

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

EXTENSÃO DO PLANO DE CONTROLE SEM FIO  
PARA AMBIENTES EXPERIMENTAIS OUTDOOR

ALEXSANDER NÚÑEZ

DM:39/2017

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
2017



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

ALEXSANDER NÚÑEZ

EXTENSÃO DO PLANO DE CONTROLE SEM FIO  
PARA AMBIENTES EXPERIMENTAIS OUTDOOR

DM:39/2017

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
2017

**ALEXSANDER NÚÑEZ**

**EXTENSÃO DO PLANO DE CONTROLE SEM FIO PARA  
AMBIENTES EXPERIMENTAIS OUTDOOR**

Dissertação submetida à banca julgadora na  
Universidade Federal do Pará como parte dos  
requisitos para obtenção do grau de Mestre  
em Engenharia Elétrica

Orientador: Antônio Jorge Gomes Abelém

**UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
2017**

Dados Internacionais de Catalogação - na – Publicação (CIP) Sistema de Bibliotecas da UFPA

---

Nuñez, Alexander, 1989-

Extensão do plano de controle sem fio para ambientes experimentais outdoor / Alexander Nuñez.-2017.

Orientador : Antonio Jorge Gomes Abelém

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém, 2017.

1.Redes definida por software. 2. Sistemas de comunicação sem fio. 3. Recursos de redes de computadores. 4. Dispositivos de redes sem fio. I. Título.

CDD 23. ed. 004.6

---

**ALEXSANDER NÚÑEZ**

**EXTENSÃO DO PLANO DE CONTROLE SEM FIO  
PARA AMBIENTES EXPERIMENTAIS OUTDOOR**

Dissertação submetida à banca julgadora na  
Universidade Federal do Pará como parte dos  
requisitos para obtenção do grau de Mestre  
em Engenharia Elétrica

Aprovada em: \_\_/\_\_/\_\_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Antônio Jorge Gomes Abelém  
Universidade Federal do Pará  
Orientador

---

Prof. Dr. Eduardo Coelho Cerqueira  
Universidade Federal do Pará

---

Prof. Dr. Denis Lima do Rosário  
Universidade Federal do Pará

*dedicatória*

Dedico a todos que passaram pela minha vida durante o período de produção deste trabalho, pois acredito que, de alguma forma, deixaram marcas em mim que serviram para construção dos meus pensamentos e assim auxiliaram na conclusão deste feito.

Dedico em especial, a minha mãe Miriam Susana Olmedo Tejera de Núñez, meu pai Roberto Fabian Núñez Olivera e meu irmão Fabian Núñez que me apoiaram na decisão de abandonar o mercado de trabalho para voltar à academia e por terem garantido a mim um bom ensino e uma educação de qualidade, o que é um privilégio no Brasil.

---

# Agradecimentos

Dedico com satisfação meus sinceros agradecimentos para:

– O professor Doutor Antônio Jorge Abelém, professor Doutor Carlos Renato Francês e ao professor Mestre Vagner de Brito Nascimento pela orientação, incentivo, confiança e paciência para com a minha pessoa.

– A toda equipe do laboratório GERCOM da UFPa, em especial pelos colegas Billy, André, Junior (in memoriam), Airton e Marlon, pela ajuda intelectual e apoio em diversos momentos em que eu já estava desacreditado.

– Muito obrigado à força divina que move o universo e nos presenteia com o plano natural das coisas.

Agora eu sigo caminhando na utopia da viagem da vida, sendo ela meu próprio destino. Aproveitando sabiamente cada oportunidade que me aparece, o que uns chamam de sorte, outros de meritocracia, eu chamo de privilégio. Priorizando o recebimento e a transmissão de informação e conhecimento para aqueles que não tiveram os mesmos privilégios que eu, a fim de tentar possibilitar novas oportunidades para estes.

---

# Resumo

Resumo da Dissertação apresentada à UFPA como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

## **Extensão do Plano de Controle Sem Fio para Ambientes Experimentais Outdoor**

Orientador: Antônio Jorge Gomes Abelém

Palavras-chave: Plano de Controle Sem Fio; Ambientes Experimentais; Outdoor.

