-se um aumento da eficiência na disponibilidade e disseminação da informação, já que a recuperação dos conteúdos pode ser beneficiada ao utilizar cópias ao longo da rede.

O grande desafio das redes centradas na informação é, portanto, estabelecer um padrão para identificação da informação de forma consistente, eficiente e perene, além de fornecer soluções para nomeação e roteamento de acordo com os identificadores alocados. Portanto, vários pesquisadores vêm estudando técnicas para fazer o desacoplamento entre o identificador e o localizador que propõe soluções para diversos problemas, tais como esses citados anteriormente, e outros que serão vistos na Seção 2.4.1 deste trabalho. Porém antes de explicar o desacoplamento do identificador do nome, primeiramente será feita uma breve introdução sobre nomes.

Normalmente, nomes são utilizados para identificar objetos, pessoas, dispositivos, dentre outras entidades que estão relacionadas em um contexto. Os nomes podem ser opacos ou legíveis e dentro de uma organização podem ser concebidos de forma plana ou hierárquica.

Nomes opacos são aqueles que não são interpretáveis por humanos, por exemplo, nomes criados através de chaves criptográficas que visam melhorar a segurança, bem como os nomes gerados por funções *hash*¹¹. Neste caso, o nome é idêntico ou baseado no identificador plano. A função de compressão *hash* gera um

¹¹ Uma função *hash* é composta usualmente por uma função de compressão de dados que recebe um valor de tamanho arbitrário e retorna um código comprimido de tamanho fixo para este valor.

resultado “resistente a colisões”, pois valores diferentes na entrada desta função vão gerar códigos diferentes na saída. Portanto, mesmo essa função gerando nomes opacos eles se tornam muito interessantes para poder gerar uma quantidade grande de nomes sem que ocorram colisões.

Já os nomes legíveis são aqueles que conseguimos entender pelo contexto que ele está inserido como, por exemplo, “*impressora_casa_joao*”. O nome legível pode descrever o objeto ou dispositivo ou pode indicar sua função em um determinado cenário.

Visando ter um sistema que torne fácil a gerência de tais nomes dentro de uma arquitetura, eles podem ser criados de forma plana ou hierárquica. Os nomes planos não possuem qualquer relacionamento com os outros presentes dentro de uma mesma arquitetura. A Figura 2.14 ilustra a forma como os nomes planos são concebidos dentro de uma organização.



Figura 2.14. Arquitetura de nomes planos. Adaptado de [76].

Os nomes hierárquicos por sua vez, são criados levando em conta a estrutura organizacional nas quais estes estão inseridos. Eles possuem um relacionamento tipo “pai/filho”. A Figura 2.15 ilustra os nomes formados hierarquicamente.

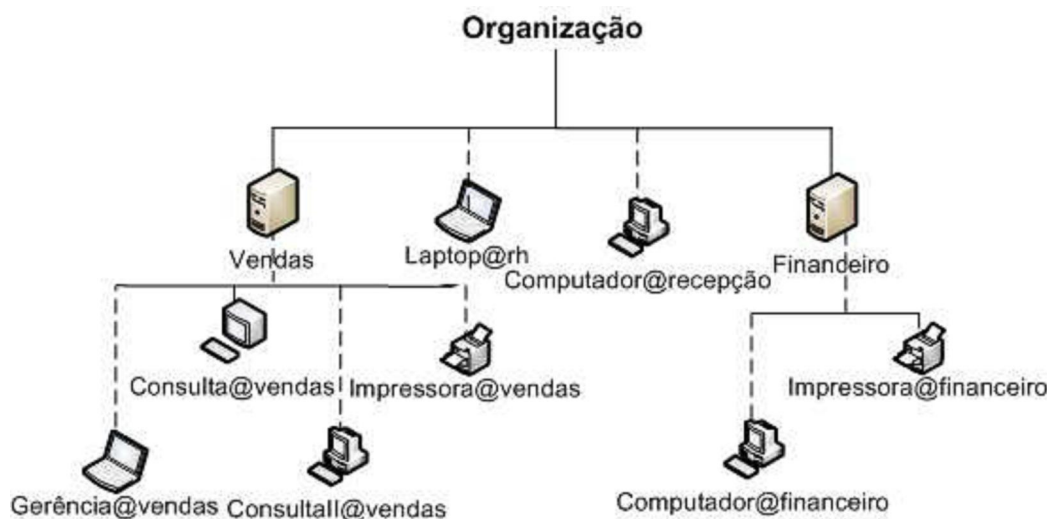


Figura 2.15. Arquitetura de nomes hierárquicos. Adaptado de [76].

2.4.1 Projetos de Desacoplamento de Identificador e Localizador de *Host*

Nessa subseção será apresentada uma lista de projetos de desacoplamento entre o identificador e localizador de *host*. Mais uma vez, o objetivo não é apresentar uma lista exaustiva de projetos, mas aqueles que foram considerados relevantes para realização desta dissertação.

2.4.1.1 *Mobile IP*

O *Mobile IP* [87] é um padrão de comunicação do IETF (*Internet Engineering Task Force*), que é designado para que dispositivos móveis possam se locomover de uma rede para a outra sem que haja perda de conectividade ou mudança de endereço IP. O *Mobile IP* para o IPv4 (*Internet Protocol version 4*) está descrito na norma IETF RFC (*Request for Comments*) 5944 e para o IPv6 (*Internet Protocol version 6*) está descrito na IETF RFC 6275. Como uma proposta para garantir a mobilidade aos dispositivos da rede, o *Mobile IP* designa dois endereços para um mesmo dispositivo, o *home address* e o *care of address*. O *home address* é permanente sendo usado para identificar o dispositivo. O *care of address* é associado com a rede em que o dispositivo está. Ainda para viabilizar essa solução existem

mais duas entidades no *Mobile IP*, o *home agent* e o *foreign agent*. O *home agent* guarda informações sobre os nós móveis que tem o *home address* na rede em que o *home agent* está. O *foreign agent* guarda informações sobre os dispositivos que estão visitando esta rede. Um nó móvel recebe anúncios periódicos e deduz quando ele mudou de rede por deixar de receber anúncios do agente local e passar a receber anúncios do agente estrangeiro [88].

Portanto, um nó querendo comunicar com um dispositivo móvel usa o *home address* deste dispositivo como o endereço de destino para enviar seus pacotes. Visto que o *home address* pertence logicamente a uma rede associada com o *home agent*, os mecanismos de roteamento IP vão encaminhar esses pacotes ao *home agent* ao invés de encaminhar para um destino que pertença à mesma rede do *home agent*. Então, o *home agent* redireciona estes pacotes fazendo um tunelamento IP, por exemplo, encapsulando o datagrama com um novo cabeçalho que usa o *care of address* do dispositivo móvel. Quando atua como transmissor, o dispositivo móvel envia seus pacotes diretamente para o outro nó de comunicação, utilizando para isso o seu *home address* como IP de origem, sem a necessidade de enviar primeiro os seus pacotes para o *home agent*. Isto é conhecido como roteamento triangular, este tipo de roteamento tem a desvantagem de que quando um pacote é destinado a um dispositivo móvel, ele precisa visitar a rede de origem antes de ser encaminhado para a sua localização atual, além é claro do acréscimo de *bytes* no cabeçalho devido ao tunelamento IP. A Figura 2.16 ilustra o funcionamento do *Mobile IP*.

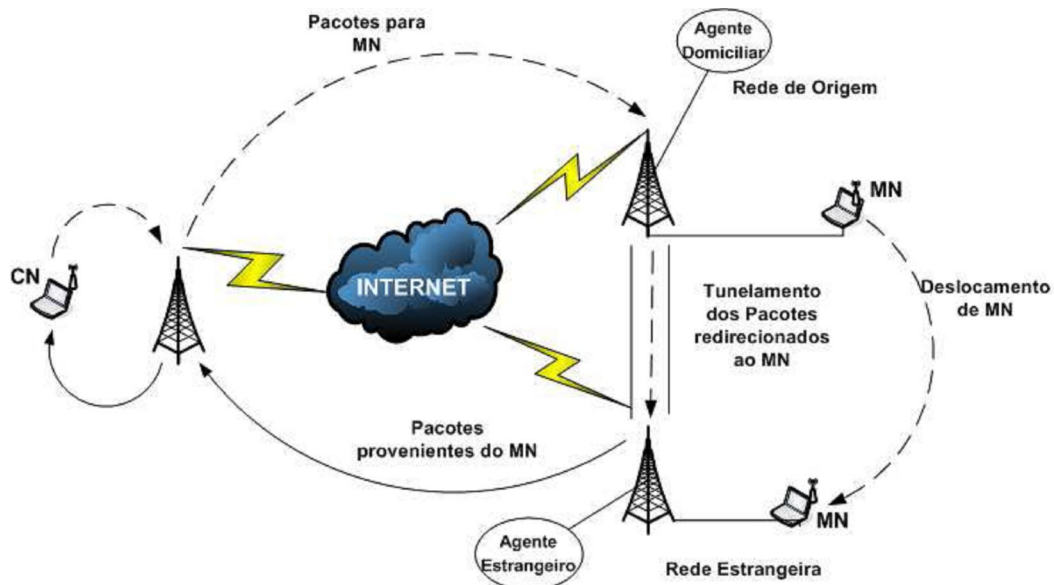


Figura 2.16. Funcionamento do Mobile IP. Adaptado de [84].

O *Mobile IP* com suporte ao IPv6 tem seu funcionamento parecido com o IPv4, mas possui uma modalidade com otimização de rota, o qual evita o roteamento triangular fazendo com que os pacotes destinados ao nó móvel em uma rede estrangeira possam ser distribuídos diretamente ao *care of address* [84].

2.4.1.2 HIP – *Host Identity Protocol*

O HIP [89] é uma tecnologia de identificação usada para redes IP como a Internet. A Internet tem dois principais espaços para nomes, o endereço IP e o DNS (*Domain Name System*). O HIP elimina do endereço IP a tarefa de identificação do *host*, deixando-o somente para localização e o substitui com identificadores criptografados de *hosts*. A criptografia é geralmente utilizada, porém não é obrigatória, mas o objetivo é utilizá-la para poder realizar uma autenticação em conexões estabelecidas em meios não confiáveis.

O efeito de eliminar do endereço IP a tarefa de identificação fez com que no HIP fosse proposta uma nova camada entre a de rede e a de transporte. Essa nova camada, chamada de camada de identificação de *host*, usa o HI (*Host Identifier*) para identificar os *hosts* e cria uma ligação dinâmica com o localizador (endereço IP). Portanto, o HIP separa as camadas de rede e de transporte, permitindo o desacoplamento de um nó móvel sem perder as conexões ativas TCP. O HIP provê métodos seguros para *multihoming* e mobilidade.

A Figura 2.17 apresenta uma comparação da pilha de protocolos do IP (lado esquerdo) com o protocolo HIP (lado direito). Percebe-se que no HIP, o identificador de *host* e seu localizador são separados um do outro, sendo que o endereço IP continua atuando como localizador, enquanto que o HI é responsável por identificar o *host* final.

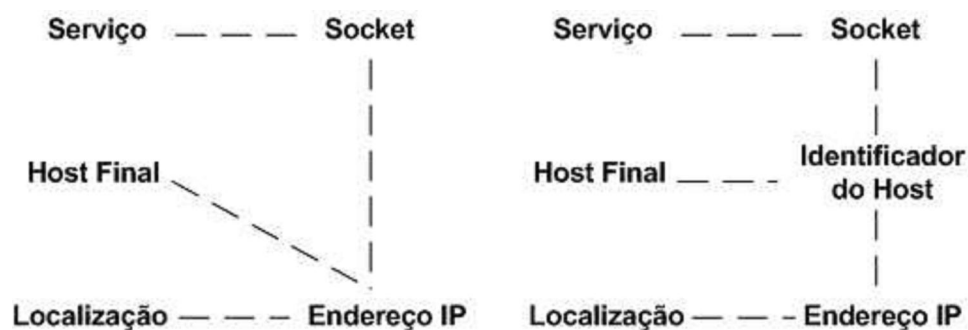


Figura 2.17. Comparação entre Internet atual (lado esquerdo) com o protocolo HIP (lado direito). Adaptado de [84].

2.4.1.3 MILSA – *Mobility and Multihoming Supporting Identifier Locator Split Architecture*

A arquitetura MILSA [90] não está apenas interessada na separação do identificador do localizador para eliminar a ambiguidade do endereço IP e assim resolver problemas de escalabilidade, mas também em desenvolver uma nova arquitetura capaz de distinguir as diferentes funções de organização (*trust domains*) e de servidores de serviços (*connectivity domains*). O objetivo é suportar a mobilidade, *multihoming* e prover uma melhor escalabilidade. Existem três princípios adotados por esta solução: (i) separar as relações de confiança, denominadas de domínio (*realms*) da conectividade; (ii) separar as funções de sinalização e de plano de dados, a fim de melhorar o desempenho e dar apoio à mobilidade; (iii) separação do identificador e localizador na camada de rede, fornecendo transparência para as camadas de aplicação e de transporte. Para isto, foi desenvolvida uma nova arquitetura contendo três partes, um plano de gerência, plano do usuário e o plano de controle.

Para o plano de gerência, foram desenvolvidos estruturas de domínios de confiança (*realms*) e zonas (domínios de conectividade) e um mecanismo de atribuição e gerenciamento de nomes HUI (*Hierarchical URI-like Identifier*). O HUI é um identificador hierárquico do tipo URI (*Uniform Resource Identifier*) e é utilizado pelas camadas de aplicação e transporte, sendo mapeado dinamicamente para um localizador que corresponde à posição atual do nó na topologia de rede. O domínio de confiança ou *realm* representa um grupo de *hosts* de uma mesma

hierarquia e atribui identificadores para eles. Dentro do domínio existe uma relação lógica de confiança entre os *hosts*. Já a zona é responsável por atribuir e agregar topologicamente os endereços dos *hosts* conectados a ela.

Para o plano do usuário foi apresentada uma nova subcamada chamada de HMS (*HUI Mapping Sublayer*) onde acontece a separação do identificador e do localizador e a relação com a camada de roteamento IP é definida. Em outras palavras, no HMS é onde ocorre o mapeamento dinâmico do HUI para um localizador que corresponde à posição atual do nó na rede. O HMS, portanto, oferece suporte à mobilidade, já que existe a separação do identificador e do localizador e suporte à *multihoming*, uma vez que um identificador pode estar ligado a vários localizadores.

No plano de controle foi introduzido o RZBS (*Realm Zone Bridging Server*) para fazer a conexão entre os domínios e as zonas de conectividade. O RZBS faz o mapeamento entre o identificador e o localizador e se encarrega de interligar o domínio à zona como está ilustrado na Figura 2.18.

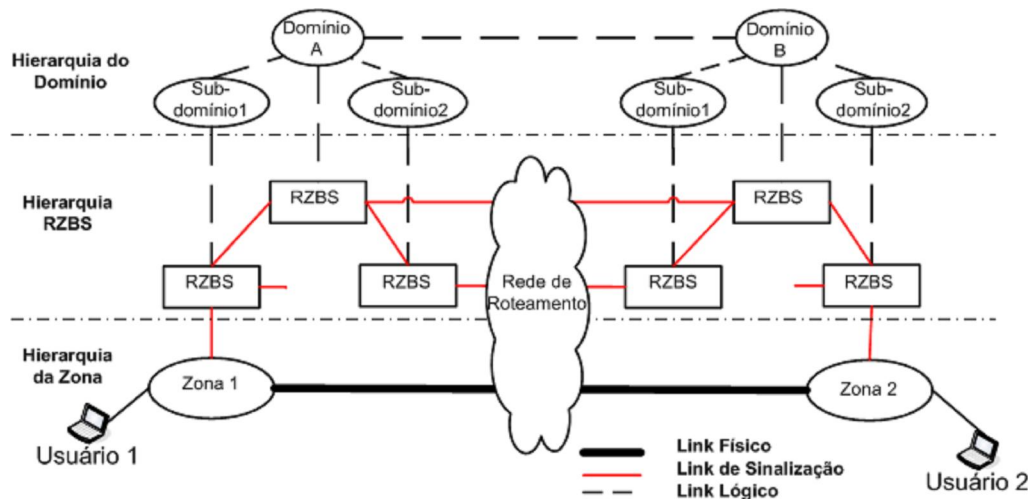


Figura 2.18. Arquitetura MILSA.

Outra ressalva da arquitetura MILSA é seu esquema de nomeação, conforme pode ser visto na Figura 2.19 ele é constituído de uma parte plana (parte esquerda do nome) e de uma parte hierárquica (restante do nome). A parte plana tem que ser única no subdomínio para evitar conflito de nomes e pode ser criada com base em criptografia de chave pública ou algoritmos *hash*. A parte hierárquica é para

representar a posição lógica na hierarquia do domínio. Dado isso, na Figura 2.18 os identificadores dos usuários dos dois terminais poderiam ser “Usuário-1.Subdomínio-1.Domínio-A” e “Usuário-2.Subdomínio-2.Domínio-B”.

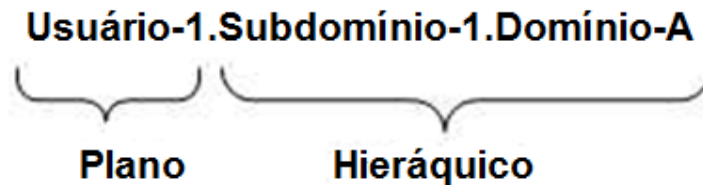


Figura 2.19. Exemplo de nome na arquitetura MILSA.

2.5 Conclusões parciais

Nesse capítulo, foram apresentados e discutidos conceitos teóricos que estão alinhados com o objetivo deste trabalho para determinar tecnologias chaves para o projeto da nova geração de redes sem fio. Para tanto, um breve histórico da computação e das redes autônomas, rádios cognitivos, virtualização e desacoplamento de identificador e localizador. Ainda, promoveram-se levantamentos de informações sobre alguns dos mais relevantes projetos realizados em cada um destes assuntos.

Foi percebido pelas informações apresentadas neste capítulo que as características autônomas estão intrínsecas no conceito do rádio cognitivo. Pois, para ele operar de maneira desejada tem que aprender e se adaptar ao ambiente em que se encontra de forma automática. Aliado com a virtualização estes recursos podem ser utilizados de forma mais eficiente pelo *software*, que conseguirá disponibilizá-los sob demanda para a rede, além de proporcionar a virtualização de parte significativa do rádio, permitindo que mais de um padrão possa existir ao mesmo tempo em uma plataforma. Ainda, com o desacoplamento de identificador e localizador obtêm-se melhor suporte à mobilidade e *multihoming* na rede além de incrementar a segurança através da rastreabilidade baseada em identificadores perenes. Portanto, a fusão destas tecnologias permite que os recursos de rádio possam ser:

- Controlados de forma automática possibilitando a operação autônoma e cognitiva da rede;
- Particionados via programação para criar fatias isoladas de recursos do rádio real. Federados na forma de redes virtuais, ou por implementações simultâneas das camadas de enlace (MAC virtuais) e de rede (roteadores virtuais);
- Utilizados com maior flexibilidade pelo *software*, que pode escolher, por exemplo, quais blocos da camada física são melhores para um dado cenário, bem como os parâmetros para a otimização da operação do rádio em um dado momento (auto-otimização);
- Usufruir de maior mobilidade dentro da rede sem a perda de conexões e da rastreabilidade de conteúdos e serviços.

