

Análise de Tecnologias Emergentes para a Nova Geração de Redes sem Fio

Getúlio E. O. Pereira & Antônio Marcos Alberti

ABSTRACT – The predominance of mobile devices in the Internet is already a reality – despite the fact that the current Internet was not designed for this purpose. Worldwide, hundreds of initiatives are rethinking the Internet to meet the needs of our society in the coming decades, including the support for generalized mobility. These efforts are collectively being called the Future Internet. On the other hand, on the radio environment, the research proceeds toward the best use of the radio frequency spectrum, as well as in building platforms that facilitate the migration to new technologies and protocols, and that are able to learn from the environment, avoiding interference with licensed users. These are called cognitive radios. In this paper, technologies from both fronts are analyzed, aiming at the integration and convergence towards a new generation of wireless networks.

Index terms – Future Internet, Autonomic Networks, Cognitive Radio, Cognitive Networks, Identifier and Locators Splitting, Virtualization.

RESUMO – A predominância dos dispositivos móveis na Internet já é uma realidade – apesar da Internet atual não ter sido projetada para este fim. No mundo inteiro, centenas de iniciativas estão repensando a Internet para atender as necessidades de nossa sociedade nas próximas décadas, incluindo o suporte à mobilidade generalizada. Estes esforços são coletivamente chamados de Internet do Futuro. Por outro lado, no ambiente de rádio, as pesquisas avançam na direção do melhor uso do espectro de rádio frequência, bem como na criação de plataformas que facilitem a migração para novas tecnologias e protocolos, e que sejam capazes de aprender com o ambiente em que se encontram, evitando interferências com usuários licenciados. São os chamados de rádios cognitivos. Neste artigo, tecnologias provenientes de ambas as frentes são analisadas, visando à integração e convergência em uma nova geração de redes sem fio.

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

I. INTRODUÇÃO

Ultimamente, o mundo das comunicações vem sofrendo mudanças drásticas, como por exemplo, o grande número de fabricantes de equipamentos, tornando as redes mais heterogêneas; o explosivo crescimento da Internet; a proliferação 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 tem tornado as infra-estruturas das redes de comunicação maiores e mais complexas [1]. Esta cada vez mais difícil atender as demandas de serviços e temos a sensação de que estamos nos 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? 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].

Uma das propostas consideradas como possível solução é o paradigma das redes autônomas e auto-organizáveis (*Self-Organizing Networks* – SON) [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, restando apenas as de alto nível para os humanos.

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 Advanced Research Projects Agency*), em um seminário da KTH *The Royal Institute of Technology* em 1998. E, depois publicada por Mitola e Gerald Q. Maguire em 1999 [5]. Segundo Mitola, um Rádio Cognitivo é um dispositivo de rádio definido por *software* capaz 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, tem-se também o desacoplamento entre identificadores e localizadores de *host*¹. Atualmente, o endereçamento IP (*Internet Protocol*) é sobrecarregado com funções de localização e identificação de *hosts*. Tais funcionalidades fazem 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. E, o desacoplamento de identificadores e localizadores de *hosts* propõe 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 conteúdos.

Conforme será visto, todas essas tecnologias consideram dois tipos de abordagem para desenvolver as novas arquiteturas de rede de comunicação. A primeira utiliza uma abordagem totalmente nova para 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. Não quer dizer que precisamos esquecer tudo o que já sabemos e começar do zero. Mas sim, utilizar todo o conhecimento 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.

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.

Este artigo foi estruturado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta detalhes das tecnologias estudadas. A Seção 3 faz uma análise de como essas tecnologias podem interagir para desenvolver novas arquiteturas de redes. E a Seção 4 apresenta as considerações finais e conclusão.

II. APRESENTAÇÃO DAS TECNOLOGIAS EMERGENTES PARA NOVAS ARQUITETURAS DE REDES DE COMUNICAÇÕES SEM FIO

A. Redes Autônomas

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 [8]. 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 e é 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 1. Este ciclo forma um laço de retro-informação, através da coleta de informações de diferentes meios e fontes. Percebem-se na Figura 1 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.