O uso de ambientes experimentais sem fio é uma poderosa ferramenta para validação de pesquisas em Internet do Futuro, testes de produtos e serviços. EUA, Europa, Japão, Brasil, entre outros países, através de iniciativas como FIRE, GENI, WISHFULL e FIBRE, já disponibilizam tais ambientes para pesquisadores. No entanto a topologia desses ambientes, no contexto sem fio e outdoor, ainda é muito limitada em função da necessidade de infraestrutura cabeada para o controle dos dispositivos. Desta forma, esta dissertação apresenta uma proposta de plano de controle sem fio para esses ambientes experimentais outdoor, mantendo suas características de utilização e adicionando funcionalidades através da arquitetura de controle proposto fundamentado no framework denominado Orquestrador para Redes Experimentais Sem Fio de Múltiplos Saltos Definidas por Software (OREx).

---

# Abstract

Abstract of Dissertation presented to UFPA as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

## Extension of the Wireless Control Plan for Outdoor Experimental Environments

Advisor: Antônio Jorge Gomes Abelém

Key words: Wireless Control Plan; Experimental Environments; Outdoor.

The use of experimental wireless environments is a powerful tool for validating surveys in Future Internet, testing products and services. USA, Europe, Japan, Brazil, among other countries, through initiatives such as FIRE, GENI, WISHFULL and FIBRE, already provide such environments for researchers. However, the topology of these environments, in the wireless and outdoor context, is still very limited due to the need for wired infrastructure to control the devices. In this way, this dissertation presents a wireless control plan proposal for these outdoor experimental environments, maintaining its characteristics of use and adding functionalities through the proposed control architecture based on the framework called Orchestrator for Wireless Experimental Networks of Multiple Jumps Defined by Software (OREx).

---

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	p. 2
1.1	Visão geral	p. 2
1.2	Motivação e desafios	p. 4
1.3	Objetivos	p. 5
1.4	Organização do texto	p. 5
<b>2</b>	<b>Referencial Teórico</b>	p. 6
2.1	Visão Geral	p. 6
2.2	Internet do Futuro	p. 7
2.3	Redes Definidas por Software	p. 8
2.4	Redes Sem Fio	p. 9
2.4.1	Redes Ad Hoc	p. 9
2.4.2	Redes em Malha	p. 10
2.4.3	OpenMesh	p. 10
2.5	Ambiente Experimental	p. 11
2.5.1	Ambientes Experimentais de Redes Sem Fio	p. 12
2.6	Framework	p. 12
2.6.1	Visão Geral	p. 12
2.6.2	Arquitetura Model-View-Controller	p. 13

2.6.3	OREx (Orquestrador para Redes Experimentais Sem Fio de Múltiplos Saltos Definidas por <i>Software</i> )	p. 14
2.7	Conclusões do Capítulo	p. 18
<b>3</b>	<b>Trabalhos Relacionados</b>	p. 19
3.1	Frameworks para Redes Sem Fio	p. 19
3.1.1	SCUBA	p. 19
3.1.2	JANUS	p. 20
3.1.3	Mesh-Mon	p. 20
3.1.4	MAYA	p. 20
3.1.5	MobiMESH	p. 20
3.1.6	Abaré	p. 21
3.1.7	AIGA (Ambiente Integrado de Gerência para Redes em Malha Sem Fio IEEE 802.11s)	p. 22
3.1.8	meshAdmin	p. 23
3.1.9	IEEE 802.11-based Wireless Mesh Network Testbed	p. 23
3.2	Frameworks e Ambientes Experimentais para Internet do Futuro	p. 25
3.2.1	OMF (cOntrol and Management Framework)	p. 25
3.2.2	NITOS (Network Implementation Testbed using Open Source platforms)	p. 27
3.2.3	GENI (Global Environment for Network Inovation)	p. 28
3.2.3.1	PlanetLab	p. 29
3.2.3.2	ORBIT	p. 30
3.2.3.3	EmuLab	p. 31
3.2.4	FIBRE (Future Internet Brazilian Environment for Experimentation)	p. 32
3.3	FIRE (Future Internet Research and Experimentation)	p. 33
3.3.1	CREW (Cognitive Radio Experimentation World)	p. 33
3.4	WISHFUL (Wireless Software and Hardware platforms for Flexible and Unified radio and network control)	p. 34
3.5	Challenges in Deploying Steerable Wireless Testbeds	p. 36
3.6	Conclusões do capítulo	p. 37