Ainda, nas redes futuras tem se falado muito em convergência e automatização de processos. Com a união destas tecnologias acredita-se que será possível alcançar tais objetivos. Este fato levaria a redução dos custos operacionais OPEX (*Operational Expenditure*) por parte da operadora, através da redução da intervenção humana na operação da rede, e ao mesmo tempo otimizar a eficiência e qualidade de serviço, além de possibilitar novas formas de negócios e facilidade de migração para novas tecnologias por meio de alterações em *software*.

Capítulo 3

Plataforma Referencial Convergente para Nova Geração de Redes Sem Fio

Devido à crescente demanda por serviços móveis, novos padrões de comunicação sem fio com alta capacidade estão surgindo. Alguns desses padrões são o WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) [91], o LTE (*Long Term Evolution*) [92] e o HSPA (*High Speed Packet Access*) [93]. Eles permitem a comunicação com elevada vazão, atingindo taxas de dados na ordem de dezenas de Mbps. O surgimento de novos padrões de comunicação de dados e a rápida evolução dos padrões existentes são fatores que causam incertezas para o investimento em infraestrutura por parte das operadoras de telecomunicações. Atualmente, as tecnologias estão evoluindo em um ritmo exponencial, o que se denominou de LRA (Lei dos Retornos Acelerados) [94]. Segundo essa lei os avanços tecnológicos estão se tornando cada vez mais rápidos, pois eles se beneficiam das tecnologias de sucesso existentes para evoluir e desenvolver a próxima geração. Em um processo evolutivo novas capacidades são criadas para atender novas demandas. Essas capacidades passam a formar a base sobre a qual futuras capacidades serão criadas e, portanto, são empregadas em um ciclo que permite aumentar a velocidade de evolução. Portanto, a utilização de uma plataforma de rádio melhor alinhada com a evolução acelerada da tecnologia é fundamental para reduzir a incerteza das operadoras em fazer investimentos em implantações de redes, uma vez que esta plataforma permitirá a atualização do sistema sem a necessidade de aquisição de um novo *hardware* a cada pequeno intervalo de tempo.

Este trabalho especifica um modelo de plataforma de referência que integra diversas tecnologias de forma coesa e visa acomodar a evolução tecnológica acelerada. Este modelo utiliza a virtualização parcial dos rádios, permitindo que diversos padrões possam ser implantados simultaneamente em um mesmo rádio. Neste contexto, virtualizar significa criar versões virtuais de entidades reais. Para tanto, os recursos de *hardware* deverão ser expostos para o *software*, onde serão

dinamicamente utilizados. O modelo também deve prover uma redução das interferências humanas por meio das funcionalidades auto-* e cognitivas e utilizar um esquema de desacoplamento entre identificadores e localizadores de hosts. Esse desacoplamento permite a mobilidade de entidades sem a perda de identidade. Este modelo atenderá os requisitos de vazão e confiabilidade necessários para atender as demandas das atuais tecnologias denominadas de 4G, além de permitir a evolução para atender os requisitos das futuras redes 5G [95].

Este capítulo está estruturado da seguinte maneira. A Seção 3.1 apresenta a especificação dos requisitos e direcionadores desejáveis para a plataforma proposta. A Seção 3.2 descreve o comportamento esperado das características auto-*, virtualização e desacoplamento entre identificadores e localizadores para o ambiente de rádio. A Seção 3.3 especifica a plataforma do rádio cognitivo. A Seção 3.4 apresenta uma comparação entre a plataforma proposta e as existentes, e finalmente, a Seção 3.5 encerra o capítulo com uma conclusão sobre o modelo de plataforma proposto.

3.1 Especificação dos Requisitos e Direcionadores para a Plataforma de Rádio

Nesta seção, são apresentadas algumas tendências para as redes de comunicação sem fio do futuro. A partir dessas tendências é possível identificar os requisitos e direcionadores que regem a definição do modelo de plataforma de referência proposto. Uma importante ressalva é que esta lista não necessariamente endereça todos os requisitos para as redes futuras, uma vez que as demandas são flexíveis e mutáveis ao longo do tempo. Desta forma, esta seção leva em consideração os principais desafios das redes atuais e das redes que serão implantadas em um futuro próximo. Na Europa, durante a abertura da ICT 2010 (*Information and Communication Technology 2010*) [96], o ano de 2020 foi considerado como “futuro próximo”. Durante a conferência foi adotado que os requisitos e as propostas apresentadas até então guiariam as definições e implantações da Internet do Futuro na Europa.

Conforme notado por *Hourcade* [97], as redes futuras terão cada vez mais

usuários conectados, usando diferentes dispositivos em diversos lugares. Sem o desenvolvimento de novas tecnologias que permitam acesso à Internet e sem o investimento no desenvolvimento de novas soluções, certamente haverá uma limitação da capacidade da rede atual, o que impedirá que a demanda seja atendida. Em [97], os autores preveem que dentro de alguns anos as degradações no desempenho do tráfego na Internet serão perceptíveis, caso não haja investimentos consistentes para elevar a capacidade das redes. Para atingir as capacidades necessárias, as futuras redes deverão apresentar desempenhos que vão além dos limites impostos pelas tecnologias atuais.

O crescimento do número de acessos móveis, e das taxas de comunicação requerida pelas aplicações para este tipo de acesso, impõe outra limitação para as futuras redes de Internet, que é a escassez de espectro de frequências. A atual eficiência dos sistemas de comunicação digital não permitirá atender às demandas por serviços móveis com qualidade, a menos que grandes porções do espectro que hoje são destinados para certos serviços sejam empregadas para serviços de comunicação móvel. Desta forma, torna-se imperativo empregar técnicas mais eficientes para a utilização do espectro de frequências, que permitam maximizar a vazão, reduzir interferências e melhorar o consumo de energia [97].

Otimizar o uso da energia nas comunicações sem fio é um grande desafio. O crescimento explosivo de TI (Tecnologia da Informação) aumentou significativamente a demanda de energia e emissão de CO₂ (dióxido de carbono), o que conseqüentemente contribuiu para deixar os problemas de aquecimento global e crise de energia ainda piores [98]. Portanto, as preocupações com o meio ambiente e energia criaram uma necessidade urgente de desenvolver formas de consumo mais eficientes de energia nas comunicações, principalmente sem fio, denominadas de “*green networks*” [98]. Recentemente, governos e indústrias também mostraram interesses neste assunto e, na literatura existe vários projetos nessa área de pesquisa [99], [100], [101], [102] e [103]. Nesses aspectos, o uso do rádio cognitivo, por enquanto, parece ser a melhor solução, pois permite um melhor uso do espectro enquanto pode otimizar seus parâmetros para obter um melhor desempenho e consumo de energia.

Outros fatores que devem ser considerados são a qualidade de serviço QoS

(*Quality of Service*) [104] e a qualidade de experiência do usuário para um dado serviço QoE (*Quality of Experience*) [104]. Esses aspectos são importantes, pois as redes do futuro devem ser projetadas para atender uma dada QoE, o que implica em determinar a QoS mínima e, conseqüentemente, os requisitos de redes necessários.

Existe também o aspecto de que os serviços prestados pelas redes do futuro devem ser confiáveis, seguros e que o usuário tenha níveis de privacidade adequados. Hoje em dia, existe um sólido consenso de que privacidade e segurança sofrem de grande deficiência na atual Internet [44]. Existem diversas adversidades, entre as quais merecem destaque vírus, *worms*, *trojans*, *spywares*, *adwares*, *spam* e DoS (*Deny of Service*) [105]. Garantir privacidade e segurança para o usuário, aplicações, máquinas e outras entidades será um dos grandes desafios para as novas plataformas. Neste quesito, as soluções autônomas podem ajudar a prover níveis de segurança e privacidade necessários.

Outra limitação da atual Internet é que o IP (*Internet Protocol*) [106] é usado não apenas para identificar os nós, mas também para localizá-los na rede. Tais funcionalidades fazem com que o endereço IP mantenha um acoplamento lógico entre a identificação e a localização dos nós. Com isso, as conexões se perdem quando o endereço IP é modificado. Este fato causa diversos problemas na Internet atual, principalmente no suporte à mobilidade. Para resolver este problema é necessário separar o identificador do localizador. As redes futuras devem tratar essa questão para que as entidades presentes nelas possuam mobilidade enquanto permaneçam com sua identificação imutável. Este fato também é interessante para melhorar a segurança, pois as entidades podem ser inequivocamente identificadas, independentemente da sua localização.

Outro grande desafio que a proposta do desacoplamento apresenta é a escalabilidade. O sistema de endereçamento e roteamento da Internet atual, o IPv4 (*Internet Protocol version 4*), está chegando ao seu limite [97]. O IPv6 (*Internet Protocol version 6*) [107] expande o número de possibilidades de endereçamento, mas a maioria do *software* e *hardware* ainda usam o IPv4. As redes do futuro terão bilhões de nós, provenientes do crescente número de usuários e do advento da IoT (*Internet of Things*) [108], e aplicações que deverão ser unicamente identificadas e endereçadas. Como implantar este endereçamento e identificação de forma escalável

consiste em um dos grandes desafios para as futuras redes.

Esses e outros desafios terão que ser superados. Ao se criar uma plataforma de rede genérica e reconfigurável o suficiente para lidar com os problemas existentes e, ainda permanecer aberta para acomodar a evolução tecnológica, vai dar um passo para superar estes desafios e viabilizar a implantação das redes futuras. A evolução da plataforma para as novas redes é um aspecto importante, pois isso justificaria o investimento em uma rede não compatível com as atuais, mas que permitisse uma nova gama de possibilidades que não estarão disponíveis nas redes com concepção clássica.

Essa questão nos leva de volta ao ponto apresentado no começo deste capítulo, quando cita-se a Lei dos Retornos Acelerados. Uma proposta que não seja sustentável, provavelmente será suplantada pela próxima proposta que surgir, tornando-a desinteressante para os provedores de serviços realizarem seus investimentos. Então, as plataformas devem ser flexíveis e abertas para receber novas funcionalidades que venham suprir as necessidades futuras da sociedade, permitindo cenários ainda não imaginados no momento da sua concepção.

Embora exista uma série de desafios tecnológicos, devem ser considerados outros aspectos como o político, econômico e social. No âmbito político, o crescimento do número de dispositivos móveis requer uma nova abordagem governamental para regular a utilização do espectro de radiofrequência. Por exemplo, com o advento da televisão digital o espectro remanescente do desligamento dos canais analógicos, denominado de dividendo digital, poderá ser regulamentado para o uso do rádio cognitivo.

No lado econômico, há aspectos muito interessantes, como a possibilidade de investimentos em uma infraestrutura que poderá prover recursos por várias gerações de padrões de comunicação, além de viabilizar novos serviços inviáveis nos modelos atuais, tais como um mercado dinâmico de espectro eletromagnético. Outro exemplo é a criação de um ecossistema de negócios onde os processos de negócios estão alinhados aos serviços de rede.

No quesito social, a Internet do futuro não irá conectar apenas pessoas, mas também irá prover melhor entendimento das necessidades e comportamentos dos usuários. De forma geral, a adequação ao comportamento social será um aspecto

importante, pois esse guiará a evolução da própria plataforma. Portanto, a plataforma deve acomodar disputas, bem como implantar regulações e regulamentações no sentido de banir o mau uso e ameaças.

Com todas estas características listadas acima, percebe-se que se faz necessário criar novas plataformas para as redes do futuro. Entretanto, estas novas soluções devem ser aptas a coexistir com as soluções atuais. Por isso, é importante que existam formas de interoperabilidade e coexistência com as redes legadas e que as novas redes possuam também mecanismos que facilitem a migração.

Desta forma, é possível listar um conjunto de direcionadores desejáveis para a plataforma proposta:

- Simplicidade de projeto;
- Evolucionariedade;
- Sustentabilidade;
- Identificação e nomeação;
- Mobilidade;
- Desacoplamento de identificador e localizador;
- Ciclo autônomo e cognitivo (parte autônoma da rede cognitiva, gerência, controle, comunicação, etc.);
- Escalabilidade;
- Privacidade;
- Segurança e confiança;
- Virtualização (gerência de recursos);
- Controle de QoS e QoE;
- Gerência de energia;
- Políticas de alto-nível (governança, supervisão, políticas, regras, metas, troca e armazenamento de informação, etc.);
- Aspectos de regulamentação (políticos, econômicos e sociais);
- Mecanismos de migração de redes legadas para as novas;
- Suporte a redes legadas.

3.2 Comportamento Desejado do Rádio Cognitivo

Nesta seção, é descrito como cada uma das tecnologias apresentadas no capítulo 2 deve ser integrada e interagir com as demais de acordo com os desafios a serem superados no modelo proposto. O conceito do GA (Gerente Autônomo), que é responsável pelo controle distribuído da rede autônoma/cognitiva/ virtualizada, será apresentado nesta seção. Esta seção está estruturada da seguinte maneira. A Subseção 3.2.1 descreve o comportamento das características autônomas. A Subseção 3.2.2 aborda o funcionamento da virtualização na plataforma proposta. A Subseção 3.2.3 descreve o desacoplamento de identificador e localizador de *hosts* no mesmo contexto, e finalmente, na Subseção 3.2.4 são apresentadas e descritas às funcionalidades do Gerente Autônomo.

3.2.1 Características Autônomas

Nesta subseção são apresentadas as funcionalidades autônomas que são consideradas necessárias para que o modelo possa operar em um ciclo evolutivo. Devido ao grande número de pontos de vista e diversidade de tecnologias para implantação, várias soluções podem surgir para tornar reais os algoritmos com funcionalidades auto-* (auto-configuração, auto-otimização, auto-proteção). Portanto, nenhuma padronização é apropriada neste momento. Porém, é desejável que funcionalidades que apresentam trocas de informações entre dispositivos tenham suas interfaces padronizadas para permitir a interoperabilidade entre as diferentes soluções.

As motivações para se ter um sistema autônomo são baseadas em diversas razões. Para operar de forma eficiente e confiável, o terminal deve aprender e adaptar-se ao ambiente em que se encontra, além de otimizar seus parâmetros de transmissão para não causar interferência em sistemas primários ou minimizar as interferências em outras redes, viabilizando a coexistência. Para obter o conhecimento do ambiente em que a plataforma de rádio se encontra é desejável realizar o sensoriamento espectral [110]. O estado da utilização espectral em uma dada região também pode ser complementado por sistemas de bancos de dados que contém informações sobre o uso do espectro de frequências. Com base neste

conjunto de informações, é feito o controle dos recursos disponíveis no rádio e de seus parâmetros de funcionamento, sem que seja necessário controle externo, a fim de explorar as oportunidades espectrais. Enfim, para a plataforma funcionar da maneira prevista, ela necessita de um sistema auto-gerenciável denominado de Gerente Autônomo.

O GA incorpora funcionalidades de monitoramento, análise, planejamento, tomada de decisão, execução e aprendizado para atingir o objetivo de gerenciar a rede de forma autônoma. Ele deve ser capaz de unir todas as características auto-* de forma que as mesmas possam operar em conjunto buscando uma meta em comum. O GA deve conhecer todos os parâmetros e processos que está gerenciando. Ainda, os GAs de diferentes rádios devem manter comunicação entre si. Segundo Bogenfeld e Gaspard [110], os GAs devem possuir duas características fundamentais sobre as quais todas as outras vão ser implantadas, a criação de conhecimento e a sinalização de conhecimento. A primeira diz respeito às características autônomas necessárias para coletar informações relevantes. A segunda trata a questão de como as entidades vão se comunicar de forma automática, sem intervenção de operadores humanos. É interessante observar que a comunicação entre os GAs forma uma nova classe de comunicação, denominada de MTC (*Machine Type Communications*), cujas características divergem da comunicação voltada para humanos H2H (*Human to Human Communication*). Isso significa que o sistema de comunicação digital necessário para atender a comunicação entre GAs deve atender requisitos de latência, vazão, acesso ao meio e largura de faixa que não são iguais aos sistemas de comunicação voltados para a transmissão de conteúdo clássicos, como áudio, vídeo e texto. Isso reforça a necessidade da camada física dos futuros terminais de rádio ser flexível para atender as diferentes demandas de comunicação digital. Ainda, essa troca de informações deve ser de modo que não interfira nas comunicações existentes, ou seja, a troca de informações entre o GA e as diversas entidades deve ocorrer de forma transparente para o fluxo de dados dos usuários.

3.2.1.1 Características para Aquisição e Síntese de Conhecimentos

As funcionalidades para aquisição e síntese de conhecimento tratam a forma que as entidades vão coletar e obter dados, informações e sintetizar conhecimentos, visando à tomada de decisão. Faz parte destas funcionalidades aquela que busca o autoconhecimento (*self-awareness*) como contexto atual, configuração e capacidade do rádio, largura de faixa disponível, consumo e disponibilidade de energia, necessidade futura de largura de faixa, QoS, aprendizado de informações dos usuários e políticas regulatórias atuais. O resultado esperado desta funcionalidade é a obtenção e aprendizado de todas as informações contextuais necessárias para tomar decisões autônomas [110]. Portanto, com esta funcionalidade espera-se obter:

- Informações de contexto, que são as referentes ao atual momento em que o rádio se encontra.
- Preferências dos usuários, que são informações referentes às necessidades do usuário, por exemplo, QoE e QoS esperada para um dado serviço.
- Informações regulatórias, que é o conjunto de regras que o rádio deve seguir como regras do operador da rede ou da legislação local (aspectos regulatórios de utilização do espectro do país). Estas informações são utilizadas no ciclo autônomo influenciando no processo de decisão de configuração e otimização dos dispositivos.
- Previsão de alocação de largura de faixa, que é necessária para identificar a necessidade de largura de faixa de acordo com o consumo atual e, com base no histórico de vazão e condições do canal de propagação, gerar uma previsão futura de reserva de largura de faixa.

Essas informações não são perenes e devem ser atualizadas sistematicamente, principalmente em um ambiente dinâmico como o de rede sem fio móvel, onde o tempo de coerência depende da velocidade de deslocamento e das mudanças no ambiente de propagação. Portanto, é desejável que essas informações sejam associadas a uma determinada área e a um determinado período de tempo.

Estas informações são importantes para que todas as outras funcionalidades auto-* possam operar corretamente. Outro aspecto interessante é determinar o tipo de aquisição que deve ser feita, por exemplo, se é uma aquisição única, periódica ou eventual. A Figura 3.1 ilustra o processo de síntese de conhecimento.