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

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

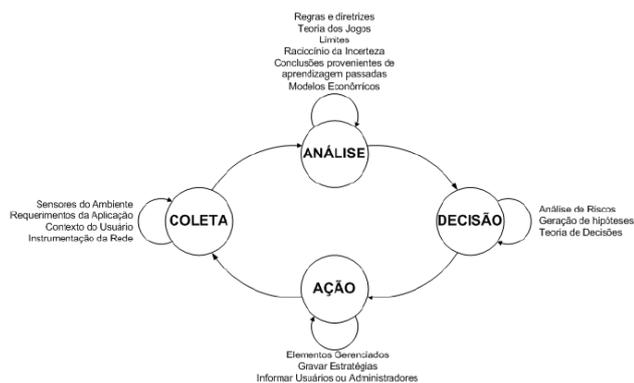


Figura 1. Representação contextual do Ciclo autônomo.

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 [9], 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 entender como o comportamento de um elemento é influenciado ou modificado e como isso afeta outros elementos dentro de uma rede [10]. De acordo com [11], 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 [10], 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 mais orientada para as aplicações de *software* e a gerência dos recursos computacionais. Já a rede autônoma é mais orientada a sistemas e serviços distribuídos e para o gerenciamento dos recursos de rede [10].

Embora existam algumas diferenças entre essas duas abordagens, elas reconhecem 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. E, com isso, 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 de todos os processos envolvidos na rede (*self-awareness*) e condições atuais de operação (*self-situation*), detectar mudanças (*self-monitoring*) e ser adaptativo (*self-adjustment*) [12]. Também, de acordo com [13], 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 [13].

Projetos de pesquisa e esforços de padronização de soluções com propriedades autônomas estão surgindo em todos os lugares do globo. Em especial, na União Européia (UE), pode-se citar o FP6 (6th Framework Program) [14], que foi um programa estruturante da comissão européia no período de 2002 a 2006. O principal objetivo do FP6 foi criar uma área européia 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) [15], que estará em vigor de 2007 a 2013. O programa FP7 está dividido em quatro áreas (Cooperação, Idéias, Pessoas e Capacidades), mais uma área exclusiva para pesquisa e desenvolvimento de energia nuclear. Para maiores detalhes sobre as pesquisas realizadas veja [15]. O objetivo do FP7 é tornar ou manter a Europa líder mundial nesses setores. Outro exemplo é o *Celtic* [16], 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 [16]. 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*) [17]. O ACF tem foco em criar a Primeira Padronização Internacional (PPI) 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.

B. Rádio Cognitivo

Nos últimos 40 anos, observou-se uma ampla evolução tecnológica, como por exemplo, a proliferação dos semicondutores, aumento da capacidade e velocidade de memórias, microprocessadores, etc. Cada vez mais as tecnologias estão evoluindo para uma era digital e os processadores digitais de sinais (*DSP – Digital Signal Processor*) estão no centro desta evolução [18]. Com esses avanços, várias tecnologias se beneficiaram, principalmente, as de comunicação com fio. Agora, esta era digital promete trazer para as comunicações sem fio a mesma convergência já alcançada pelas redes com fio [18]. De acordo com [19], 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 [19].

O espectro eletromagnético aéreo 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. Devido a esse fato, hoje em dia o espectro encontra-se bastante segmentado. Uma parcela está alocada para funções cruciais à sociedade como, serviços de segurança, emergência e aviação. Outra parte está alocada para serviços comerciais, por exemplo, 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. E, o Rádio Cognitivo (RC) [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 Rádio Tradicional (RT) e da proposta de Rádio Definido por Software (RDS). 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 ilustra a plataforma do RT.

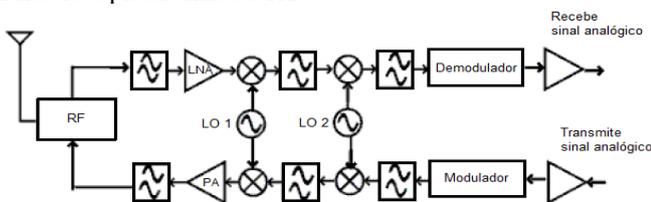


Figura 2. Plataforma do RT [18].