#### 4 Extensão do Plano de Controle Sem Fio para Ambientes Experi-

<b>mentais Outdoor</b> .....	p. 39
4.1 Considerações Iniciais .....	p. 39
4.2 Requisitos de Controle para Ambientes Experimentais .....	p. 40
4.3 Arquitetura dos Planos Lógicos do Ambientes Experimentais Outdoor .....	p. 42
4.3.1 Plano de Controle e Gerência .....	p. 43
4.3.2 Plano de Dados .....	p. 44
4.4 Infraestrutura de Rede do Ambiente do Experimental Outdoor .....	p. 44
4.4.1 Definição dos Componentes da Infraestrutura .....	p. 45
4.5 Características do Plano de Controle e Gerência .....	p. 46
4.6 Conclusões do capítulo .....	p. 48
<b>5 Análise da Proposta</b> .....	p. 49
5.1 Ambiente Experimental Sem Fio .....	p. 49
5.1.1 Comparação entre Ambiente Experimental Sem Fio .....	p. 49
5.1.2 Resultados do Ambiente Experimental Sem Fio .....	p. 51
5.2 Definição de Controle por Usuário .....	p. 51
5.2.1 Interface de Controle do Usuário: Administrador e Experimentador .....	p. 52
5.3 Implantação da Arquitetura de Controle Proposta .....	p. 53
5.3.1 Funcionamento da Arquitetura (comandos, extensibilidade, etc) .....	p. 53
5.3.1.1 Cenário de Teste .....	p. 53
5.3.1.2 Teste do Controle de Energia .....	p. 54
5.3.1.3 Teste da Instalação de Firmware (Caso de Uso) .....	p. 56
5.3.1.4 Teste da capacidade do plano de controle sem fio .....	p. 58
5.4 Conclusões do Capítulo .....	p. 59
<b>6 Considerações Finais e Publicações</b> .....	p. 61
6.1 Conclusões .....	p. 61
6.2 Disseminação de Informação .....	p. 61
6.3 Trabalhos Futuros .....	p. 62
<b>Referências</b> .....	p. 63

---

## Lista de Abreviaturas

AM	<i>Aggregate Manager</i>
AODV	<i>Ad Hoc On-Demand Distance Vector</i>
API	<i>Application Programming Interface</i>
CLI	<i>Command Line Interface</i>
CM	<i>Chassi Manager</i>
EC	<i>Experiment Controller</i>
ED	<i>Experiment Description</i>
FIBRE	<i>Future Internet Brazilian Environment for Experimentation</i>
FIND	<i>Future Internet Design</i>
FTP	<i>File Transfer Protocol</i>
GENI	<i>Global Environment for Network Innovations</i>
GPL	<i>General Public License</i>
HTTP	<i>Hypertext Transfer Protocol</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
IPv6	<i>Internet Protocol version6</i>
LDAP	<i>Lightweight Directory Access Protocol</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MANET	<i>Mobile Adhoc Network</i>
MCL	<i>Mesh Connectivity Layer</i>
MCS	<i>Measurement Collection Server</i>
MEC	<i>Mobile Edge Computing</i>

MVC	<i>Model-View-Controller</i>
OEDL	<i>OMF Experiment Description Language</i>
OLSR	<i>Optimized Link State Routing Protocol</i>
OMF	<i>cOntrol Management framework</i>
OML	<i>OMF Measurement Library</i>
ORBIT	<i>ORBIT-Open-Access Research Testbed for Next-Generation Wireless Networks</i>
OREx	Orquestrador para Redes Experimentais Sem Fio de Múltiplos Saltos Definidas por Software
RC	<i>Resource Controller</i>
RM	<i>Resource Manager</i>
RNP	Rede Nacional de Pesquisa
SBrT	Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais
SDMWN	<i>Software-Defined Multihop Wireless Networks</i>
SDN	<i>Software Defined Network</i>
SFA	<i>Slice-Based Facility Architecture</i>
SNMP	<i>Simple Network Management Protocol</i>
SSH	<i>Secure Shell</i>
TCP	<i>Transport Control Protocol</i>
UPI	<i>Unificated Programmed Unificaded</i>
WART	<i>Wide-Area Radio Testbed</i>
WISHFUL	<i>Wireless Software and Hardware platforms for Flexible and Unified radio and network control</i>
WNT	<i>Wireless Network Testbed</i>