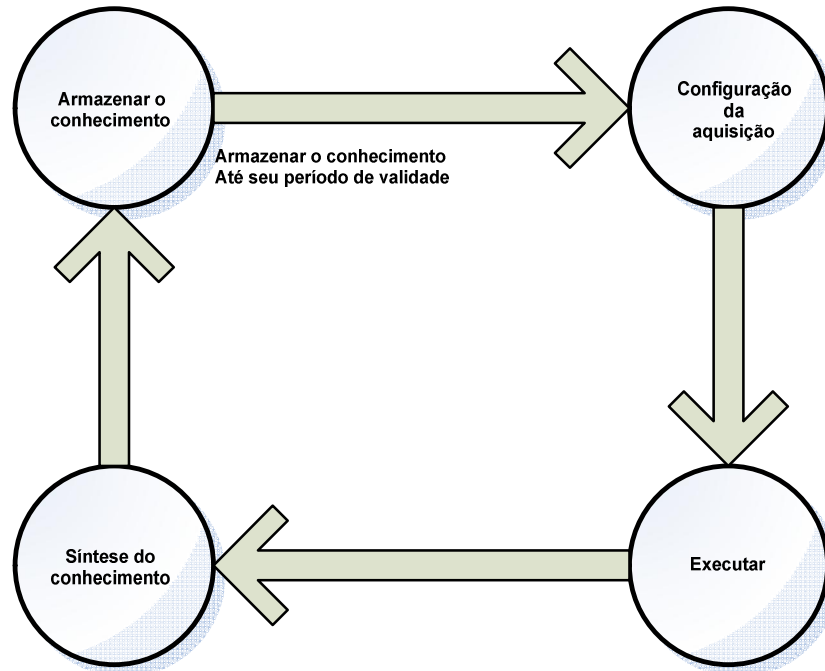


Figura 3.1. Processo de síntese de conhecimento.

Com base nas informações adquiridas, a plataforma deve ser capaz de determinar as condições atuais do ambiente e também estimar as capacidades futuras. Para esta última tarefa, alguns pesquisadores utilizam o aprendizado Bayesiano para síntese deste tipo de conhecimento [110]. O conhecimento é constituído pela atualização das estatísticas dos aspectos observados.

3.2.1.2 Características para Sinalização de Conhecimentos

Essa funcionalidade visa à troca de informações entre rádios. É importante que essa comunicação seja realizada de maneira que não interfira na operação normal da rede. Segundo Bogenfeld e Gaspard [110], essa comunicação deve ser realizada com taxas reduzidas para que seja possível alcançar longas distâncias com baixa potência de transmissão. Portanto, são características básicas desse sistema de

sinalização a operação com baixa potência, pouca exigência de QoS e um sistema robusto de codificação de canal e modulação para que possa alcançar grandes distâncias. Note que estas características não são compatíveis com as demandas do sistema de comunicação voltado para a transmissão de conteúdo para os usuários, o que significa que um esquema de comunicação MTC deve ser concebido e o *hardware* deve ser flexível para atender ambas as demandas. As informações trocadas neste nível são o sensoriamento do espectro, descoberta de vizinhos, troca de informações de configuração, acesso local a informações regulatórias e negociação de espectro.

Essa comunicação poderá ser realizada tanto utilizando o conceito de *unicast* quanto de inundação (*flooding*) [111]. A técnica de *unicast* é empregada para as mensagens que são direcionadas a um rádio específico na rede, enquanto que a técnica de inundação é utilizada quando a informação será de interesse de todos na rede ou para descoberta de rádios vizinhos. Para esta última, pode-se utilizar mensagens de divulgação de presença que utilizem poucos símbolos de transmissão. Poderia ser uma simples mensagem como “*Hello!*” e, roteá-la na rede usando roteamento por inundação. Com base nas respostas pode-se listar os rádios vizinhos e determinar parcialmente a topologia da rede em que o rádio se encontra. É importante ressaltar que nesta técnica a mensagem deve ser transmitida em intervalos de tempo otimizados, de forma a permitir que um novo terminal possa conhecer a estrutura da rede ao seu redor, sem sobrecarregá-la com tráfego excessivo. Além disso, o número de saltos que a mensagem pode percorrer deve ser controlado.

A sinalização de conhecimento é importante principalmente nas tarefas de configuração e otimização dos rádios, uma vez que ela fornece informações sobre os rádios vizinhos, negociação de espectro, etc.

Uma vez que a geração e sinalização de conhecimento estiverem operando nos rádios e na rede, todas as outras funcionalidades autônomas e cognitivas poderão ser construídas. Uma funcionalidade cujo desempenho será evidentemente beneficiado com a comunicação entre os GAs é o sensoriamento espectral.

3.2.1.3 Sensoriamento de Espectro

O sensoriamento espectral é a capacidade que permite ao rádio conhecer a

ocupação espectral do ambiente em que se encontra e, com base neste conhecimento, determinar quais são as oportunidades de ocupação dos canais ociosos, também denominados de *white spaces* [112]. A Figura 3.2 ilustra o processo pelo qual um rádio explora as diferentes oportunidades de transmissão, descobertas através do sensoriamento espectral.

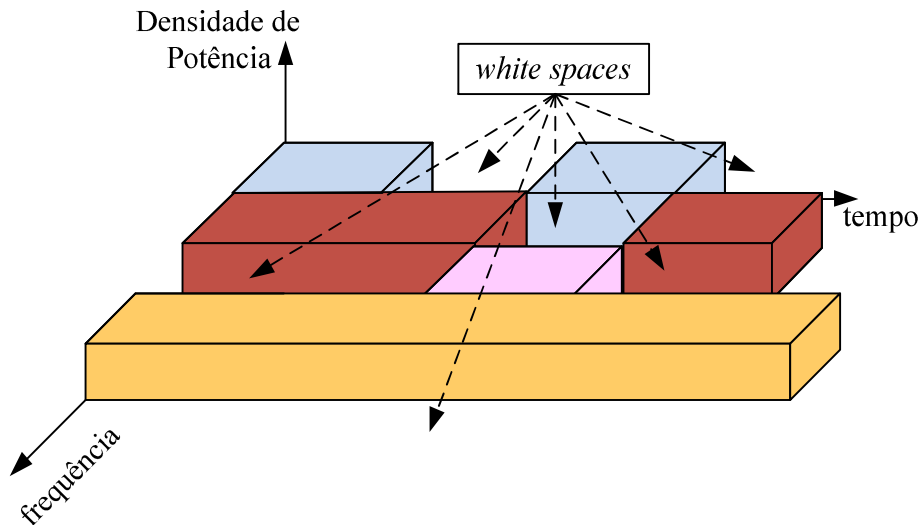


Figura 3.2. Oportunidades espectrais que podem ser conhecidas através do sensoriamento espectral.

Além de descobrir as oportunidades de utilização oportunistas do espectro de frequências, o sensoriamento espectral também é responsável por evitar que usuários secundários causem interferências em sistemas licenciados. O sensoriamento espectral cooperativo é comumente empregado para reduzir a probabilidade de interferência [113]. O sensoriamento pode ser feito com ajuste grosso ou fino. O primeiro modo objetiva apenas detectar a existência de um sinal em um dado canal, não preocupando-se em identificar que tipo de sinal é esse. Já o segundo modo é mais complexo e tem como meta caracterizar o sinal encontrado no canal. A Figura 3.3 apresenta a relação entre o sensoriamento espectral e as demais funcionalidades macro de um terminal de rádio cognitivo.

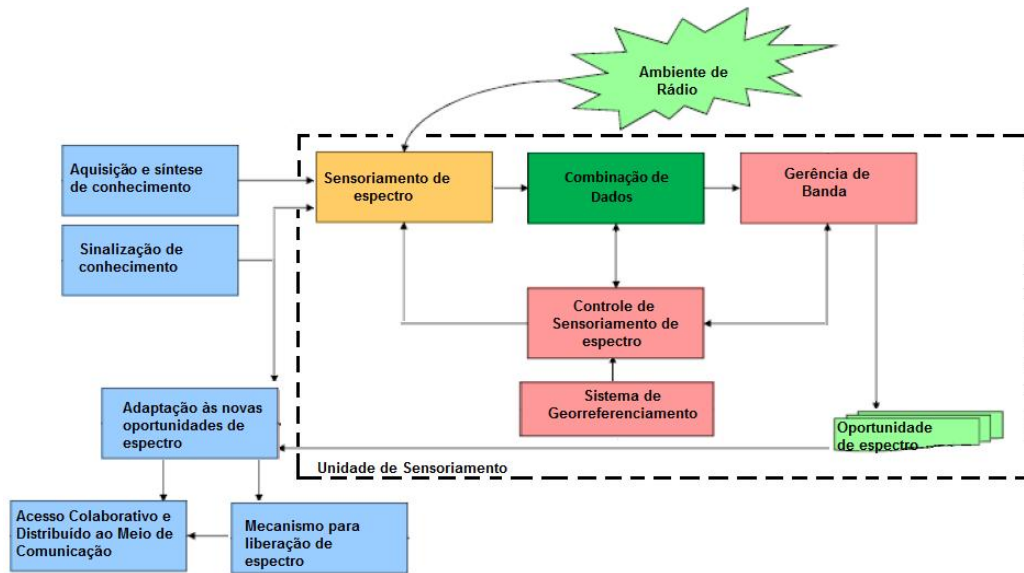


Figura 3.3. Processo de sensoriamento de espectro. Adaptado de [110].

As funções dos blocos Aquisição e Síntese e Sinalização de conhecimento já foram apresentadas nas subseções anteriores, 3.2.1.1 e 3.2.1.2, respectivamente.

O bloco de Sensoriamento Espectral fornece informações sobre a ocupação do espectro por sistemas licenciados e não licenciados na região onde o rádio cognitivo está operando. O bloco de Combinação de Dados é responsável pela combinação das informações de ocupação espectral obtidos por diferentes rádios em posições geográficas distintas, além de também poder receber esta informação de um servidor de banco de dados destinado a este fim, viabilizando, assim, o sensoriamento espectral cooperativo. Os dados obtidos por este bloco são entregues ao bloco de Gerência de Banda. Obviamente, para implantar o sensoriamento cooperativo, é necessário haver comunicação entre os rádios para a transmissão das informações coletadas individualmente, bem como deve-se conhecer a identidade, localização e o número de rádios na rede. A tomada de decisão sobre a ocupação do espectro pode ser realizada por um único nó central (Sensoriamento Cooperativo com Centro de Fusão) ou cada rádio pode tomar a decisão sobre a ocupação espectral com base nas medidas realizadas por ele e por outros nós da rede (Sensoriamento Cooperativo Distribuído) [113]. Já o bloco de Gerência de Banda é o responsável por determinar a largura de faixa em uso, bem como a disponível para novas

comunicações, ou seja, ele deve fornecer informações necessárias para que uma função de controle e admissão faça a admissão de novos tráfegos sobre os enlaces oportunistas encontrados.

O sensoriamento do espectro pode ser feito sob demanda ou periodicamente. No modo sob demanda, o controle de sensoriamento de espectro deve enviar uma requisição assíncrona para um elemento sensor com os parâmetros do horário de medição, banda de frequência a ser medida, duração da medição, função e formato de resposta da medição do espectro. Caso esteja no modo periódico, então o controle de sensoriamento de espectro configura as entidades de sensoriamento, as quais irão retornar os resultados quando a probabilidade de um dado canal estiver ocupado ultrapassar um limiar de referência. O bloco de Controle de Sensoriamento Espectral é responsável por todo o gerenciamento do sensoriamento, assim como determinar se foi satisfeita a confiabilidade da medida encontrada. Caso o resultado do sensoriamento de espectro não tenha atingido os níveis necessários de confiabilidade, o processo deve ser reiniciado com os parâmetros de medição alterados, visando-se atingir a confiabilidade desejada.

Durante a operação de uma rede de rádios baseados na plataforma de referência, existe a possibilidade de que um usuário licenciado inicie a transmissão em uma faixa de frequência que esteja sendo utilizada pelos terminais oportunistas. Para que este usuário licenciado possa ser detectado, é necessário que os rádios entrem no modo de “silêncio”, durante o qual nenhum rádio da rede irá realizar transmissões, permitindo que seja possível verificar a presença de usuários licenciados na faixa de frequência empregada para comunicação. Para que haja sucesso no sensoriamento espectral do canal empregado nas comunicações entre os rádios, é necessário que todos os terminais oportunistas entrem no modo de “silêncio” simultaneamente. Caso algum terminal oportunístico realize transmissões durante este período poderá ocorrer uma detecção indevida de usuário licenciado, forçando que todos os elementos oportunistas da rede mudem dessa frequência de operação, sem que haja necessidade real para tal ação. O sincronismo entre os rádios de uma rede pode ser realizado através de um Sistema de Georreferenciamento [114], tal como ilustrado na Figura 3.3.

Também devem existir mecanismos que possam fazer uso dos resultados

obtidos pelo sensoriamento para utilizar as oportunidades encontradas e/ou para evitar a interferência em um usuário licenciado detectado. Para isto, deve haver mecanismos de acesso ao meio, mecanismos para liberação da banda de frequência utilizada e adaptação às novas situações de espectro. As subseções a seguir apresentam os princípios destes mecanismos.

3.2.1.4 Controle de Acesso ao Meio

Esta funcionalidade é responsável pela alocação autônoma e distribuída de recursos e pelo controle de acesso ao meio em redes oportunísticas [115]. Ela também objetiva maximizar a utilização dos recursos, pois procura atender de forma igualitária as demandas dos rádios oportunísticos, visando garantir suas respectivas QoS. No projeto E³ [110], foram desenvolvidos dois algoritmos para realizar tal tarefa. Esses algoritmos são o JPRC (*Joint Power Rate and Channel*) e C3MAC (*Cognitive Cooperative Control Medium Access Control*).

O JPRC aloca energia, taxas e canais em cenário de rádio oportunístico, ele trata das alocações de recursos individuais aos dispositivos. Já o C3MAC trata das alocações de recursos distribuídos e autônomos, permitindo que diferentes redes de rádios oportunísticos acessem, dinamicamente e temporariamente, as faixas de frequências ociosas. Para manter a justiça entre os usuários do espectro, o C3MAC usa um esquema de créditos acumulados. O usuário licenciado que está com sua banda temporariamente sem utilização é chamado de conessor. O conessor recebe créditos toda vez que conceder a utilização de sua banda para um usuário não licenciado. O critério utilizado para determinar quem vai conceder a banda é a quantidade de créditos acumulados, quanto mais pontos são acumulados maiores as chances de conseguir a utilização da banda daquele conessor. Logo, o mecanismo distribuído em cada rede busca o equilíbrio entre a manutenção de créditos altos e capacidade suficiente para suas próprias demandas de tráfego. Fato que cria um cenário de mercado de espectro.

É importante que o rádio oportunístico possua um mecanismo que permita a mudança de canal de forma rápida toda vez que o usuário licenciado for detectado. Deve-se estabelecer critérios para que o canal seja bloqueado para transmissão do usuário oportunístico, garantindo que o licenciado ou prioritário opere corretamente.

Esta tarefa pode ser realizada através de redução da potência transmitida para zero (canal bloqueado), para os canais com evidências de utilização pelos usuários licenciados.

3.2.1.5 Auto-organização e Ciclo de Decisão

Conforme apresentado em [116], a auto-organização é um procedimento necessário para a redução de OPEX (*Operational EXpenditure*) e CAPEX (*CAPital EXpenditure*) das redes de rádio. A introdução da auto-organização exige o desafio de integrar os seguintes procedimentos em um processo automático e autônomo: i) planejamento da rede; ii) gestão do desempenho e configuração; iii) métodos de proteção da rede; iv) gerência de falhas na rede. Essa integração possibilita a redução da interação humana no desenvolvimento e operação da rede, reduzindo assim o OPEX e CAPEX. O GA tem como, uma de suas funções, controlar todo este ciclo de auto-organização. Desta maneira, o GA pode reduzir a complexidade e a latência que o sistema teria caso fosse controlado por um operador humano de forma centralizada. O GA também permite aumentar a robustez a ataques e mau funcionamento da rede. A Figura 3.4 ilustra a inter-relação das características autônomas, também conhecidas como auto-organização.

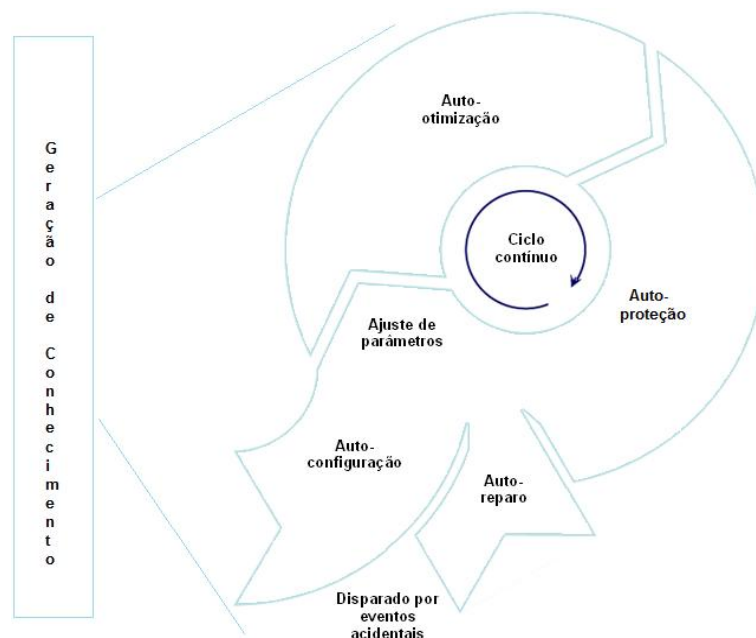


Figura 3.4. Visão geral da auto-organização. Adaptado de [116].

Cada uma das etapas apresentadas na Figura 3.4 deve operar de acordo com o ciclo de decisão apresentado na Figura 2.4. Este ciclo forma um laço de retro-informação, através da coleta de informações de diferentes meios e fontes. As etapas que fazem parte da auto-organização apresentada na Figura 2.4 são a observação, análise e estabelecimento de prioridades, planejamento, decisão, ação e aprendizagem. Na fase de observação, o sistema colhe informações pertinentes ao seu funcionamento. Estes dados são apresentados para a fase de análise, a qual procura entender tais informações e determinar se o elemento está operando da maneira desejada. Também estabelecer o grau de prioridade das ações a serem tomadas. O planejamento, com base nos dados vindos da fase de análise, determina, caso necessário, um plano de ações para reconfiguração do sistema. Na fase de decisão os planos são selecionados para execução. A fase de ação por sua vez, aplica o plano de ações definidos na fase de decisão. Este ciclo constrói um modelo de evolução do sistema baseado em aprendizado, o qual é utilizado como base para decisões de adaptação do elemento e que posteriormente podem ser aplicados para a configuração do mesmo.

Assim, na Figura 3.4, pode-se definir que o processo de auto-configuração começa no estágio pré-operacional da rede e ocorre sempre que necessário durante a operação. Ele é disparado por eventos acidentais de natureza intencional, como a adição de um novo rádio, introdução de um novo serviço ou nova característica da rede. Nesta fase uma maior intervenção humana pode ser necessária, através de configurações iniciais como os parâmetros de rádio e algoritmos de gerência. De acordo com Nokia Siemens Networks [117], essa funcionalidade abrange todas as tarefas necessárias à implantação e comissionamento da rede, bem como a configuração de parâmetros, além de permitir a operação automática dos elementos de rede, executando rotinas de configuração, autenticando e conectando os elementos ao sistema de gerência autônoma. Esta fase também deve conter mecanismos de troca de informações de parâmetros de configuração entre os rádios. Após esta configuração, os rádios devem ter autonomia para fazer atualizações e se configurarem automaticamente.