Conforme ilustrado na Figura 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 (banda base). Esta tarefa está sinalizada pelos osciladores LO1 e LO2. Geralmente, estes osciladores são implementados por PLLs (*Phase Locked Loops*). 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. Mas, já há algum tempo, 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* [20]. Em 1992, Joseph Mitola III [5], apresentou o conceito de rádio definido por *software*. O RDS é um rádio onde todo 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 3 ilustra a plataforma do RDS.

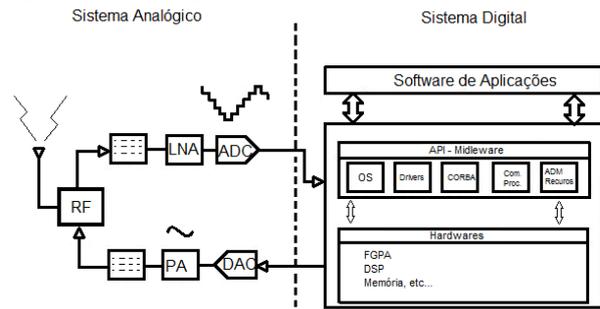


Figura 3. Plataforma RDS [18].

Na Figura 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 e então ele é processado pelo subsistema digital. E 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. Assim como, a codificação de canal, modulação, etc. 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 da idéia do RDS, Joseph Mitola III, em 1999 apresenta a proposta do rádio cognitivo [5]. O RC pode ser definido como: um rádio onde a camada física é definida por *software*, ao invés dos tradicionais *hardwares* usados hoje em dia e os parâmetros usados para a configuração são

dinamicamente configurados por *software* de acordo com as necessidades dos usuários e condições do ambiente. Você deve estar pensando que esse conceito é parecido com o apresentado para o RDS? Claro que sim, 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 autônoma).

Para se ter uma melhor compreensão do RC e como ele é capaz de perceber o local em que está situado, se faz necessário entender o ciclo cognitivo apresentado na Figura 4. Este, embora parecido com o ciclo autônomo apresentado na Seção 1, tem algumas diferenças essenciais. Podemos analisar essas diferenças através da computação, em que também existem essas duas classificações. Segundo [21], computação autônoma é definida como uma tecnologia orientada a metas e guiada por decisões próprias que não se apoiam 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 os processos mentais de inteligência do cérebro, tais como, pensar, deduzir, aprender e sentir. De acordo com [22], o termo autônomo remete a ausência de controle externo e restrição, enquanto o termo cognição remete ao resultado psicológico da percepção, aprendizagem e argumentação. Portanto, pode-se concluir que existe uma diferença entre esses dois termos que não devem ser vistos como fatores exclusivos, mas sim como complementares.

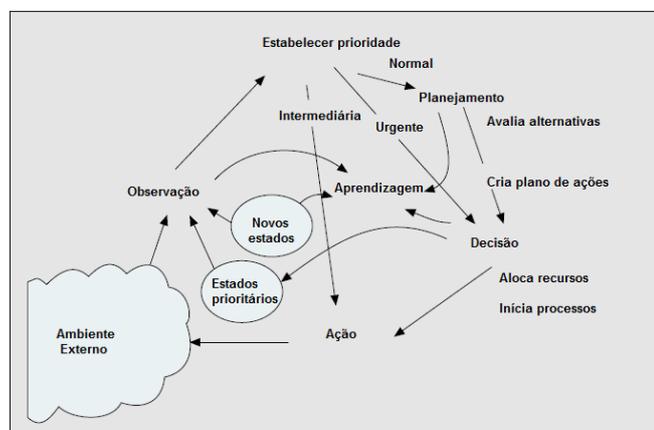


Figura 4. Ciclo Cognitivo [5].