---

# Lista de Figuras

Figura 1	Arquitetura de Rede Definida por Software. Fonte: Autor	8
Figura 2	Arquitetura MVC.	13
Figura 3	Arquitetura OREx. Fonte: [Nascimento 2014]	15
Figura 4	Arquitetura do MiddRoute. Fonte: [Pinheiro et al. 2009]	18
Figura 5	Arquitetura MobiMESH. Fonte: [Capone et al. 2007]	21
Figura 6	Arquitetura Abaré. Fonte: [Pinheiro et al. 2009]	22
Figura 7	Arquitetura do Ambiente Experimental de Redes em Malha Sem Fio. Fonte: [Song et al. 2007]	24
Figura 8	Arquitetura OMF.	26
Figura 9	Ambiente Interno - NITOS. Fonte: [NITLab 2016]	27
Figura 10	Visão Geral- NITOS. Fonte: [NITLab 2016]	28
Figura 11	Ambiente Experimental Sem Fio ORBIT.	30

Figura 12	Cluster EmuLab. ....	31
Figura 13	Visão Geral das Topologias das Ilhas FIBRE. ....	32
Figura 14	Ambiente Experimental CREW federado. Fonte: [Commission 2010] ..	34
Figura 15	Diagrama conceitual da arquitetura WISHFUL com interface de programação unificada. Fonte: [Programme 2015] .....	35
Figura 16	Infraestrutura do ambiente experimental portátil (Fed4FIRE). Fonte: [Programme 2015]	
Figura 17	Visão Geral. Fonte: [Anderson et al. 2010] .....	36
Figura 18	Arquitetura dos Planos Lógicos do Ambientes Experimentais Outdoor. Fonte: Autor .....	43
Figura 19	Infraestrutura de Rede. Fonte: Autor. ....	45
Figura 20	Esquema de ligação física (cabeada). Fonte: Autor. ....	46
Figura 21	Separação de Planos com adição do Nodo Sem Fio. Fonte: Autor. ....	47
Figura 22	Resiliência (tolerância à falhas). Fonte: Autor. ....	47
Figura 23	Comparação entre ambientes. Fonte: Autor. ....	50
Figura 24	Tela de Login. Fonte: Autor. ....	52
Figura 25	Interface gráfica para usuário administrador. Fonte: Autor. ....	52
Figura 26	Interface gráfica para usuário administrador. Fonte: Autor. ....	53
Figura 27	Cenário de Teste. Fonte: Autor. ....	54
Figura 28	Interface de Controle de Energia. Fonte: Autor. ....	54

Figura 29	Comando do script do middleware. Fonte: Autor. ....	55
Figura 30	Trafego de Pacotes (tcpdump). Fonte: Autor. ....	55
Figura 31	Tempo de resposta para ligar o Nodo Experimental (sem fio x cabeado).	56
Figura 32	Diagrama de Atividade - Instalação de Firmware. Fonte: Autor. ....	57
Figura 33	Média do Tempo de Transferência. Fonte: Autor. ....	58
Figura 34	Média da Vazão. Fonte: Autor. ....	58
Figura 35	Sobrecarga no Plano de Controle. Fonte: Autor. ....	59

---

# Lista de Tabelas

Tabela 1	Frameworks de Controle para Redes Sem Fio: Características da Arquitetura .....	37
Tabela 2	Framework para Ambientes de Redes Sem Fio: Comparação de Características .....	38
Tabela 3	Ambientes Experimentais de Rede Sem Fio: Comparação da Arquitetura de Rede .....	38
Tabela 4	Comparação entre ambientes .....	50

---

---

# CAPÍTULO 1

---

## Introdução

### 1.1 Visão geral

Atualmente, não é possível pensar em um serviço oferecido à população em geral que não necessite de alguma forma de comunicação através de redes de computadores. A Internet se tornou uma ferramenta conhecida e utilizada por uma fração significativa da população. Iniciativas como as de inclusão digital estão sendo desenvolvidas em diversas áreas científicas, com o objetivo de expandir seu alcance, idealmente a toda a população mundial, de acordo com Dorgivsl Guedes [Guedes et al. 2012], mesmo enfrentando alguns problemas de convergência de informação entre as áreas.