Já o processo de auto-otimização faz parte do estágio operacional da rede.

Nesta etapa é realizado o ajuste fino do gerenciamento dos recursos de rádio. Este ajuste é feito a partir das medições das estações de rádio. As medidas são processadas e utilizadas para atualização dos parâmetros do mesmo, tais como:

- formatação de feixe para as antenas;
- potência;
- número de portadoras;
- formatação do quadro de transmissão;
- banda e tempo de guarda;
- modulação digital;
- taxa de codificação de canal;
- tipo de multiplexação;
- tipo de múltiplo acesso;
- lista de células vizinhas;
- faixa de recursos de gerência de rádio;
- balanceamento de carga entre células vizinhas.

Nessa etapa, a intervenção humana é necessária para realizar algumas atividades específicas, como por exemplo, na instalação de novos equipamentos. De acordo com [117], essa funcionalidade serve para melhorar e conservar a qualidade da rede através do ajuste de parâmetros durante a operação.

Os processos de auto-proteção e auto-reparo, que também fazem parte do estágio operacional da rede, têm por objetivo proteger e reparar falhas na rede de forma automática. A auto-proteção deve prever e evitar possíveis ataques e ameaças à rede. Já o auto-reparo pode ser visto como uma componente à parte da auto-proteção, que atua em função de eventos acidentais de natureza não intencional, como falhas de equipamentos. Logo, o auto-reparo tem como objetivo reparar possíveis perdas de cobertura/capacidade em função do acontecimento de eventos indesejados. Quando as falhas forem reparadas, todos os parâmetros voltam à condição inicial. De acordo com Nokia Siemens Networks [117], essa funcionalidade abrange um conjunto de funções chaves projetadas para tratar as principais quedas de serviços, incluindo detecção, diagnóstico das causas raízes e mecanismos de suavização de interrupções.

Com base na troca de conhecimento entre as diversas etapas da auto-

organização é possível melhorar o processo decisório como um todo. E, por fim, com base em todas as informações geradas na auto-organização, o GA é capaz de gerar conhecimento de determinada situação ou do ambiente no qual se encontra.

3.2.1.6 Suporte a Redes Legadas

As novas redes de comunicação devem possuir mecanismos para possibilitar a interoperabilidade com as redes legadas. Segundo Bogenfeld e Gaspard [110], os níveis autonômicos dos dispositivos dependem das funcionalidades autônomas que são suportadas e são classificados em quatro níveis:

- Dispositivos legados: não suportam funcionalidades autônomas;
- Dispositivos configuráveis: operação dos equipamentos adaptada e modificada pela configuração dos dispositivos, ou seja, operação autônoma limitada;
- Dispositivos semi-autônomos: operação autônoma sob condições específicas e em casos limitados e;
- Dispositivos completamente autônomos: suportam um amplo conjunto de funcionalidades autônomas.

Nas redes futuras, mecanismos para dar suporte a todos esses dispositivos serão necessários, assim como os que permitem a migração das redes legadas para as novas.

3.2.2 Virtualização

Virtualizar significa criar entidades de *software* que se comportam tal como as implantadas usando *hardware*. A virtualização parcial do rádio provê a capacidade de que múltiplos rádios virtuais sejam criados ao mesmo tempo em cima da infraestrutura de um rádio físico. Em outras palavras, a virtualização do rádio provê a capacidade de que múltiplos rádios sejam personalizados para um objetivo específico e, ao mesmo tempo, compartilhem os recursos de uma mesma plataforma. Tipicamente a virtualização inclui os blocos de comunicação digitais e protocolos de rede. Observe, entretanto, que algumas partes do rádio físico não podem ser emuladas em *software*, como é o caso das antenas e módulos analógicos. Assim, o

objetivo de utilizar a virtualização nesta plataforma de rádio é permitir o compartilhamento e virtualização de alguns dos recursos do rádio, tornando possível a implantação de diversos padrões ao mesmo tempo.

Em um ambiente de comunicações sem fio, surgem alguns desafios para a virtualização, dentre os quais merecem destaque o suporte para mobilidade dentro de uma rede virtual e a isolamento entre as redes virtuais para que não haja colisão ou interferências entre elas.

A Figura 3.5 ilustra várias instâncias de rádios semi-virtuais sendo utilizadas sobre uma plataforma de rádio virtualizado, que pode ou não utilizar um *hypervisor* [118]. O *hypervisor* é um programa de computador que cria uma camada de abstração entre *hardware* e *software*. Para que isso seja possível é necessário ter um controle de recursos disponíveis na plataforma tanto de *software* quanto de *hardware*. Portanto, é função do GA se comunicar com o *hypervisor* para determinar a quantidade de recursos totais disponíveis e a quantidade sendo utilizada por cada rádio semi-virtual. Neste cenário, o detentor de uma plataforma de rádio pode comercializar os recursos ociosos desta plataforma para outras operadoras que desejam implantar um serviço, mas que não querem investir em infraestrutura física.

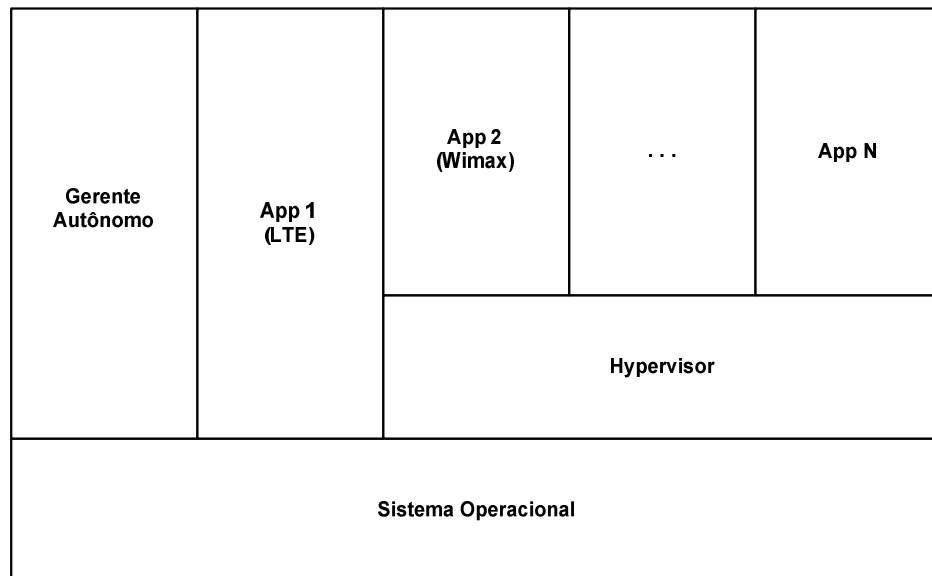


Figura 3.5. Virtualização dos recursos de rádio.

3.2.3 Desacoplamento de Identificador e Localizador de

Hosts

O aumento do número de dispositivos com capacidade de geração de conteúdo e a disseminação do uso da Internet levantam uma série de limitações na rede atual, tais como a distribuição de conteúdo, segurança, dependência do conteúdo com a localização, conectividade múltipla e mobilidade dos dispositivos. O desacoplamento de identificador e localizador é uma forma de solução para esses problemas nas redes de próxima geração. Diversas linhas de pesquisas [84], [85] e [86] tem visto a mudança para o foco no conteúdo como a transição para a terceira geração de redes. Segundo esses trabalhos, a primeira geração foi caracterizada por ambientes totalmente cabeados e a disseminação da telefonia, a segunda é direcionada a interconexão cabeada apoiada na pilha de protocolos TCP/IP. E a terceira geração de redes são as redes centradas no conteúdo, que são caracterizadas pela interconexão e disseminação da informação em larga escala e pelo suporte à mobilidade. Neste paradigma, todas as ações da rede são focadas no processamento e troca de informações, independentemente de onde a informação esteja localizada.

Então, nesta proposta de plataforma para o rádio oportunista, utiliza-se o desacoplamento de identificador e localizador para dar suporte a estes requisitos das redes de nova geração. Com isso, objetiva-se que cada dispositivo tenha um identificador único e que possa ser identificado independente da rede em que esteja conectado.

Nesta abordagem, a segurança é incrementada, pois a identificação permanece a mesma independente da localização. Isso permite um maior controle da identidade dos dispositivos na rede e também identificar culpados por ataques e fraudes. Por outro lado, a facilidade de identificação única dos dispositivos pode resultar em um problema de privacidade para os usuários. Logo, esta questão deve ser tratada com atenção na elaboração da plataforma da rede.

A mobilidade nas futuras redes permitirá que os usuários possam se mover não apenas dentro da sua rede local, mas também mudar de rede de acesso sem que a conectividade seja interrompida e sem ter seus identificadores trocados.

A escalabilidade pode ser alcançada usando funções *hash* para realizar o esquema de nomeação e posterior identificação das entidades na rede. Esta função de

compressão gera um resultado “resistente a colisões”, pois valores diferentes na entrada desta função vão gerar códigos diferentes na saída. Portanto, mesmo essa função gerando nomes opacos, tornam-se muito interessantes para poder gerar uma grande quantidade de nomes sem que ocorram colisões. Serão necessários mecanismos para resolver essas indireções na rede e assim, identificar os dispositivos. Essa esta característica já está intrínseca nas soluções de desacoplamento de identificador e localizador e com isso, será possível se referir a qualquer dispositivo independentemente da rede. Contudo, os sistemas de nomes devem ser criados considerando que:

- o esquema de nomeação deve ser genérico, possibilitando nomear qualquer tipo de entidade, com propriedades e atributos diferentes, incluindo objetos estáticos e dinâmicos, nós de rede, pessoas, entidades do mundo real, tais como lugares e objetos;
- o esquema de nomeação deve ser projetado para ser flexível e expansível, permitindo integrar outras propriedades, como as de segurança, para controle de acesso, por exemplo;
- o esquema de nomeação deve ter escopo global e ser inequívoco para identificar as informações;
- a cada entidade diferente deve ser associado um ID (identificador) único em um dado escopo;
- a segurança deve ser relacionada diretamente à informação, e pode ser garantida através do esquema escolhido para nomeá-la. A cada objeto de informação deve ser dado um nome único com propriedades de auto-certificação;
- o esquema de nomeação deve possuir um mecanismo de resolução de nomes que seja escalável.

3.2.4 Gerente Autônomo do Rádio Cognitivo

Com as informações apresentadas nas seções anteriores é possível definir todas as funcionalidades necessárias para o GA. A Figura 3.6 apresenta as principais funcionalidades do GA, que visam: i) controlar todos os recursos e elementos ligados

a ele, assim como criar mecanismos para se comunicar com outros gerentes e redes tanto novas, como legadas; ii) agir de acordo com o ciclo de auto-organização para melhor entender o ambiente em que se encontra; iii) analisar informações e criar planos de ações para melhor utilização dos recursos; iv) lidar com a segurança e confiabilidade da comunicação; v) apresentar um esquema de resolução de indireções e desacoplamento de identificador e localizador, para que a rede possa suportar a mobilidade existente, principalmente em um ambiente de rádio, e possibilitar conectividade múltipla; vi) prever o sensoriamento do ambiente de rádio para atingir um nível cada vez mais elevado de conhecimento do ambiente (*situation-awareness*), bem como um registro do histórico de configurações e parâmetros usados (*self-awareness*); vii) e, vislumbra o uso da virtualização possa implementar mais de um rádio em uma mesma plataforma ao mesmo tempo.



Figura 3.6. Gerente Autônomo.

3.3 Especificação de uma Plataforma de Referência para o Rádio Oportunístico

Nesta seção, será apresentado um modelo de plataforma de referência para que se possa implantar um rádio cognitivo com todos os recursos citados anteriormente. Essa plataforma deve ser composta por componentes em *hardware* e *software*, e tem como meta criar um ambiente flexível que permita a experimentação em redes cognitivas, autônomas, virtuais e evolucionárias, controlando e modificando o *hardware* de acordo com o *software*.

O grande dilema desta plataforma é justamente definir qual o dispositivo mais adequado para compor o *hardware* de um RC. Como o RC realiza diversas tarefas simultâneas, o processamento dedicado será necessário. Este processamento pode ser executado em FPGA (*Field Programmable Gate Array*) [119], DSP (*Digital Signal Processor*) [120] ou ASIC (*Application Specific Integrated Circuits*) [121]. A utilização de DSPs permite que os blocos que compõem as camadas física e MAC (*Media Access Control*) do rádio possam ser implantadas em *software*, o que garante maior flexibilidade de mudança, atualização ou evolução. No entanto, os DSPs executam as instruções serialmente, o que significa que as taxas de *clock* do processador podem ser proibitivamente elevadas para viabilizar a comunicação em taxas compatíveis com os mais recentes padrões de comunicação. Isso significa que a utilização de DSP pode implicar em uma redução da capacidade de vazão da plataforma de rádio.

A utilização de dispositivos dedicados (ASICs) permite taxas de comunicação elevadas com alta eficiência energética. No entanto, estes componentes não permitem mudanças significativas de sua estrutura, limitando as alterações a níveis de parâmetros do sistema de comunicação, como a ordem da modulação, taxa de codificação de canal e largura de faixa. Logo, os ASICs não oferecem o nível de flexibilidade necessário para permitir a adequação das camadas física e MAC.

Os FPGAs são dispositivos que permitem a reorganização dos seus elementos lógicos, viabilizando a alteração da estrutura de *hardware* e a adição de novas funcionalidades. Ao mesmo tempo, estes dispositivos possuem a capacidade de executar diferentes tarefas em paralelo, o que viabiliza as taxas de comunicação

elevadas. O fato das implantações em FPGA consistirem em implantação em *hardware* significa que é possível obter um desempenho próximo dos ASICs, mas mantendo a flexibilidade próxima daquela oferecida pelos DSPs. Logo, o FPGA é o dispositivo adequado para suportar os blocos que formam as camadas físicas e MAC de um rádio cognitivo.

O FPGA é composto por três tipos principais de recursos, os blocos lógicos, os blocos de entrada e saída I/O (*Input/Output*) e as chaves programáveis de interconexão conforme ilustrado na Figura 3.7. Os blocos lógicos são organizados em linhas e colunas e as chaves de interconexão programáveis são dispostas de forma a possibilitar a conexão dos blocos lógicos da maneira que for conveniente, além de conectar estes aos blocos de I/O. Quando se implanta um circuito em FPGA, os blocos lógicos são configurados de forma a realizar as operações lógicas necessárias e as chaves de interconexão estabelecem as conexões entre os blocos de maneira a se obter o resultado lógico final exigido pelo projeto.

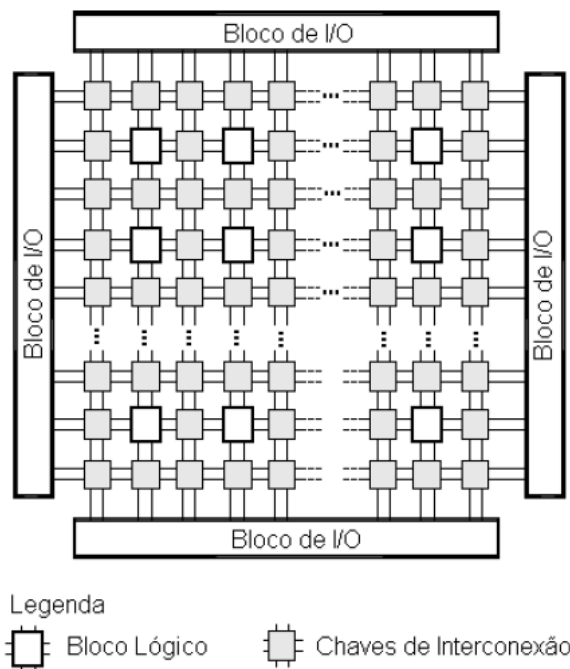


Figura 3.7. Estrutura básica do FPGA.

Os FPGAs não são adequados para a execução de funções condicionais e

iterativas, pois o consumo de recursos para implantações de estruturas *for*, *while*, entre outras, torna-se proibitivo. O mesmo ocorre com operações em ponto flutuante, que demandam um elevado número de elementos lógicos para sua implantação. Por esta razão, algumas das funcionalidades de gerência, controle, estimação e cognição do rádio deverão ser executadas em um ambiente mais propício, como por exemplo, sobre um GPP. O uso conjunto do FPGA com o GPP permite uma maior vazão e maior flexibilidade para a plataforma.

A parte de *software* deve utilizar pacotes que acompanham o *hardware*, bem como *softwares* livres já existentes no mercado para aplicações em rádio cognitivo como, por exemplo, o *GNU Radio*. A parte de *software* envolve uma variedade de linguagens de programação, algoritmos e *middleware*. Algumas soluções que podem ser empregadas são CORBA (*Common Object Request Broker Architecture*) [122] e MRV (Máquina de Rádio Virtual) [123]. Quanto ao processamento em *software*, as MRV representam uma maior flexibilidade e portabilidade do *software*, com custo reduzido e integração do mercado militar ao comercial, de forma a absorver todas as pesquisas realizadas na área de comunicações bélicas às linhas de produção comerciais, reduzindo os custos dos produtos militares [124]. A MRV, em conjunto com as Máquinas Virtuais Java JVM (*Java Virtual Machine*), simplificam o ciclo de desenvolvimento, uma vez que formam um *middleware* comum para os desenvolvedores de *hardware* e de *software*. Algumas indústrias já desenvolvem *chips* que permitem a execução direta de códigos Java e versões em tempo real estão sendo propostas [124].

A modelagem Orientada a Objetos OO (*Object Oriented*) tem sido adotada nas pesquisas e desenvolvimentos de rádios definidos por *software* (RDS) [124] e oportunistas. Neste sentido, cada conjunto de ações no rádio é representado por classes com suas propriedades e processos inerentes. A reconfiguração do rádio consiste em realizar uma instanciação das classes modeladas. O UML (*Unified Modeling Language*) [125] tem sido adotado para realizar esta modelagem. O CORBA, por exemplo, permite incorporar métodos de forma a realizar funções de despacho, distribuir e invocar remotamente objetos e métodos distribuídos em uma rede de comunicações.