Na Figura 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 a 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 (normal), resultar no ciclo de observar, planejar, decidir e agir parecido com o apresentado na Figura 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 idéia 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 licenciado e os outros não licenciados. Vale ressaltar que nesse cenário o licenciado sempre terá prioridade na utilização do espectro. Então, caso um rádio não licenciado esteja usufruindo do espectro de um licenciado, ele deve liberar a faixa de frequência assim que o sistema licenciado 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 [23]:

- **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 [24], 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, etc. 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. Você deve estar pensando: existe uma relação com a famosa teoria dos jogos de John Nash? Claro que sim. A teoria dos jogos é amplamente utilizada no compartilhamento de espectro entre RCs. Haykin [25] 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 [26]. Outras propostas de compartilhamento de espectro são baseadas em técnicas de otimização, processos estocásticos e teoria da informação.

C. 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 [27], 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 [28], é uma técnica que introduz uma camada de abstração de *software* entre o *hardware* e o SO. Essa camada é chamada de *Virtual Machine Monitor* (VMM) 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 [29], foram listados os seguintes requisitos para se ter um ambiente eficiente de virtualização.

- Equivalência – rodar 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 de *hardware*.
- 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 a outra) e consistência da informação.
- Eficiência – o *overhead* causado pela virtualização deve ser mínimo a fim de não diminuir 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 rodar 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 [29], este equipamento foi denominado "Projeto Atlas".

O Projeto Atlas foi oriundo de um estudo realizado em conjunto com o MIT (*Massachusetts Institute of Technology* – Instituto de Tecnologia do Massachusetts), a Ferranti Ltd. e a *University of Manchester* (Universidade de Manchester). Foi utilizado um *mainframe* IBM 704 M44/44X com implementação de chamadas supervisoras. O sistema operacional deste *mainframe* (na época 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 rodando 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 [29]. 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. Mas, com o passar dos anos, e em especial na década de 80, 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 [30], a substituição dos *mainframes* por microcomputadores retirou da arquitetura das máquinas o suporte necessário para as VMM's [30]. 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 a 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 [30]. Hoje a virtualização é proposta em máquinas e aplicativos, com fins de aperfeiçoar o uso do *hardware* e reduzir os custos [31]. Um estudo da consultoria Gartner [32] 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.

No ambiente das redes de comunicações, uma rede virtual consiste de nós virtuais conectados por *links* virtuais, formando uma topologia virtual [33]. De acordo com Carapinha e Jiménez [34], a virtualização de *link* permite o transporte de múltiplos *links* virtuais separados sobre o mesmo *link* físico. Ainda de acordo com Carapinha [34], 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 à criação de redes virtuais com funcionalidades equivalentes as redes físicas. A Figura 5 ilustra este conceito.

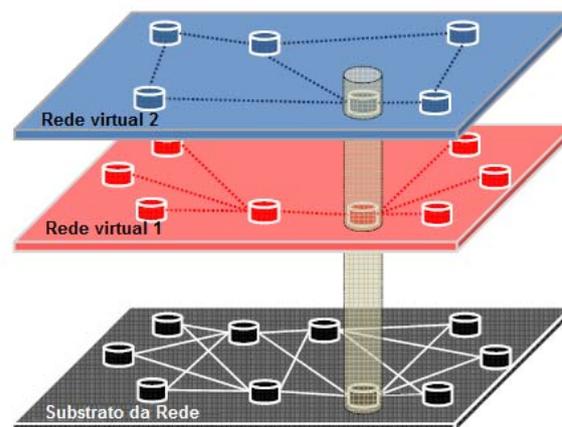


Figura 5. Virtualização de rede [34].

Como podemos perceber pela Figura 5, 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 [34] 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*) [35] e VLAN (*Virtual Local Area Network*) [36]. E de acordo com [24], em 1998, pesquisadores do projeto X-bone receberam dinheiro da DARPA para desenvolver e gerenciar redes sobrepostas na Internet [37] [38]. O resultado do projeto foi usado para desenvolver Internet 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 idéia 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 [39]. 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 [40], OneLab2 [41] na Europa, CoreLab [42] no Japão e G-lab [43] 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 [44], 4WARD [45] MANA (*Management and Service-aware Networking Architectures*) [46] e FIND (*Future Internet Design*) [47] 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 [24]. 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 uma as outras, etc. Existem vários projetos trabalhando para que as redes virtuais sem fio se tornem realidade. Em 2005, o projeto ORBIT [48] 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.