Para suportar todos os *softwares*, assim como a virtualização, será

necessário utilizar um GPP na plataforma proposta, que deve estar apto a executar *softwares* livres, como o *GNU Radio*, para desenvolver os blocos de camada física e MAC, ou até mesmo desenvolver um *software* próprio para realizar tal tarefa. Novos blocos e funcionalidades podem ser primeiramente desenvolvidos em *software* para análise de desempenho. Uma vez comprovada a eficácia do novo bloco, este pode ser implantado em *hardware* em um FPGA, aumentando a eficiência do rádio. Portanto, é necessário que haja uma entidade na plataforma que avalie o desempenho dos novos blocos e faça a conversão de *software* para *hardware*, além de fazer a correta reprogramação do FPGA. A quantidade de memória necessária na plataforma depende das aplicações que deverão ser suportadas. Testes com a plataforma SORA demonstraram que 2 Gbytes de RAM (*Random Access Memory*) são suficientes para as aplicações tais como o enlace de subida do LTE e ponto de acesso Wi-Fi. O uso da virtualização aumentará a demanda por memória, logo, a quantidade de memória necessária na plataforma proposta neste trabalho será maior. Para viabilizar a implantação de até dois rádios virtuais em uma mesma plataforma, estima-se que serão necessários 6 Gbytes de RAM.

O processador a ser empregado deve possuir capacidade de executar as funções de gerenciamento e, eventualmente, até mesmo permitir a implantação de funcionalidades do rádio. Por isso, o GPP deve possuir múltiplos núcleos, além de possuir um *clock* de operação compatível com as demandas das aplicações. O sistema computacional deverá possuir um barramento PCIe e portas USB 3.0 (*Universal Serial Bus*). Essas interfaces permitirão a conexão com placas de entrada e saída dos sinais de rádio, servindo como *front end* da plataforma. O *front-end* é responsável por realizar funções das camadas física e MAC, além de implementar a conversão de sinais, tanto digital para analógico quanto analógico para digital, realizar as conversões de frequência e amplificação dos sinais.

A Microsoft desenvolveu uma placa aceleradora denominada de RCB que permite a execução de blocos de camada física e MAC desenvolvidos em *software*. A conexão desta placa com o GPP é realizada através do barramento PCIe. A RCB consegue altas taxas de dados com baixa latência, podendo comunicar até com dois *front ends* ao mesmo tempo, mas há suporte apenas para dois tipos de soluções de *front-end*, o WARP e USRP. A placa RCB possui outra limitação que é a restrição de

sistema operacional, pois sua utilização é exclusiva ao Windows™.

Já o GNU *Radio* utiliza o USRP como solução de *front-end* através da interface USB. No entanto, o USRP não possui elevada capacidade de processamento, permitindo apenas a implantação de algumas funcionalidades como filtragem e amostragem, além da conversão de frequência e amplificação. Portanto, todas as demais funcionalidades de camada física e MAC deverão ser implantadas em *software* e executadas pelo GPP, o que limita a vazão total do sistema. Na prática, o GNU *Radio* não permite obter as vazões equivalentes aos mais recentes sistemas de comunicação digital [49].

Utilizar FPGAs para execução das funcionalidades da camada física e talvez algumas da MAC é uma solução mais interessante. Pois, viabiliza elevada taxa de transmissão e ainda assim, permite a flexibilidade necessária para a plataforma de referência. O problema de se empregar o FPGA é que o dispositivo se torna inoperante durante o processo de gravação e programação. Desta forma, toda vez que uma nova funcionalidade precisar ser gravada no FPGA, será necessário interromper a comunicação. Para evitar este problema, pode-se empregar dois FPGAs distintos, que funcionem em paralelo. Enquanto um FPGA estiver sendo empregado para implantar a camada de comunicação, o outro FPGA pode ser utilizado para avaliar e validar uma nova funcionalidade. Uma vez verificado que o funcionamento da nova funcionalidade é averiguado, o FPGA de teste e validação passa a atuar como FPGA de comunicação, enquanto que o FPGA até então utilizado na comunicação assume o papel de FPGA de teste e validação. Nesta solução, ainda é possível empregar uma placa aceleradora que poderá implementar funcionalidades das camadas física e MAC em *software*, que serão executadas em núcleos de processamento dedicados para esta operação. O objetivo desta placa aceleradora é executar as funcionalidades que demandam operações com ponto flutuante, que seriam proibitivas em *hardware*. Assim, é possível permitir a evolução do sistema de comunicação com o mínimo de interrupção na comunicação. A Figura 3.8 apresenta o diagrama em blocos simplificado da plataforma proposta neste artigo.

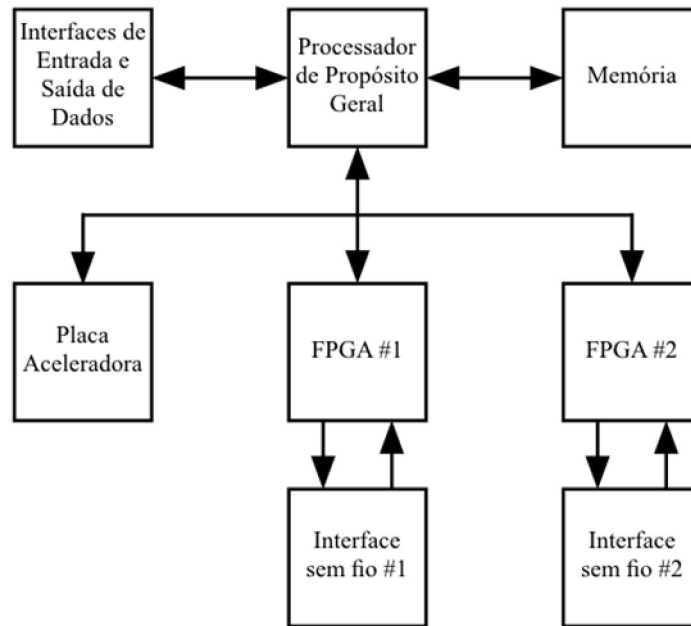


Figura 3.8. Diagrama em blocos simplificado da estrutura da plataforma proposta.

É importante ressaltar que o *front end* deverá ser um transceptor de RF completo. Em princípio, a proposta é que a plataforma tenha, no mínimo, dois transceptores, possibilitando o uso de MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) [126] ou, com a utilização da virtualização fazer com que até dois padrões de comunicação possam ser implementados ao mesmo tempo.

A geração do sinal a ser transmitido depende do padrão de comunicação digital que se deseja implantar. Como cada bloco da cadeia de transmissão pode ser implantado em *hardware* ou *software*, é necessário estabelecer uma estratégia de distribuição de tarefas. A solução proposta para esta plataforma consiste em fornecer um endereço para cada bloco do sistema. Uma função de roteamento roteia as informações a serem processadas para cada bloco. Após o processamento, o bloco encaminha os dados para função de roteamento, que se encarrega de enviá-los para o próximo bloco. Neste caso, o barramento lógico de entrega dos pacotes é comum tanto para os blocos implantados em FPGA, quanto para os blocos implantados com *software*.

Para ilustrar esta função de roteamento, considere que o diagrama em blocos apresentados na Figura 3.9 deva ser implementado.

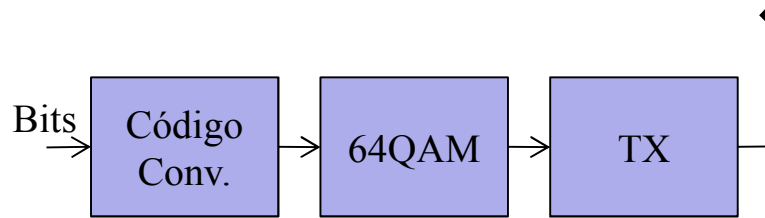


Figura 3.9. Diagrama em blocos de um sistema de transmissão a ser implementado na plataforma proposta.

Assim, para implantação do diagrama em blocos apresentado na Figura 3.9, basta que a função de roteamento encaminhe os pacotes de forma ordenada para cada bloco de processamento. Alguns dos blocos de funcionalidades podem estar implantados em *software*, a função de roteamento roteará os pacotes para uma interface apropriada no sistema operacional, como por exemplo, USB ou PCIe. Esta interface entregará os pacotes a um PGS (*Proxy Gateway System*), que roteará os pacotes para os processos apropriados da plataforma de referência. O PGS é um processo do sistema operacional nativo ou virtualizado. Caso alguma nova funcionalidade precise ser executada, então a função de roteamento inserirá esse salto no trajeto de execução para contemplar a nova situação. A Figura 3.10 ilustra o processo onde é possível alterar a sequência de processamento de transmissão para contemplar uma nova funcionalidade.

A estrutura lógica do sistema de transmissão da plataforma pode ser representada pelo diagrama em blocos da Figura 3.11, onde os blocos de funcionalidades das camadas MAC e física podem estar implementados tanto em *software*, por exemplo, em processos individuais no sistema operacional, quanto em *hardware*, como blocos lógicos no FPGA.

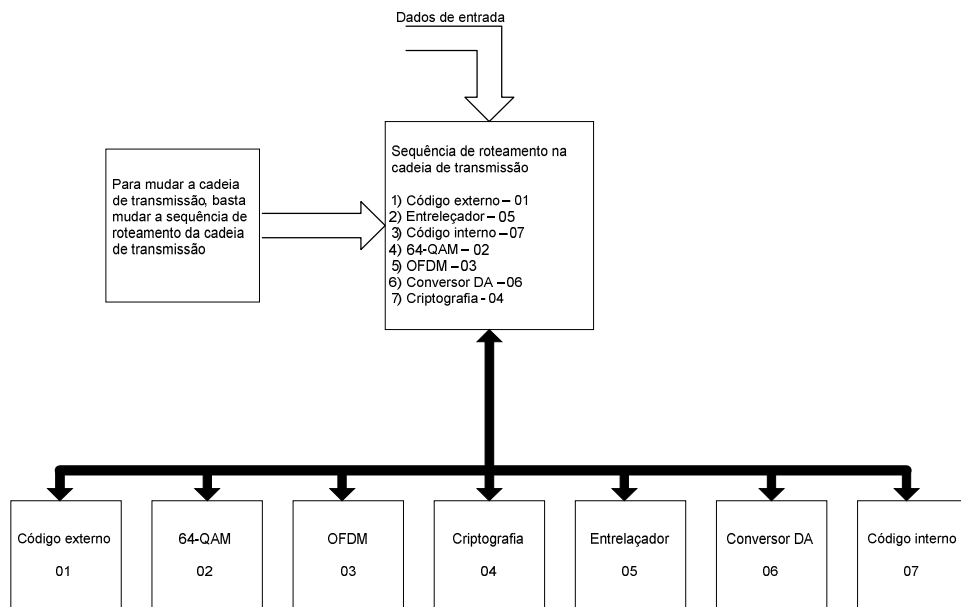


Figura 3.10. Processo de atualização da sequência de roteamento na cadeia de transmissão.

O barramento de controle e configuração ilustrado na Figura 3.10 é utilizado para alterar os parâmetros dos blocos, informar o comprimento útil do conteúdo dos pacotes destinados a cada bloco e também para a criação de novas funcionalidades.

Além dos blocos do sistema de transmissão, a estrutura de *software* da plataforma de referência inclui os protocolos de rede, o *hypervisor*, os PGSS e o Gerente Autônomo, conforme ilustrado na Figura 3.12.

Finalmente, a Figura 3.13 ilustra a especificação da plataforma de referência completa para os equipamentos de rádio das futuras redes sem fio.

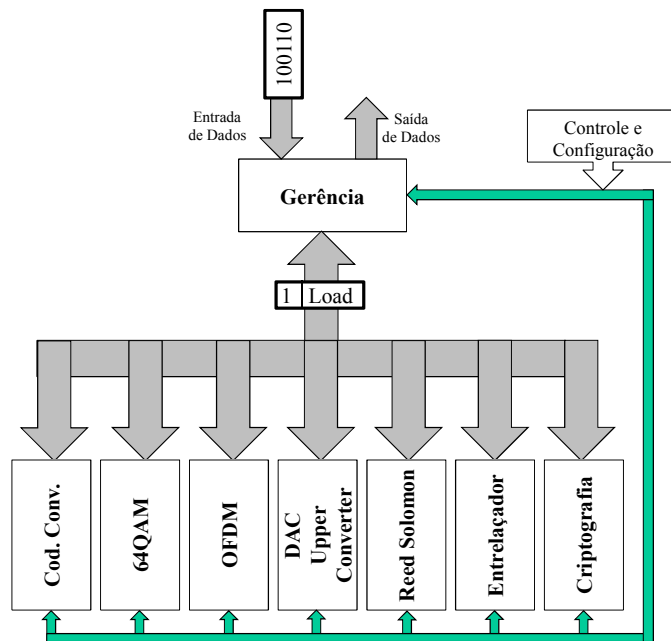


Figura 3.11. Diagrama lógico da plataforma de Rádio Cognitivo.

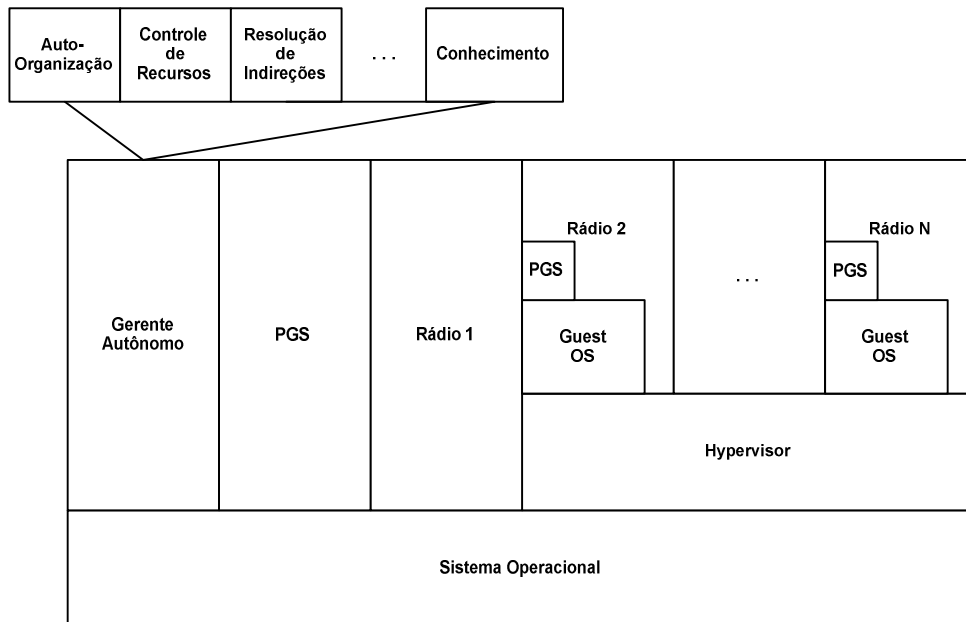


Figura 3.12. Estrutura de *software* da plataforma de referência.

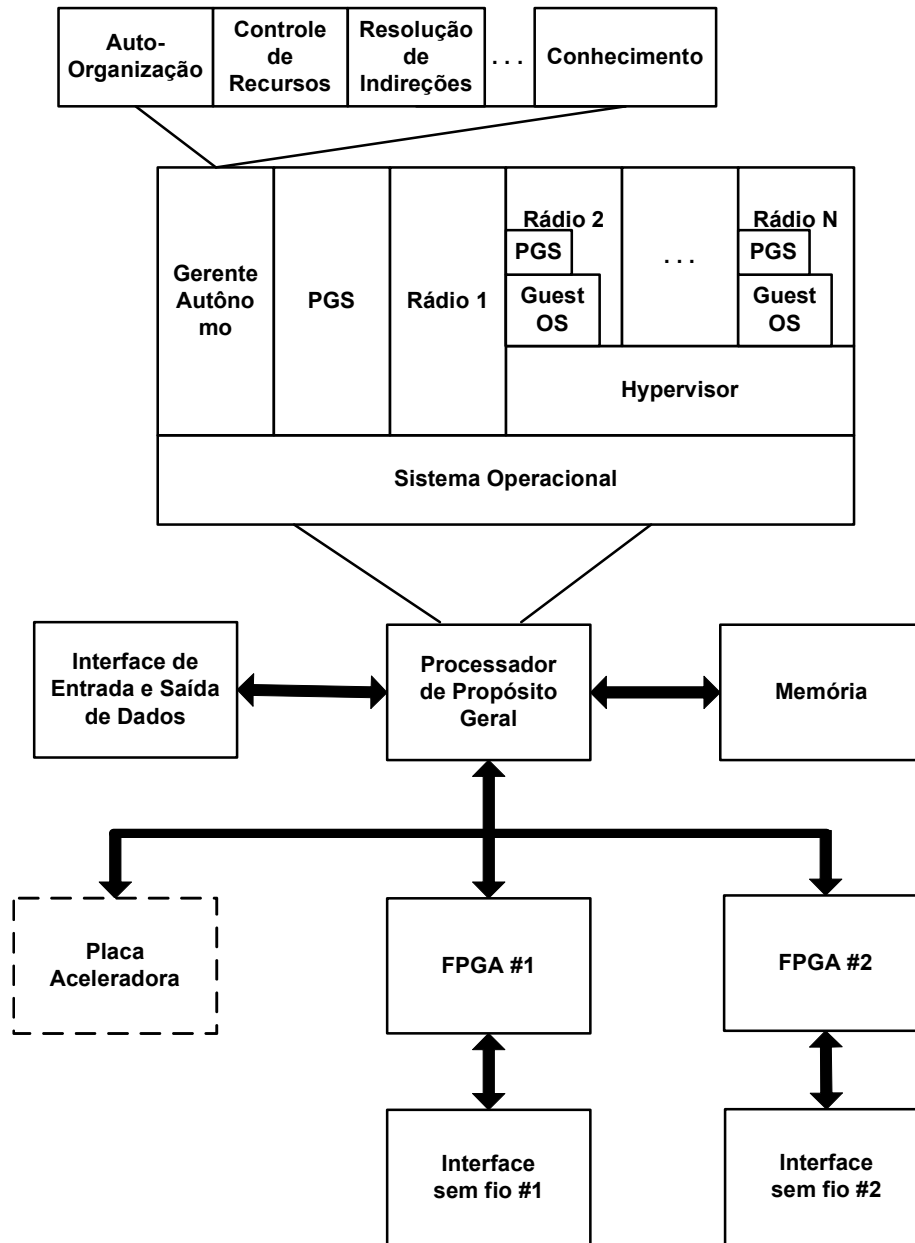


Figura 3.13. Especificação da Plataforma Referencial Convergente para a nova Geração de Redes sem fio.

3.4 Comparação das Abordagens Existentes com a Plataforma de Referência

Nesta seção é apresentada uma análise comparativa das plataformas de rádio existentes com a plataforma de referência proposta neste trabalho. Essa

comparação é feita para mostrar no nível conceitual ganhos que a plataforma de referência traz em relação às existentes. A Tabela 1 apresenta os resultados dessa comparação considerando os diversos requisitos elencados na nessa dissertação.

Tabela 1. Comparação das plataformas de rádio existentes com a plataforma referencial proposta.

Características/Projeto	E ³	GNU RADIO	SORA	WiNC2R	CREW	Self-NET	Plataforma Referencial Proposta
Aquisição e Síntese de Conhecimentos	Utiliza o (CCR – <i>Cognitive Control Radio</i>) para troca de informação visando aquisição de conhecimento, principalmente relacionado ao sensoriamento de espectro.	Não foram encontrados relatos de iniciativas específicas para aquisição e síntese de conhecimentos. Apenas troca de informações relacionadas a sensoriamento de espectro.	Idem GNU Radio.	Idem GNU Radio.	Utiliza a metodologia OMF para coleta e armazenamento de dados.	Utiliza protocolos de monitoramento tradicionais para coleta de dados (ex. SNMP) via componente NEC. A síntese de conhecimento é feita por um componente de correlação que emprega lógica <i>fuzzy</i> .	Aquisição distribuída baseada em contratos entre parceiros. Suporte para ampla gama de opções de coleta. Síntese empregando inteligência artificial.
Sinalização de Conhecimentos Obtidos	Utiliza o (CCR – <i>Cognitive Control Radio</i>) para troca de informação entre os dispositivos da rede, possibilitando a troca de mensagens de negociação, regulação e ciência do ambiente em que o rádio se encontra.	Não foram encontrados relatos de iniciativas específicas sinalização de conhecimentos.	Idem GNU Radio.	Idem GNU Radio.	Dependente das plataformas utilizadas. Em geral, baseada em <i>web</i> e transportada por TCP/IP, USB, Wi-Fi, Ethernet.	Sinalização entre componentes via “quadro negro”. Troca de conhecimentos entre gerentes cognitivos.	Sinalização mediante contratos seguros de divulgação entre gerentes parceiros.
Sensoriamento Espectral	O projeto prevê formas de sensoriamento cooperativo de espectro através do CCR. O CCR contém funções como: compartilhamento de esforço de sensoriamento, requisição para sensoriamento de espectro, coordenação dos períodos de silêncio no sensoriamento, dentre outras.	Implementação de técnicas de detecção de energia e detecção por filtros casados nos elementos. O projeto WiNC2R também utilizou o GNU para implementar o CCCC (<i>Common Spectrum Coordination Channel</i>) visando o sensoriamento de espectro.	Implementação do sensoriamento de espectro apenas para o padrão IEEE 802.11 a/b/g nos seus elementos.	Utiliza o CCCC para realizar o sensoriamento de espectro. Há uma ampla gama de possibilidades incluindo sensoriamento cooperativo e <i>standalone</i> .	Ampla gama de possibilidades, incluindo sensoriamento <i>standalone</i> , distribuído e cooperativo.	Utiliza monitoramento da relação sinal-ruído feito pelos próprios elementos. Não está claro o suporte para sensoriamento espectral <i>standalone</i> , distribuído ou colaborativo.	O objetivo é permitir que qualquer técnica de sensoriamento espectral seja usado, em especial as colaborativas/distribuídas. Os gerentes coordenam o sensoriamento através de contratos de colaboração.
Controle de Acesso ao Meio	Utiliza dois algoritmos desenvolvidos pelo projeto para acesso ao meio que são: C3MAC/JPRC.	Baseado em técnicas tradicionais de acesso ao meio, como o CSMA, TDMA, Aloha. Permite a implementação de novas abordagens para a MAC.	Permite implementar novas técnicas de múltiplo acesso, bem como técnicas já consolidadas. Um exemplo de nova abordagem é o CCMA (<i>Carrier Counting Multiple</i>	Permite implementar novas técnicas de múltiplo acesso, bem como técnicas já consolidadas.	Parâmetros otimizados por dados de sensoriamento. Ciclo de monitoramento de parâmetros chaves (colisões, tempos vagos, etc.), decisão e	Baseado nas tecnologias atuais, ex. Wi-Fi, WiMAX, LTE. Auto-configuração de parâmetros.	Permitir a fragmentação dos protocolos atuais em blocos funcionais contratados dinamicamente como serviços. Tomada de decisão baseada em monitoramento distribuído.

			<i>Access</i>).		execução.		
Suporte a Redes Legadas	Permite a inicialização, reprogramação, reconfiguração e controle de parâmetros de dispositivos principalmente nas tecnologias LTE e WiMAX.	A interoperabilidade com redes tradicionais é possível, em especial Wi-Fi e GSM.	A interoperabilidade com redes tradicionais é possível, em especial Wi-Fi e LTE.	A interoperabilidade com redes tradicionais é possível.	Permite a inicialização, reprogramação, reconfiguração e controle de parâmetros de dispositivos em várias tecnologias tradicionais.	Permite a inicialização, reprogramação, reconfiguração e controle de parâmetros de dispositivos em várias tecnologias tradicionais.	Interoperação flexível via <i>Proxy/Gateways</i> para cada interface de rede legada.
Virtualização	Nada é mencionado no projeto sobre a virtualização de partes do rádio.	Virtualiza várias partes do rádio. Como o projeto é um pacote de <i>software</i> , pode rodar em uma máquina virtual.	Virtualiza várias partes do rádio. Como o projeto é um pacote de <i>software</i> , pode rodar em uma máquina virtual.	Virtualização do fluxo de processamento da camada física.	Suportada em algumas plataformas. A IRIS permite a virtualização de componentes do rádio. Suporte para GNU Radio em algumas plataformas.	Nada é mencionado no projeto sobre a virtualização de partes do rádio.	Virtualização de parte do rádio como serviços, direto sobre a máquina física ou em máquinas virtuais. Flexibilidade para implementar funcionalidades do rádio tanto em <i>software</i> , quanto em <i>hardware</i> .
Desacoplamento de Identificadores e Localizadores	Fora do escopo do projeto. Utiliza os nomes, identificadores e endereços de acordo com cada tecnologia de rede empregada.	Idem E ³	Idem E ³	Idem E ³	Idem E ³	Idem E ³	Nativo em todas as entidades e conteúdo. Nomes auto-certificáveis como identificadores.
Controle de Recursos	Usa a entidade AEM (<i>Autonomic Entity Management</i>) para manter informações atualizadas sobre as capacidades e estado dos dispositivos.	Não foram encontrados mecanismos para controle de recursos do rádio físico.	Idem GNU Radio	Idem GNU Radio	Dependente das plataformas utilizadas. Emprega servidores para controle e gerência dos recursos federados.	Os gerentes cognitivos provêm a gerência distribuída de recursos de substrato.	Exposição dos recursos de <i>hardware</i> através de <i>Proxy/Gateways</i> , permitindo a orquestração conjunta de recursos físicos e serviços.
Resolução de Indireções	Fora do escopo do projeto. Utiliza mecanismos existentes nas tecnologias empregadas.	Idem E ³	Idem E ³	Idem E ³	Idem E ³	Idem E ³	Nativa, via serviço específico para resolução distribuída de indireções.
Migração/Evolução	Emprega <i>hardware</i> flexível, reprogramável, reconfigurável. Protocolos implementados em <i>software</i> o que pode facilitar a evolução.	Idem E ³ . Não há padronização de interface de configuração de parâmetros no <i>hardware</i> .	Idem GNU Radio.	Idem GNU Radio.	Idem E ³ . Utiliza a interface WinNF (<i>Wireless Innovation Forum</i>) para criar abstrações do <i>hardware</i> , facilitar programação e interoperabilidade.	Desacopla o “plano cognitivo” dos demais planos da rede (i.e. dados, controle e gerência). Facilita a migração de redes de tecnologias tradicionais para redes autônomicas.	Emprega <i>hardware</i> flexível, reprogramável, reconfigurável. Alguns protocolos podem ser implementados em <i>software</i> , na forma de serviços de redes. Abstração do <i>hardware</i> e controle via <i>Proxy/Gateways</i> .
Mobilidade	Suporte tradicional à mobilidade e <i>handover</i> .	Suportada em projetos específicos. Ex.: Plataforma desenvolvida no <i>Wireless and Mobile Network Laboratory</i> , Universidade Nacional de Taipei, Taiwan. Outro exemplo é o projeto OpenBTS.	Não foram encontrados relatos sobre o suporte à mobilidade e <i>handover</i> envolvendo projetos com a plataforma.	O suporte à mobilidade e <i>handover</i> envolvendo projetos com a plataforma não está claro.	Suporte tradicional à mobilidade (ex. LTE). Curiosamente, emprega robô para simular a mobilidade física de terminais.	Suporte tradicional à mobilidade e <i>handover</i> .	Suporte nativo a mobilidade de todas as entidades e conteúdos utilizando o sistema de resolução entre nomes auto-certificáveis. (ou SCNs).

Gerente Autônomo	Implementa parte das funções esperadas em um gerente autônomo, mais especificamente aquelas relativas à auto-configuração e auto-otimização.	Implementa parte das funções esperadas em um gerente autônomo, mais especificamente aquelas relativas a auto-configuração para adaptar os elementos as oportunidades de espectro encontradas. Outras propriedades foram encontradas em projetos que se baseiam na plataforma.	Implementa parte das funções esperadas em um gerente autônomo, mais especificamente aquelas relativas a auto-configuração para adaptar os elementos as oportunidades de espectro encontradas.	Implementa parte das funções esperadas em um gerente autônomo, mais especificamente aquelas relativas a auto-configuração e auto-otimização.	Servidores implementam parte das funções esperadas em um gerente autônomo, mais especificamente aquelas relativas a auto-configuração e auto-otimização.	Gerentes cognitivos implementam ampla gama de propriedades auto-*	Suporte para a implementação de uma ampla gama de propriedades auto-* nos gerentes autônômicos, incluindo o uso cognitivo do espectro.
Auto-Organização e Ciclo de Decisão	Auto-organização de canais de controle. Ciclo de decisão de uso oportunístico do espectro e de controle de múltiplo acesso.	Encontramos exemplos de implementação de ciclo de decisão de uso oportunístico do espectro e de controle de múltiplo acesso em projetos que utilizam a plataforma.	Encontramos exemplos de controle de múltiplo acesso em WLAN. O ciclo de decisão é voltado para colisões na MAC. Outro exemplo é voltado ao controle de sobreposição de canais em <i>Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM)</i> .	Implementa algumas funções de auto-organização, principalmente no que diz respeito à auto-otimização, como o ajuste de parâmetros de transmissão dos rádios.	Auto-organização de canais de controle. Ciclo de decisão de uso oportunístico do espectro e de controle de múltiplo acesso.	Ciclo de decisão hierárquico e distribuído. Auto-organização de elementos de rede, domínios e da rede.	Objetiva a criação de uma hierarquia de ciclos de decisão. Auto-organização de protocolos, elementos de rede, domínios e da rede como um todo. Todos os serviços de rede apoiados por ciclos de decisão.
Regras/Políticas/ Perfil do Usuário	As entidades AEM e DSNPM são responsáveis por gerenciar os recursos de rádio da rede de acordo com políticas de uso pré-estabelecidas assim como, seu perfil de uso e preferência dos usuários.	Perfis de uso do rádio podem ser criados. Regras e políticas podem ser implementadas nos algoritmos.	Perfis de uso do rádio podem ser criados. Regras e políticas podem ser implementadas nos algoritmos.	Preocupação com os perfis de configuração dos rádios para não causar interferência uns nos outros.	Preocupação com a interferência. Perfis de configuração de plataforma de rádio.	Ampla suporte para definição de objetivos, regras, políticas. Tomada de decisão leva em conta as políticas traçadas.	Visa o amplo suporte a regras, políticas, regulações, perfis de uso, etc. Ciclo de decisão regrado pelo operador. Regras proativas, ou seja, que podem ser adaptativas.
Ciência do Ambiente	Obtida através de sensoriamento de espectro junto com a entidade AEM que também monitora o ambiente ao seu redor.	Pode ser obtida através de sensoriamento espectral.	Pode ser obtida através de sensoriamento espectral.	Pode ser obtida através de sensoriamento espectral.	Obtida através de sensoriamento espectral <i>standalone</i> ou distribuído.	Ampla suporte para formação da ciência do ambiente.	Obtida a partir de monitoramentos próprios e da ajuda de parceiros. Busca por ciência do ambiente mais abrangente do que a obtida somente através do sensoriamento espectral.
Auto-ciência	Utiliza a entidade AEM para manter atualizadas as informações sobre as aplicações cognitivas em uso.	Abstrações de <i>software</i> permitem auto-ciência das capacidades e estado da rádio.	Abstrações de <i>software</i> permitem auto-ciência das capacidades e estado da rádio.	Não está claro se a plataforma oferece recursos para auto-ciência em <i>software</i> .	Utiliza a interface WinnF para especificar as capacidades do <i>transceiver</i> ao <i>software</i> .	Ampla suporte para formação da auto-ciência.	Via capacidades e estado de recursos expostos internamente.

Nas plataformas GNU Radio, SORA e WinC2R a aquisição de dados é voltada somente ao sensoriamento espectral. Na plataforma CREW é utilizada uma interface padrão para a gerência, controle de experimentos, aquisição e armazenamento de dados chamada de OMF (*cOntrol and Management Framework*). A OMF foi proposta pelo *Winlab*, da Universidade *Rutgers*, visando o suporte a

experimentação com recursos cabeados e sem fio. Segundo a referência [127], através da interface OMF é possível coletar qualquer métrica de interesse nos equipamentos gerenciados, indo além do simples sensoriamento espectral. A proposta Self-NET utiliza os protocolos padrão de gerência para coleta de dados, uma vez que o gerente autônomo fica externo aos equipamentos da plataforma. Na plataforma do projeto E³ a aquisição de dados é atribuída ao componente CCR e focada no sensoriamento espectral. Na plataforma Self-NET, os NECs realizam a consulta e atualização periódica de métricas e parâmetros de desempenho, tais como relação sinal para interferência mais ruído SINR (*Signal to Interference plus Noise Ratio*), taxa de erro de pacotes, canais operacionais, etc. Esses dados são publicados no “quadro negro” dos gerentes autônômicos. Quanto à síntese de conhecimento, o projeto Self-NET emprega a lógica *fuzzy* para correlacionar os diversos dados publicados no “quadro negro”, buscando por padrões de eventos relevantes, como por exemplo interferência entre canais de frequência. Na plataforma referencial proposta, os diversos gerentes autônômicos devem estabelecer contratos para a coleta distribuída e colaborativa de dados.

Os dados serão publicados de forma segura aos parceiros da rede cognitiva usando nomes auto-certificáveis e analisados utilizando técnicas de inteligência artificial.

Quanto à sinalização de conhecimentos obtidos, a plataforma do projeto E³ confia essa tarefa também ao componente CCR. Já nas iniciativas GNU *Radio*, SORA e WiNC2R a troca de conhecimentos deve ser implantada pelo utilizador da plataforma, dado que não encontramos relatos sobre o suporte a essa funcionalidade na documentação dos projetos. Na plataforma do projeto CREW, os conhecimentos obtidos são transportados via *web*, enquanto no projeto Self-NET a sinalização ocorre entre gerentes cognitivos através da publicação no “quadro negro” de outros gerentes. Na plataforma de referência proposta, a aquisição e sinalização de conhecimento será feita através de contratos seguros que especificam onde, quando e como os dados, informações e conhecimentos de cada nó serão expostos para os parceiros. O objetivo é criar um alto nível de ciência do ambiente em que os dispositivos estão inseridos.

O sensoriamento de espectro é uma funcionalidade comum em todas as

plataforma analisadas. A plataforma de referência deve ser flexível o suficiente para permitir que qualquer técnica de sensoriamento espectral seja implantada. Além disso, deve suportar outros tipos de sensores, tais como sensores de estado de equipamentos e de meios de comunicação. De fato, a plataforma deve estar alinhada com a proposta da Internet de coisas IoT (*Internet of Things*), onde todos os tipos de sensores e atuadores fazem parte da Internet, ampliando o potencial dos *softwares* de controle.

Todas as plataformas investigadas permitem implantar as técnicas tradicionais de controle de múltiplo acesso em *software*, bem como novos protocolos. A plataforma do projeto E³ por exemplo, implanta os protocolos C3MAC e JPRC. Na plataforma SORA foi implantada uma abordagem de múltiplo acesso chamada CCMA (*Carrier Counting Multiple Access*). Quanto ao projeto CREW, uma arquitetura chamada WMP (*Wireless MAC Processor*) permite o desenvolvimento incremental de protocolos MAC flexíveis e capazes de se adaptar a mudanças de contexto. Essa arquitetura permite a implantação de um ciclo cognitivo de decisão para a MAC. Já a plataforma do projeto Self-NET utiliza os protocolos atuais de múltiplo acesso implantados nas tecnologias Wi-Fi, WiMAX e LTE, permitindo a auto-configuração de parâmetros desses protocolos. A plataforma de referência proposta preconiza a fragmentação e orquestração dinâmica de funcionalidades da MAC, sob demanda, com decisões de transmissão tomadas através de um ciclo de decisão alimentado por informações provenientes do monitoramento do ambiente real e da rede de conhecimento entre gerentes autônomos.

A interoperabilidade com redes de tecnologias já consolidadas foi outro aspecto considerado na comparação das plataformas de rádio flexível. As propostas GNU *Radio*, SORA e WiNC2R permitem que o SDR interopere com rádios tradicionais de tecnologias como GSM (*Global System for Mobile communication*), Wi-Fi, WiMAX, LTE, etc. A interoperabilidade se dá pela implementação no SDR da mesma tecnologia usada nos equipamentos tradicionais de rádio. Além desse tipo de interoperabilidade, as propostas E³, CREW e Self-NET permitem a inicialização, reprogramação, reconfiguração e controle de parâmetros de dispositivos de tecnologias já padronizadas de rádio. Na plataforma de referência proposta,

tecnologias tradicionais de rádio podem ser implantadas como serviços em *software*, sendo portanto capazes de interoperar com redes já instaladas de tecnologias padronizadas. Além disso, a plataforma propõe uma abordagem nova para a interoperabilidade de novos protocolos de rede com os já consolidados. O PGS atua na borda da rede da plataforma de referência proposta com as redes tradicionais. O PGS permite que novos formatos de mensagem sejam mapeados para quadros de tecnologias padronizadas, tais como Wi-Fi e WiMAX. Adicionalmente, o PGS representa dispositivos da rede tradicional dentro da rede da plataforma de referência, expondo os recursos desses dispositivos para a orquestração dinâmica conjunta de recursos e serviços. O PGS pode montar contratos com serviços de rede dentro do escopo da rede proposta, dando passagem a dispositivos de redes tradicionais.

Com relação à virtualização, os projetos GNU *Radio* e SORA permitem que partes do rádio sejam virtualizadas em *software*. No projeto WiNC2R também é possível executar em *software* partes do fluxo de processamento de informações da camada física. Quanto ao projeto CREW, algumas plataformas do projeto suportam a virtualização de componentes do rádio. Já a análise dos projetos E³ e Self-NET não revelou um suporte específico para esse fim. A plataforma proposta prevê a virtualização de partes do rádio como serviços, que são executados direto sobre máquinas físicas ou virtuais. Além disso, a plataforma objetiva permitir que funções com alto custo computacional possam ser migradas para o FPGA, e funcionalidades simples possam ser migradas do FPGA para o sistema operacional do PC.

O desacoplamento de identificadores e localizadores não é suportado por nenhuma das plataformas analisadas. Na plataforma de referência proposta, esse suporte é nativo para qualquer existência física ou virtual. Isso melhora o suporte a rastreabilidade, mobilidade, conectividade múltipla e segurança de entidades na plataforma. Até mesmo os conteúdos são nomeados e encontrados independentemente de sua localização na rede. A plataforma proposta também avança na questão de serviços para a resolução distribuída de indireções. Nenhuma das plataformas proposta possui esse recurso.