D. Desacoplamento de Identificador/ Localizador para Nós de Rede

Ultimamente, estamos indo em direção a uma era em que cada vez mais o usuário deixa de ser mero consumidor de conteúdo (fotos, vídeos, etc.), para se tornar também produtor. Este fato leva a uma série de limitações da rede atual, pois a abordagem utilizada (*host-centric*) 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 [49]. Além de que, como 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 problemas na disponibilidade de conteúdo, de segurança, dependência da localização do conteúdo e outros como, problemas para 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 à 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 [50]. E ainda, para Van Jacobson [50], 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 de *information-centric* (centrada na informação).

A velha abordagem *host-centric* que falamos 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 conteúdos, em vez de nomes de interfaces de *hosts* [51]. Do ponto de vista do usuário, toda informação terá um identificador único e esta informação poderá ser recuperada de forma mais eficiente, uma vez que ela poderá 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 propõem soluções para diversos problemas, tais como esses citados anteriormente. Mas para entendermos como desacoplar o identificador do nome, primeiramente vamos introduzir um breve conceito sobre nomes.

Normalmente, nomes são utilizados para identificar objetos, pessoas, dispositivos, dentre outros que estão relacionados 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 à segurança, bem como os nomes gerados por funções *hash*³. Neste caso, o nome é idêntico ou baseado no identificador plano. A função de compressão *hash* 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 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

³ 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.

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 6 ilustra a forma como os nomes planos são concebidos dentro de uma organização.



Figura 6. Arquitetura de nomes planos [50].

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 7 ilustra os nomes formados hierarquicamente.

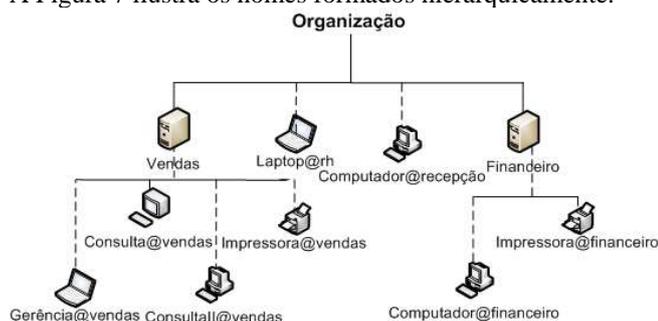


Figura 2.7. Arquitetura de nomes hierárquicos [50].

Portanto a proposta do desacoplamento da identificação e localização dos *hosts* na rede é que os identificadores sejam utilizados nas camadas de aplicação e transporte para fim de identificação do *host*, enquanto os localizadores são utilizados na camada de rede para localizar o *host* logicamente na topologia desta rede. Com base nesta proposta pesquisadores vem trabalhando em soluções para o problema da utilização de um único endereço para identificação e localização de *host* [49], [50] e [51].

III. INTERAÇÃO DAS TECNOLOGIAS

Nesse artigo, foram apresentados e discutidos conceitos teóricos, bem como um breve histórico da computação e das redes autônomas, rádios cognitivos, virtualização e desacoplamento de identificador e localizador. Podemos perceber que a união destas tecnologias é necessária para desenvolver novas arquiteturas de redes de comunicações. Por exemplo, pelas informações apresentadas neste artigo nota-se 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. E, 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 do rádio inteiro permitindo que mais de um padrão possa existir ao mesmo tempo na 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.

Ainda, nas redes futuras fala-se 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*.

Portanto, acredita-se que a união destas tecnologias será de extrema necessidade para desenvolver uma plataforma de rádio cognitivo flexível e genérica o suficiente para acomodar os requisitos existentes no ambiente sem fio atual e ainda, tornar a arquitetura aberta para acomodar os requisitos futuros, uma vez que a promessa destas soluções é que a rede tenha maior sustentabilidade no design, i.e. seja capaz de se adaptar a mudanças nos negócios, regras, regulamentação, recursos de substrato e tecnologias usadas.