Quanto ao controle dos recursos de substrato, o projeto CREW emprega servidores que expõem e permitem a federação – agrupamento lógico – desses

recursos sob demanda. No projeto Self-NET os recursos físicos são gerenciados pelos gerentes cognitivos. No E³, o componente AEM (*Autonomic Entity Management*) mantém informações atualizadas sobre o estado dos dispositivos controlados. Já nas iniciativas restantes, o controle dos recursos do rádio físico parece não ter sido considerado como parte do escopo das plataformas. Na plataforma proposta, os recursos de substrato serão expostos para a orquestração por *software* através de componentes PGS. Além disso, os gerentes autônomicos poderão controlar parâmetros no rádio físico, refletindo alterações necessárias em função dos serviços da rede.

A preocupação com a migração e evolução acelerada do rádio é comum a todas as plataformas. Elas empregam *hardware* flexível, reprogramável e reconfigurável. Protocolos implantados em *software* podem evoluir de forma desacoplada do *hardware*. No projeto CREW, a interface WinnF permite a evolução do *hardware* para novas versões que podem ser expostas através da mesma interface. O Self-NET desacopla o plano de decisão cognitiva do plano de rede, permitindo a migração das tecnologias atuais para redes autônomicas. Assim, o plano cognitivo pode ser especializado para controlar e gerenciar novas tecnologias não autônomicas. Na plataforma de referência proposta, novos protocolos podem ser implantados em *software*, *hardware* ou na combinação de ambos. Abstrações do *hardware* podem ser publicadas por componentes PGS.

Com relação à mobilidade de terminais, o projeto E³ oferece em sua plataforma o suporte de mobilidade e *handover* existentes nas atuais tecnologias de comunicação móvel, como por exemplo WiMAX e LTE. O mesmo acontece nos projetos CREW e Self-NET. Alguns projetos que utilizam a plataforma GNU *Radio* complementam esses aspectos, como por exemplo o projeto *OpenBTS*. Nas propostas SORA e WiNC2R não foram encontrados relatos de suporte à mobilidade e *handover*. A plataforma de referência proposta visa expandir o suporte à mobilidade a qualquer entidade. Para tanto, propõem um sistema distribuído de resolução de indireções entre nomes auto-certificáveis. Essa abordagem permite que as entidades se movam sem a perda da identificação. Portanto, após um evento de mobilidade, faz-se a atualização dos mapeamentos entre nomes afetados, garantindo a coerência das comunicações e serviços.

Com relação à gerência autônoma ou cognitiva, encontramos no Self-NET o mais completo modelo. Os gerentes cognitivos Self-NET implementam uma ampla gama de propriedades auto-*. No projeto E³, parte das propriedades auto-* é implementada no gerente autônomo AEM. Nos projetos GNU *Radio* e SORA foram encontrados relatos de implementação da propriedade de auto-configuração necessária a exploração oportunística do espectro de eletromagnético. Nas iniciativas WinC2R e CREW, encontramos relatos das propriedades auto-configuração e auto-otimização. A plataforma de referência proposta considera a implementação de gerentes autônomos junto aos equipamentos de rádio, permitindo uma ampla gama de propriedades auto-*, incluindo o uso oportunístico do espectro de radiofrequência.

A auto-organização dos canais de controle da plataforma de rádio é suportada nos projetos E³ e CREW, que empregam ciclos de decisão para o uso oportunístico do espectro e para o controle de múltiplo acesso. Também encontramos projetos que implantam esses ciclos de decisão usando o GNU *Radio*. Na plataforma SORA, encontramos implantações de ciclos de decisão para controle de múltiplo acesso em WLAN e para controle de sobreposição de canais em OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). No projeto WiNC2R a auto-organização é voltada à otimização dos parâmetros de transmissão dos rádios. O Self-NET suporta ciclos de decisão hierárquicos e distribuídos para prover a auto-organização de equipamentos, domínios e da rede como um todo. A criação de hierarquias de decisão também é um dos objetivos da plataforma de referência proposta. A proposta é que todos os serviços de rede sejam apoiados por ciclos de decisão, permitindo a auto-organização hierárquica da rede.

No projeto E³, os operadores da rede podem definir políticas de uso de recursos, que são usadas para guiar a operação dos componentes AEM e DSNPM (*Dynamic Self-Organizing Network Planning and Management*). Além disso, os usuários podem determinar suas preferências e perfis de uso da rede. No projeto Self-NET existe um amplo suporte à definição de regras, objetivos, e políticas, que são especificadas através de ontologias adequadas. A tomada de decisão nos gerentes cognitivos leva em conta os *inputs* fornecidos pelos operadores e usuários humanos. Nos projetos CREW e WiNC2R existem perfis para configuração da plataforma de rádio. A maior preocupação é com a interferência nas transmissões. Nas plataformas

GNU *Radio* e SORA é possível se implantar perfis de uso, bem como regras e políticas que guiem o processo de decisão. Na plataforma proposta, o objetivo é suportar uma ampla gama de regras, políticas, regulações e perfis de uso implantados como objetos de informação nomeados. Tais objetos irão alimentar o ciclo de decisão nos gerentes autônomos.

A ciência do ambiente no projeto E³ é obtida a partir do sensoriamento espectral e outros monitoramentos realizados pelo componente AEM. No projeto CREW, também é feito o sensoriamento espectral, além da coleta de outros dados usando a metodologia OMF. No projeto Self-NET existe uma ampla estrutura de monitoramento e coleta de dados para formação da ciência do ambiente. As plataformas GNU *Radio*, SORA e WiNC2R podem ser usadas para fazer o sensoriamento espectral, permitindo a obtenção de dados do ambiente. Na plataforma proposta, os gerentes autônomos realizarão seus próprios monitoramentos, além de contar com a ajuda de gerentes parceiros.

Já com relação a auto-ciência, que é a ciência das capacidades e estados internos do rádio, no projeto CREW a interface WinnF é usada para se obter as capacidades do *hardware*. Na plataforma do projeto Self-NET existe um amplo suporte para a formação da auto-ciência a partir de publicações feitas no “quadro negro”. Nas propostas GNU *Radio* e SORA, é possível alimentar o *software* com informações do *hardware* existente. Entretanto, a automatização desse processo aparentemente exige componentes de *software* adicionais. Na plataforma de referência proposta, a auto-ciência deve ser obtida a partir da exposição dos recursos de *hardware* existentes e de suas capacidades e estado via componentes PGS.

3.5 Conclusão

Neste capítulo foi apresentado um modelo de referência para uma plataforma de rádio oportunístico que integra várias tecnologias chaves para as futuras redes sem fio. O modelo proposto é bastante flexível, avançando em diversas frentes quando comparado a outras plataformas de rádio flexível contemporâneas. Equipamentos de rádio projetados de acordo com o modelo de referência proposto estarão melhor alinhados com os avanços recentes nas áreas de “Internet do Futuro”, “Internet de Coisas” e “Redes Cognitivas”. E mais, poderão tirar proveito desses

avanços de forma convergente, sinérgica, e inteligente.

Quando comparada às plataformas existentes, a plataforma referencial proposta cobre alguns aspectos provenientes das pesquisas em “Internet do Futuro” não cobertos pelas demais plataformas analisadas. Alguns exemplos são: (i) a nomeação auto-certificável de equipamentos, serviços e informação; (ii) o desacoplamento abrangente de identificadores e localizadores para serviços e informação; (iii) a exposição de recursos de substrato via serviços de *Proxy/Gateway* (PGS); (iv) a orquestração conjunta de recursos de substrato, serviços e conteúdos; (v) o monitoramento cooperativo do ambiente baseado em contratos entre serviços de monitoramento; (vi) a fragmentação de protocolos em serviços de rede contratados sob demanda; (vii) a interoperação com redes legadas via componentes PGS; (viii) a resolução distribuída de nomes; (ix) o suporte abrangente a mobilidade e a conectividade múltipla; (x) a criação de hierarquias de ciclos de decisão nos gerentes autônomos; (xi) a síntese de conhecimentos (por exemplo, auto-ciência e ciência do ambiente) a partir da coleta de dados mais abrangente do que os de uso do espectro eletromagnético; (xii) a tomada de decisão baseada em ontologias que aproximam a linguagem dos operadores e usuários humanos da capacidade autônoma e cognitiva das máquinas. Em sumário, o modelo de referência proposto reúne de forma sinérgica diversos aspectos inovadores para as futuras redes sem fio e seus equipamentos e, que se acredita que a plataforma está bastante flexível e com as “portas” abertas para permitir a sua evolução. Fato que pode ser interessante para os provedores de serviços, bem como para as instituições de pesquisa e desenvolvimento realizarem seus estudos na área dos rádios definidos por *software* e cognitivos.

Capítulo 4

Conclusão

Nessa dissertação foram apresentados e discutidos conceitos teóricos de redes autônomas, rádios cognitivos, virtualização e desacoplamento de identificadores e localizadores. Foi realizado o levantamento dos requisitos necessários para as novas redes sem fio, bem como apresentadas as funcionalidades consideradas fundamentais para o funcionamento do rádio cognitivo e suas redes, incluindo os resultados recentes de pesquisas em Internet do Futuro. Depois desses estudos iniciais, foi introduzido o conceito do Gerente Autônomo, que é responsável por coordenar o funcionamento e interoperabilidade de todas as funcionalidades adotadas no projeto. Por fim, foi apresentado um modelo conceitual de uma plataforma para a nova geração de redes sem fio.

Acredita-se que, o modelo proposto seja flexível o suficiente para permitir a evolução de parte significativa dos elementos de rede através da troca de *software*. Tal característica é bastante interessante e útil no atual cenário tecnológico, pois permite que as operadoras de serviços de telecomunicações, principalmente, as de telefonia móvel, mantenham seus clientes satisfeitos com os serviços prestados através da atualização dinâmica de parte significativa do rádio. Alguns dos vários aspectos que fazem os clientes satisfeitos são a otimização da cobertura, taxa de chamadas realizadas com sucesso, vazão de dados em bits/segundo, mobilidade e segurança. As redes existentes hoje atendem alguns destes requisitos, porém não da forma como a maioria dos usuários gostaria, principalmente no que tange a mobilidade, segurança e taxa de vazão de dados, como em jogos *on-line* e TV sob demanda. Com o crescente número de usuários e dispositivos, as deficiências das redes vêm se mostrando cada vez mais alarmantes para as operadoras. Então surge a necessidade de novas tecnologias para atender essa demanda e acredita-se que as técnicas apresentadas neste trabalho podem ser a solução desses problemas, o que torna essa plataforma diferenciada quando comparada às outras apresentadas no Capítulo 3.

O modelo apresentado utiliza a virtualização de partes do rádio para se ter um uso mais eficiente dos recursos físicos e virtuais; tem-se a exposição de recursos de substrato via serviços de PGS; a orquestração conjunta de recursos de substrato, serviços e conteúdo; com o desacoplamento de identificador e localizador tem-se uma maior mobilidade e a conectividade múltipla; a nomeação auto-certificável de equipamentos, serviços e informações aumenta a segurança, a rastreabilidade e abre as portas para a *Internet of Things*, além da orquestração dinâmica e distribuída de funcionalidades usando nomes em linguagem natural e identificadores auto-certificáveis que é um diferencial da plataforma proposta quando comparada às demais.

Uma plataforma com todas essas características apresenta muitas propostas novas e modelos de negócios que podem revolucionar o atual estágio tecnológico das redes de comunicações sem fio. Para as operadoras, essas tecnologias prometem um excelente desempenho e eficiência gerencial além, da redução de OPEX que é uma meta de várias operadoras. Os novos desafios serão criar soluções que permitam o aumento de receita. Isto será alcançado, aumentando a capacidade e cobertura da rede, sem a necessidade de aumentar consideravelmente a quantidade de equipamentos.

Acredita-se que a plataforma proposta é uma solução interessante para os provedores de serviços, bem como para as instituições de pesquisa e desenvolvimento, pois ela permite a realização de estudos na área dos rádios definidos por *software* e cognitivos, bem como eventual desenvolvimento de produtos. As fabricantes de dispositivos e de equipamentos de rede de telecomunicações também obterão ganhos como a redução das linhas de produção diferenciadas dado que, para um mesmo *hardware* conseguiria atender toda a demanda de produtos.

O estudo realizado contempla várias melhorias para a rede, contudo estas tecnologias ainda são recentes existindo uma série de desafios a serem vencidos, tais como:

- Regulação de bandas de frequências. É um aspecto muito importante, pois as legislações e normas deverão ser alteradas para permitir o compartilhamento de algumas faixas do espectro, e a regulamentação

e a fiscalização deverão ser modificadas;

- Resistência de alguns donos do espectro ao compartilhamento. Esse aspecto trata da resistência de alguns grupos em compartilhar as faixas de espectro historicamente alocadas a eles. Além disso, tem-se a questão de como eles serão remunerados por isso, já que algumas licenças foram concedidas através de grandes investimentos e por um grande período de tempo, porém encontram-se pouco utilizadas (e.g. faixa de frequências em VHF e UHF destinadas à televisão no interior dos países). Encontrar uma forma de remunerar e incentivar esses grupos será um desafio e qualquer regulação deverá ser muito bem planejada;
- A criação de dispositivos e técnicas de medidas para os algoritmos, pois é necessário determinar quais dados e com que frequência devem ser coletados das diversas fontes existentes para otimizar o desempenho da rede.
- Após a coleta de dados, será necessário lidar com as múltiplas variáveis, originadas de diversas fontes. Um desafio será apresentar uma estrutura que trate de maneira eficiente os dados coletados, eliminando dados errôneos e maliciosos, aumentando assim a confiabilidade da tomada de decisão. Por exemplo, se os algoritmos determinarem de forma errônea a necessidade de um novo rádio na rede isso acarretaria em um aumento desnecessário dos custos e não geraria o impacto desejado;
- Os algoritmos autônomos devem levar em conta o tempo de *feedback* das ações tomadas na rede, pois há um atraso entre a atuação e a observação. Esse atraso pode afetar a eficiência do processo de otimização. Portanto, o tempo de resposta deve ser levado em consideração no desenvolvimento do algoritmo de auto-organização;
- Os algoritmos autônômicos devem levar em consideração a relação custo-benefício das soluções apresentadas, para não introduzir gastos desnecessários para a operadora;
- Por fim, tem-se a questão de como desenvolver a conversa entre os

gerentes autônomos sem apresentar perturbações nos serviços prestados e interferências entre os rádios.

Como proposta de trabalhos futuros pode-se indicar a implementação do modelo da plataforma proposta. Uma interessante implementação se daria em relação ao gerente autônomo com todas as suas funcionalidades e realizar testes para confirmar sua operação adequada.

Anexo A

Tabela 2. Comparação de algumas das plataformas utilizadas para implementação da Camada Física dos Rádios Oportunísticos.

Plataformas	USRP1	USRP2	WARP
<i>Hardware</i>	FPGA com interface USB e 2 interfaces de RF	FPGA com interface Ethernet e 2 interfaces de RF	FPGA com interface Ethernet, memória, I/O com 4 interfaces de RF
<i>Hardware programável</i>	FPGA Altera Cyclone EP1C12Q240C8	FPGA Xilinx Spartan 3-2000	FPGA Xilinx Virtex-4 FX100
Taxa de Amostragem	Entrada com ADC de 12 bits com 64 MS/s. Saída com DAC de 14 bits com 128 MS/s.	Entrada com ADC de 14 bits com 100 MS/s. Saída com DAC de 16 bits com 400 MS/s.	14 bits I/Q a 40 MS/s
Largura de Banda	10 MHz	25 MHz	40 MHz
Frequência de operação (MHz)	Rx: 0.1 -300, DC-30, 50-860, 800-2400. Tx: 0.1-200, DC-30, Transceiver: 50-2200, 400-500, 800-1000, 1150-1400, 1500-2100, 2250-2900, 2400-2500, 4900-5850	Rx: 0.1 -300, DC-30, 50-860, 800-2400. Tx: 0.1-200, DC-30, Transceiver: 50-2200, 400-500, 800-1000, 1150-1400, 1500-2100, 2250-2900, 2400-2500, 4900-5850	2400-2500, 4900-5875
Suporte a MIMO	2x2	8x8	4x4
Necessidade de um computador (<i>host</i>)	Sim	Sim. Entretanto, pode ser <i>stand alone</i>	Sim. Entretanto, pode-se utilizar para implementar todas as funcionalidades no FPGA dispensando o uso do computador.
Interface de comunicação com o computador	USB	Gigabit Ethernet	Gigabit Ethernet, quando utilizado com computador.

Referências Bibliográficas

- [1] Dillenseger B., et al. Autonomic Computing and Networking: The operators' vision on technologies, opportunities, risks and adoption roadmap; EURESCOM study report, February 2009. Disponível em < <http://archive.eurescom.eu/~pub/deliverables/documents/P1800-series/P1855/D1/P1855-D1.pdf>>. Acesso em Julho 2011.
- [2] Strassner, J.: Autonomic Networking – Theory and Practice, 2006.
- [3] Dobson. S., et al. A Survey of Autonomic Communications; ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems, Vol. 1, No. 2, Dezembro 2006. Disponível em < <http://www.simondobson.org/files/personal/dict/softcopy/ac-survey-06.pdf>>. Acesso Janeiro 2011.
- [4] Rádio Cognitivo. Disponível em <http://en.wikipedia.org/wiki/Cognitive_radio>, acesso em Outubro 2011.
- [5] Mitola. J. III., Maguire, G. Q.: Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal. Disponível em: < <http://content.imamu.edu.sa/Scholars/it/VisualBasic/Mitola.pdf>>. Acesso Janeiro 2013.
- [6] Marinescu, D., Kröger, R.: State of Art in Autonomic Computing and Virtualization. Wiesbaden University of Applied Sciences Technical Report – 2007.
- [7] STANFORD UNIVERSITY. Clean Slate: An Interdisciplinary Research Program. Disponível em: <http://cleanslate.stanford.edu/about_cleanslate.php>. Acesso Novembro 2013.
- [8] BELLOVIN Steven M., CLARK David D., SONG Adrian Perrig Dawn. A Clean-Slate Design for the Next-Generation Secure Internet, 2005.

- [9] Kephart, J. O., Chess, D. M.: The vision of Autonomic Computing (2003).
- [10] Schmid S., Sifalakis M., Hutchison D.: "Towards Autonomic Networks". in Proc. of WAC 2006.
- [11] Fraunhofer.: Autonomic Communication Research: Agenda for a New Communication Paradigm, 2003.
- [12] QUITADAMO, R., ZAMBONELLI, F.: Autonomic communication services: a new challenge for software agents, 2007.
- [13] Dillenseger B., et al. Autonomic Computing and Networking: The operators' vision on technologies, opportunities, risks and adoption roadmap; EURESCOM study report, February 2009. Disponível em < <http://archive.eurescom.eu/~pub/deliverables/documents/P1800-series/P1855/D1/P1855-D2.pdf>>. Acesso em Setembro, 2013.
- [14] Agoulmine A., et al.: Challenges for Autonomic Network Management. In Proc. of the 1st IEEE International Workshop on Modelling Autonomic Communications Environments (MACE), Dublin, Ireland, October 25-26, 2006.
- [15] Selfware project. Disponível em <<http://sardes.inrialpes.fr/selfware/>>. Acesso em Dezembro 2013.
- [16] SELFMAN project. Disponível em <<http://www.istselfman.org>>. Acesso em Dezembro 2013.
- [17] Grid4All Project. Disponível em <<http://www.grid4all.eu/>>. Acesso em Novembro 2013.
- [18] Fractal component model. Disponível em <<http://fractal.ow2.org/>>. Acesso em Setembro 2013.
- [19] Fractal model. Disponível em <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Fractal>>. Acesso em

Setembro 2013.

[20] Objectweb Project. Disponível em <<http://consortium.objectweb.org/>>. Acesso em Dezembro 2013.

[21] Bouchenak S., Palma N. De., Hagimont D., e Hagimont C.: Autonomic Management of Clustered Applications. IEEE International Conference on Cluster Computing, Barcelona, Espanha, Setembro 2006.

[22] B. Dillenseger, J. Nagapraveen, M. Léger, A. Diaconescu, T. Coupaye, M. Kessis, A Component-Based Architecture for Autonomic Management of Complex Systems, First International Applied Workshop on Autonomic System Management, Grenoble, França, Julho 2006.

[23] Carl Hewitt, ORGs for Scalable, Robust, Privacy-Friendly Client Cloud Computing, IEEE Internet Computing, vol. 12, no. 5, pp. 96-99, Sep/Oct, 2008.

[24] FP6 Project. Disponível em: <http://ec.europa.eu/research/fp6/index_en.cfm>. Acesso em Janeiro 2014.

[25] FP7 Project. Disponível em: <http://cordis.europa.eu/fp7/home_en.html>. Acesso em Junho 2013.

[26] Celtic Project. Disponível em: <www.celtic-initiative.org>. Acesso em Junho 2013.

[27] ACF Project. Disponível em: <<http://www.autonomic-communication.org/>>. Acesso em Junho 2013.

[28] ANA Project. Disponível em <www.ana-project.org>. Acesso em Junho 2013.

[29] CASCADAS Project. Disponível em <www.cascadas-project.org>. Acesso em Junho 2013.

- [30] BIONETS Project. Disponível em <www.bionets.eu>. Acesso em Junho 2013.
- [31] Haggel Project. Disponível em <www.haggelproject.org>. Acesso em Junho 2013.
- [32] Winner Project. Disponível em <www.ist-winner.org>. Acesso em Junho 2013.
- [33] Celtic project. Disponível em <www.celtic-initiative.org/Projects/.../GANDALF/default.asp>. Acesso em Junho 2013.
- [34] AutoI Project. Disponível em <www.ist-autoi.eu>. Acesso em Junho 2013.
- [35] 4ward Project. Disponível em <www.4ward-project.eu>. Acesso em Junho 2013.
- [36] Efipsans Project. Disponível em <www.efipsans.org>. Acesso em Junho 2013.
- [37] www.fp7-socrates.org>. Acesso em Junho 2013.
- [38] Júnior R. G. C, Oliveira J. C. de, A Tecnologia do Processador Digital de Sinal (PDS) Aplicada ao Rádio Definido por Software (RDS) – 3G, Agosto 2004.
- [39] Peter Steenkiste, Douglas Sicker, Gary Minden, Dipankar Raychaudhuri, Future Directions in Cognitive Radio Network Research, 2009.
- [40] Lima A. G. M, Rádio definido por software: O próximo salto no mundo das telecomunicações e computação, Revista Digital Online V.2, Outubro 2003.
- [41] WANG, Y. et al. A Layered Reference Model of the Brain (LRMB). IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 2006, pp. 124-133.
- [42] PRINCETON UNIVERSITY. WordNet. Lexical database of English, 2010. Disponível em <<http://wordnet.princeton.edu/>>. Acesso em Outubro 2013.

- [43] Rádios Cognitivos. Disponível em http://www.gta.ufrj.br/ensino/eel879/trabalhos_vf_2008_2/coutinho/Introduo.html>. Acesso Maio 2013.
- [44] T. Tronco, T. Tome, C. Rothenberg, and A. Alberti, *New network architectures: the path to the future Internet*. Berlin: Springer, 2010.
- [45] Haykin, S: *Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications*. *IEEE Journal on Selected Areas in Comm.* 6 (4), 1999, pp. 13 – 18.
- [46] Haykin, S: *Cognitive Radio: Research Challenges In: Vehicular Technology Conference Tutorial*, 2008.
- [47] E. Bogenfeld and I. Gaspard, “Self-x in Radio Access Networks: A White Paper by the FP7 project End-to-End Efficiency (E3),” 1.0, Dezembro, 2008.
- [48] F. Bellifemine, G. Caire, A. Poggi, and G. Rimassa, “JADE: A White Paper,” *Spec. Issue JADE Telecom Ital. J.*, vol. 3, no. 3, pp. 6–19, Setembro, 2003.
- [49] X. Liu, G. Qiu, and F. Yu, “Experimental study of cooperative communication utilizing GNU Radio and USRP2,” in *Proceedings of 2nd International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks*, Yichang, China, 2012, pp. 2577–2580.
- [50] N. Trecakov, “Cognitive Radio Network System Demonstrator,” *Master Thesys*, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norwegen, 2011.
- [51] José H. da Cruz Jr., et al. *Estratégias de Sensoriamento de Espectro Cooperativo Baseado em Autovalores*, *Simpósio brasileiro de Redes de Computadores (SBRC)*, 2013.
- [52] Pedro S. Coutinho. *Detecção de energia para rádios cognitivos usando GNU Radio e USRP2*, 2011.

- [53] J. Bajaj, W. Kim, S. Y. Oh, and M. Gerla, “Cognitive radio implementation in ISM bands with Microsoft SORA,” in Proceedings of IEEE 22nd International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications, Toronto, ON, 2011, pp. 531–535.
- [54] WARP Project. Disponível em <<http://mangocomm.com/products/boards/warp-radio-board-v1>>. Acesso em Agosto 2013.
- [55] Z. Miljanic, I. Seskar, K. Le, and D. Raychaudhuri, “The WINLAB Network Centric Cognitive Radio Hardware Platform WiNC2R,” in Proceedings of 2nd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, Orlando, USA, 2007, pp. 155–160.
- [56] O. Gustafsson and et. al., “Architectures for cognitive radio testbeds and demonstrators — An overview,” in Proceedings of the Fifth International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications CrownCom 2010, Cannes, France, 2010.
- [57] M. Mohorcic, C. Fortuna, and M. Smolnikar, “Heterogeneous ISM/TVWS Bands Cognitive Radio Testbed: Extending the CREW federation,” in Proceedings of 2nd COST IC0902 Workshop, Castelldefels, Spain, 2011.
- [58] Moteiv Corporation, “Ultra low power IEEE 802.15.4 compliant wireless sensor module: Humidity, Light, and Temperature sensors with USB,” Moteiv Corporation, San Francisco, CA, USA, Tmote Sky : Datasheet (11/13/2006), Nov. 2006.
- [59] CREW Project, “Sensornode: RM090 | CREW project.” [Online]. Available: <http://www.crew-project.eu/portal/wilab/rm090>. [Accessed: 27-Sep-2013].
- [60] Crownhill Associates, “Home of Metageek in Europe - Introduction to Wi-Spy.” [Online]. Available: <http://www.wi-spy.co.uk/>. Acesso Setembro 2013.
- [61] Self-Net Project. Disponível em <<https://ict-selfnet.eu/>>. Acesso Setembro 2013.

- [62] Ferreira, A. B. D. H. Novo dicionário da língua portuguesa. 2. Ed. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1986.
- [63] Popek, G. J.; Goldberg, R. P. Formal Requirements for Virtualizable Third Generation Architectures. Communications of the ACM, n. 17, 1974
- [64] JONES, M. Tim. Virtual Linux. [2006]. Disponível em: <<http://www-128.ibm.com/developerworks/linux/library/l-linuxvirt/?ca=dgr-lnxw01Virtual-Linux>>. Acesso em: Agosto 2013.
- [65] VMware. VMware vMotion for Live Migration of Virtual Machines. VMware, 2010. Disponível em: <<http://www.vmware.com/products/vmotion/>>. Acesso em: Fevereiro 2013.
- [66] Rosenblum, M.; Garfinkel, T.: Virtual machine monitors: current technology and future trends. In: Computer 38, Nr. 5, 39–47, 2005.
- [67] Gartner. Cloud Computing, 2010. Disponível em: <<http://www.gartner.com/technology/research/ccloud-computing/index.jsp>>. Acesso em: Fevereiro 2011
- [68] Kernel. Disponível em: <[http://pt.wikipedia.org/wiki/Núcleo_\(informática\)](http://pt.wikipedia.org/wiki/Núcleo_(informática))>. acesso Março 2013.
- [69] Chowdhury, N., Boutaba, R.: A Survey of Network Virtualization, 2008.
- [70] Carapinha, J., Jiménez, J.: Network Virtualization – a view from the bottom.
- [71] Virtual Private Network. Disponível em <http://pt.wikipedia.org/wiki/Virtual_Private_Network>. Acesso em: Novembro 2013.
- [72] Virtual Local Area Network. Disponível em:

<http://pt.wikipedia.org/wiki/Virtual_LAN>. Acesso em: Novembro 2013.

[73] Touch, J., Holtz, S.: The X-Bone. In Proc. 3rd Global Internet Mini-Conference, Sydney, Australia, 1998, pp. 75-83.

[74] Touch, J., Finn, G., Eggert, L., Hughes, A., Wang, Y.: The X-Bone & its Virtual Internet Architecture 10 years later, 2009.

[75] Peterson, L., Anderson, T., Culler, D., Roscoe, T.: A Blueprint for introducing Disruptive Technology into the Internet, 2002.

[76] Geni project. Disponível em: <www.geni.net>. Acesso em Dezembro 2013.

[77] Onelab2 Project. Disponível em: <[HTTP://www.ict-fireworks.eu/fire-projects/onelab2.html](http://www.ict-fireworks.eu/fire-projects/onelab2.html)>. Acesso em Dezembro 2013.

[78] Corelab Project. Disponível em: <www.corelab.jp>. Acesso em Dezembro 2013.

[79] G-lab Project. Disponível em: <www.german-lab.de>. Acesso em Dezembro 2013.

[80] Akari Project. Disponível em: <www.akari-project.nict.go.jp>. Acesso em Dezembro 2013.

[81] MANA Project. Disponível em: <www.future-internet.eu/.../management-and-service-aware-networking-architectures.html>. Acesso em Janeiro 2014.

[82] Find Project. Disponível em: <www.nets-find.net>. Acesso em Janeiro 2011.

[83] Raychaudhuri, D., Seskar, I., Ott, M., Ganu, S., Ramachandran, K., kremo, H., Siracusa, R., Liu, H., Singh, M.: Overview of the ORBIT Radio Grid Testbed for evaluation of Next-generation Wireless Network Protocols, 2005.

- [84] MARTINS, Bruno Magalhães, ALBERTI, Antonio Marcos; Redes Centradas na Informação: Uma Comparação de Abordagens, 2011.
- [85] JACOBSON Van, SMETTERS Diana K., THORNTON James D., PLASS Michael F. BRIGGS Nicholas H., BRAYNARD Rebecca L. Networking Named Content, 2009.
- [86] ESTEVE Christian, VERDI L. Fábio, MAGALHÃES F. Maurício. Towards a New Generation of Information-Oriented Internetworking Architectures, 2008.
- [87] PERKINS C. RFC3344 - IP Mobility Support for IPv4, 2002.
- [88] RAMACHANDRAN, Kishore. Mobile IP - deployment after a decade, 2005.
- [89] MOSKOWITZ, R. NIKANDER, P. Host Identity Protocol (HIP) Architecture RFC 4423. Maio 2006.
- [90] JIANLI Pan, SUBHARTHI Paul, RAJ Jain, MIC Bowman. MILSA: A Mobility and Multihoming Supporting Identifier Locator Split Architecture for Naming in the Next Generation Internet, 2008.
- [91] M. A. Hasan, "Performance Evaluation of WiMAX/IEEE 802.16 OFDM Physical Layer," Helsinki University of Technology, Finland, 2007.
- [92] Mobile Broadband Including WiMAX and LTE. Boston, MA: Springer Science Business Media, LLC, 2009.
- [93] H. Holma, HSDPA HSUPA for UMTS: high speed radio access for mobile communications. Chichester: John Wiley, 2006.
- [94] R. Kurzweil, The singularity is near: when humans transcend biology. New York: Penguin, 2006.

- [95] G. Wunder, M. Kasparick, S. ten Brink, F. Schaich, T. Wild, I. Gaspar, E. Ohlmer, S. Krone, N. Michailow, A. Navarro, G. Fettweis, D. Ktenas, V. Berg, M. Dryjanski, S. Pietrzyk, and B. Eged, "5GNOW: Challenging the LTE Design Paradigms of Orthogonality and Synchronicity," in Proceedings of Mobile and Wireless Communication Systems for 2020 and beyond Workshop, Dresden, Germany, 2012.
- [96] European Commission Information Society, "Information and Telecommunication Technologies 2010." [Online]. Disponível em: http://ec.europa.eu/information_society/events/ict/2010/videos/all/index_en.htm. Acesso em Setembro 2013.
- [97] Hourcade, J., Neuvo, Y., Wahlster, W., Saracco, R., Posch, R.: Future Internet 2020: call for action by high-level visionary panel. In: European Commission, Information Society and Media Belgium, 2009.
- [98] Wang, X., Vasilakos, A. V., Chen, M., Liu, Y., Kwon, T, T.: A Survey of Green Mobile Networks: Opportunities and Challenges. Springer Science, 2011.
- [99] Fettweis G, Zimmermann E ICT energy consumption-trends and challenges. In: Proceedings of the 11th international symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), 2008.
- [100] Williams F.: Green wireless communications. eMobility, Tech. Rep, 2008.
- [101] Kelly T.: ICTs and climate change. ITU-T Technology, Tech. Rep, 2007.
- [102] McGreehan J.: Climate change and natural resources: what contribution can wireless communications make? UK Green Wireless Communication Future Trend and Technology, 2009.
- [103] Etoh M., Ohya T., Nakayama Y.: Energy consumption issues on mobile network systems. In: Proceedings of the 2008 international Symposium on Applications and the

Internet (SAINT), 2008.

[104] J. Goodchild, “Integrating data, voice and video - PartII, IP Video Implementation and planning guide,” United States Telecom Association, Washington DC, USA, 2005.

[105] S. Seth and A. Gankotiya, “Denial of Service Attacks and Detection Methods in Wireless Mesh Networks,” in Proceedings of International Conference on Recent Trends in Information, Telecommunication and Computing (ITC), Kochi, Kerala, 2010, pp. 238–240.

[106] Defense Advanced Research Projects Agency and Information Processing Techniques Office, “Internet Protocol: DARPA Internet Program Protocol Specification,” DARPA, Marina del Rey, CA, USA, RFC: 791, Setembro, 1981.

[107] J. Davies, Understanding IPv6 / Covers Windows 8 and Windows Server 2012. Redmond, Wash.: Microsoft, 2012.

[108] D. Smith, “The Future of Internet - ‘you ain’t seen nothin’ yet’,” Institute of Directors Big Picture, Third quarter-2011.

[109] D. Hausheer, P. Nikander, V. Fogliati, K. Wünnstel, A. Callejo, S. Jorba, S. Spirou, L. Ladid, W. Kleinwächte, B. Stiller, M. Behrmann, M. Boniface, C. Courcoubetis, and M. Li, “Future Internet Socio-Economics – Challenges and Perspectives,” in Towards the Future Internet – A European Research Perspective, Amsterdam, NL, 2009, pp. 1–11.

[110] E. Bogenfeld and I. Gaspard, “Self-x in Radio Access Networks: A White Paper by the FP7 project End-to-End Efficiency (E3),” 1.0, Dezembro, 2008.

[111] J. Doyle, Routing TCP/IP, 2nd ed. Indianapolis, Ind: Cisco Press, 2006.

[112] K. Harrison, S. M. Mishra, and A. Sahai, “How Much White-Space Capacity Is There?,” in Proceedings of IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum, Singapore, 2010, pp. 1–10.

- [113] E. Axell, G. Leus, E. Larsson, and H. Poor, "Spectrum Sensing for Cognitive Radio : State-of-the-Art and Recent Advances," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 29, no. 3, pp. 101–116, Maio, 2012.
- [114] A. El-Rabbany, *Introduction to GPS: the Global Positioning System*, 2nd ed. Boston, MA: Artech House, 2006.
- [115] E. Hossain, *Dynamic spectrum access and management in cognitive radio networks*. Cambridge UK ;;New York: Cambridge University Press, 2009.
- [116] J. Van den Berg, R. Litjens, A. Eisenblätter, M. Amarijoo, O. Linnel, C. Blondia, T. Küner, N. Scully, and L. Oszmianski, "SOCRATES: Self-Optimisation and self-ConfigurATIOn in wireLESs networks," SOCRATES project consortium, Wroclaw, Poland, COST 2100 TD(08)422, Fevereiro, 2008.
- [117] Nokia Siemens Networks, "Self-Organizing Network: Introducing the Nokia Siemens Networks SON Suite – an efficient, future-proof platform for SON," in *Proceedings of Global Telecom Business*, 2009.
- [118] A. Khan, A. Zugenmaier, D. Jurca, and W. Kellerer, "Network virtualization: a hypervisor for the Internet?," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 50, no. 1, 2012, pp. 136–143.
- [119] E. Stavinov, *100 power tips for FPGA designers*. [S.l.]: Evgeni Stavinov, 2011.
- [120] S. W. Smith, *Digital signal processing: a practical guide for engineers and scientists*. Amsterdam ; Boston: Newnes, 2003.
- [121] H. Bhathagar, *Advanced ASIC Chip Synthesis Using Synopsys® Design Compiler™ and PrimeTime®*. Boston, MA: Springer US, 1999.
- [122] P. Narasimhan, "Fault-Tolerant CORBA: From Specification to Reality," *Computer*,

vol. 40, no. 1, pp. 110–112, 2007.

[123] J. Mitola, “Software radio architecture: a mathematical perspective,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 17, no. 4, pp. 514–538, 1999.

[124] H. Arslan, *Cognitive Radio, Software Defined Radio, and Adaptive Wireless Systems*. [New York]: Springer, 2007.

[125] R. Mall, D. Kundu, and D. Samanta, “Automatic code generation from unified modelling language sequence diagrams,” *IET Softw.*, vol. 7, no. 1, 2013, pp. 12–28.

[126] E. Biglieri, *MIMO wireless communications*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.

[127] T. Rakotoarivelo, M. Ott, G. Jourjon, and I. Seskar, “OMF: a control and management framework for networking testbeds,” *ACM SIGOPS Oper. Syst. Rev.*, vol. 43, no. 4, 2010, pp. 54.