Por serem tecnologias novas, existe uma série de riscos e desafios que devem ser superados como, por exemplo, fazer a migração das redes legadas para as redes auto-organizáveis, como deve ser estruturado o algoritmo de auto-gerência, visto que o mesmo deve levar em consideração o tempo de resposta das ações tomadas na rede, como tratar a interoperabilidade entre as propriedades auto-*, dentre outras. Já para o lado do operador há também o risco de uma adoção prematura, o que poderia causar aumento do OPEX e CAPEX em vez de redução, sendo uma solução cara e ineficiente, pois como essas são soluções recentes e ainda estão em fase de testes, pode levar anos até atingir a maturidade.

IV. CONCLUSÃO

O rápido crescimento da demanda por tecnologias de comunicação e informação no ambiente móvel criou nos últimos anos uma série de desafios às atuais arquiteturas de rede sem fio. Embora as abordagens contemporâneas tenham uma alta eficiência e eficácia na camada física, chegando próximo aos limites teóricos previstos por Shannon, é na arquitetura da rede que encontram-se os maiores limitantes. Este artigo defende a ideia de que é preciso inovar na arquitetura da rede sem fio, introduzindo novas tecnologias que sejam capazes de: (i) suportar a demanda de serviços atuais e futuros; (ii) reduzir a interferência humana, o custo operacional e o gasto energético; (iii) tirar melhor proveito das tecnologias de comunicação digital existentes hoje e das que estão por vir; (iv) melhorar a qualidade de serviço e de experiência; (v) permitir a mobilidade generalizada de usuários, serviços, terminais e redes; (vi) simplificar a arquitetura da rede, facilitando a adoção de novas tecnologias na planta das operadoras. Em síntese, este artigo argumenta que a combinação apropriada dessas tecnologias tem esse potencial e que é possível combinar todas elas em um mesmo *design*. Na verdade, a especificação de uma arquitetura convergente integradora já é um trabalho em andamento no INATEL.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao INATEL (Instituto Nacional de Telecomunicações) pelo suporte ao trabalho.

REFERÊNCIAS

- [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*. Network Operations and Management Symposium, 2004.
- [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 Fevereiro 2011.
- [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 2011.
- [8] KEPHART, J. O., CHESS, D. M. *The vision of Autonomic Computing*. Computer. 2003.
- [9] SCHMID, S., SIFALAKIS M., HUTCHISON, D. *Towards Autonomic Networks*. WAC 2006.
- [10] FRAUNHOFER. *Autonomic Communication Research: Agenda for a New Communication Paradigm*. Fraunhofer. 2003
- [11] QUITADAMO, R., ZAMBONELLI, F. *Autonomic communication services: a new challenge for software agents*. Autonomous Agents and Multi-Agent Systems Volume 17, Number 3. Springer. 2007
- [12] 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 2011.
- [13] AGOULMINE, A., et al. *Challenges for Autonomic Network Management*. 1st IEEE International Workshop on Modelling Autonomic Communications Environments (MACE), Dublin, Ireland, October 25-26, 2006.
- [14] *FP6 PROJECT*. Disponível em: <http://ec.europa.eu/research/fp6/index_en.cfm>. Acesso em: Junho 2010.
- [15] *FP7 PROJECT*. Disponível em: <http://cordis.europa.eu/fp7/home_en.html>. Acesso em: Junho 2010.
- [16] *CELTIC PROJECT*. Disponível em: <www.celtic-initiative.org>. Acesso em: Junho 2010.
- [17] *ACF PROJECT*. Disponível em: <<http://www.autonomic-communication.org>>. Acesso em: Junho 2010.
- [18] 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.
- [19] STEENKISTE, P, SICKER, D., MINDEN, G., RAYCHAUDHURI, D. *Directions in Cognitive Radio Network Research*.
- [20] LIMA A. G. M. *Rádio definido por software: O próximo salto no mundo das telecomunicações e computação*.
- [21] WANG, Y. et al. *A Layered Reference Model of the Brain (LRMB)*. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 2006. 124-133.
- [22] PRINCETON UNIVERSITY. *WordNet. Lexical database of English*, 2010. Disponível em <<http://wordnet.princeton.edu/>>. Acesso em Outubro 2010.
- [23] *Rádios Cognitivos*. Disponível em <http://www.gta.ufrj.br/ensino/eel879/trabalhos_vf_2008_2/coutinho/Introduo.html>. Acesso Maio 2011.
- [24] ALBERTI A. M. et al. *New Network Architectures. The path to the Future Internet*. Springer, Maio 2010.
- [25] HAYKIN, S. *Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications*. IEEE Journal. Selected Areas in Comm. 6 (4), 13 – 18. 1999.
- [26] HAYKIN, S. *Cognitive Radio: Research Challenges*. Vehicular Technology Conference Tutorial. 2008.
- [27] FERREIRA, A. B. D. H. *Novo dicionário da língua portuguesa. 2*. Ed. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1986.
- [28] POPEK, G. J. GOLDBERG, R. P. *Formal Requirements for Virtualizable Third Generation Architectures*. Communications of the ACM, n. 17. 1974
- [29] JONES, M. T. *Virtual Linux*. [2006]. Disponível em: <<http://www-128.ibm.com/developerworks/linux/library/l-linuxvirt/?ca=dgr-lnxw01Virtual-Linux>>. Acesso em: Agosto 2011.

[30] VMware. *VMware vMotion for Live Migration of Virtual Machines*. VMware, 2010. Disponível em: <<http://www.vmware.com/products/vmotion/>>. Acesso em: Fevereiro 2011.

[31] ROSENBLUM, M. GARFINKEL, T. *Virtual machine monitors: current technology and future trends*. Computer 38, Nr. 5, 39–47. 2005.

[32] GARTNER. *Cloud Computing*. 2010. Disponível em: <<http://www.gartner.com/technology/research/ccloud-computing/index.jsp>>. Acesso em: Fevereiro 2011

[33] CHOWDHURY, N., BOUTABA, R. *A Survey of Network Virtualization*. Computer Networks Volume 54, Issue 5, Pages 862–876, 8 April 2010.

[34] CARAPINHA, J., JIMÉNEZ, J. *Network Virtualization – a view from the bottom*. ACM 2009.

[35] *Virtual Private Network*. Disponível em <http://pt.wikipedia.org/wiki/Virtual_Private_Network>. Acesso em: Novembro 2010.

[36] *Virtual Local Area Network*. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Virtual_LAN>. Acesso em: Novembro 2010.

[37] TOUCH, J. HOUTZ, S. *The X-Bone*. In. 3rd Global Internet Mini-conf. IEEE Globecom, pp. 59-68.

[38] TOUCH, J., FINN, G., EGGERT, L., HUGHES, A., WANG, Y. *The X-Bone & its Virtual Internet Architecture 10 years later*.

[39] PETERSON, L., ANDERSON, T., CULLER, D., ROSCOE, T. *A Blueprint for introducing Disruptive Technology into the Internet*.

[40] *GENI PROJECT*. Disponível em: <www.geni.net>. Acesso em: Dezembro 2010.

[41] *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 2010.

[42] *CORELAB PROJECT*. Disponível em: <www.corelab.jp>. Acesso em: Dezembro 2010.

[43] *G-LAB PROJECT*. Project. Disponível em: <www.german-lab.de>. Acesso em: Dezembro 2010.

[44] *AKARI PROJECT*. Disponível em: <www.akari-project.nict.go.jp>. Acesso em: Dezembro 2010.

[45] *4WARD PROJECT*. Disponível em <www.4ward-project.eu>. Acesso em Junho 2010.

[46] *MANA PROJECT*. Disponível em: <www.future-internet.eu/.../management-and-service-aware-networking-architectures.html>. Acesso em: Janeiro 2011.

[47] *FIND PROJECT*. Disponível em: <www.nets-find.net>. Acesso em: Janeiro 2011.

[48] 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*.

[49] MARTINS, B. M., ALBERTI, A. M. *Redes Centradas na Informação: Uma Comparação de Abordagens*. Tese (Mestrado). Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL), 2010.

[50] JACOBSON V., SMETTERS D. K., THORNTON J. D., PLASS M. F., BRIGGS N. H., BRAYNARD R. L., *Networking Named Content*. 2009.

[51] ESTEVE C., VERDI L. F., MAGALHÃES F. M. *Towards a New Generation of Information-Oriented Internetworking Architectures*. 2008.