Neste contexto, Marcelo Moraes [Moraes et al. 2013], afirma que existe um aumento na demanda por melhorias na infraestrutura e na necessidade de novas tecnologias no núcleo da rede. Entretanto, há uma limitação na velocidade desses avanços que, em grande parte, se dá pelo forte atrelamento entre *hardware* e *software* dos ativos de rede (roteadores e *switches*), em que o primeiro já sai de fábrica com seu respectivo *software* instalado e com todos os recursos predefinidos. Qualquer extensão de suas funções só poderá ser executada pelo fabricante e, muitas vezes, mediante à aquisição de licenças de uso.

Como uma das formas de explorar esse vasto campo de pesquisa, a comunidade científica e a indústria estão criando e testando propostas para validar de forma mais confiável as pesquisas sobre arquiteturas e tecnologias para Internet do Futuro, investindo esforços para criação de vários *softwares* que trabalham em conjunto para orquestrar experimentos através de ambientes experimentais, também chamados de *testbeds*, que de acordo com Radatz [Radatz et al. 1990], consistem em ser ambientes que contenham equipamentos, simuladores, instrumentação e outras ferramentas necessárias para conduzir um teste, permitindo assim, que novas soluções tecnológicas sejam desenvolvidas em

ambientes de larga escala e até mesmo em conjunto com as redes de um ambiente de produção.

O ambiente de produção é um ambiente de redes de computadores tradicional utilizada para fornecer o meio de produção, contendo equipamentos, ferramentas, serviços, entre outros para tornar-se uma rede operacional, ou seja, uma rede que não deve ser modificada e testada constantemente pois necessita estar disponível para operação, em que o tráfego de dados e controle atuam em uma mesma rede, dificultando assim a precisão de possíveis testes executados na mesma, diferentemente do ambiente experimental onde o tráfego de dados e controle atuam em redes separadas.

Sendo assim, a comunidade de pesquisa de rede está desenvolvendo soluções alternativas para pesquisa experimental em Internet do Futuro, que consiste em pesquisas direcionadas à mudança da arquitetura da Internet atual, na qual, em sua criação, não foi prevista a necessidade de integração de redes heterogêneas entre diferentes dispositivos.

As atividades iniciais para Internet do Futuro, utilizando ambientes experimentais, começaram nos EUA com os programas GENI (Global Environment for Network Innovation) e FIND (Future Internet Design) [FIND 2013], tendo como objetivo testar e consolidar um grande conjunto de pesquisas em comunicação de dados e sistemas distribuídos. Além desses, há outros programas e iniciativas de ambiente de pesquisa para experimentação, entre eles está o FIBRE (Future Internet Brazilian Environment for Experimentation) que está sediado também no Brasil.

O FIBRE [call 2010], iniciou como um projeto cooperado entre Brasil e Europa, e hoje tornou-se um serviço experimental de rede mantido pela RNP (Rede Nacional de Pesquisa) em que os *testbeds* fazem uso de diversas tecnologias diferentes, bem como tendo dois tipos de usuários, experimentadores e administradores. Usuários administradores irão gerenciar e controlar os recursos do *testbed* e usuários experimentadores irão realizar e executar seus experimentos no *testbed*, onde seu desenvolvimento é protegido contra os riscos que se corre ao testar experimentos em um ambiente de produção. Uma das funcionalidades do FIBRE é a possibilidade de realização de testes com equipamentos de redes sem fio, utilizando o arcabouço de controle OMF (cOntrol Management framework) [Rakotoarivelo et al. 2010].

Desde que o FIBRE entrou em operação, ele foi pouco explorado para realização de experimentos sem fio, acredita-se que um dos motivos é o fato que o *testbed* sem fio ter sido definido topologicamente de acordo com as limitações de alcance da infraestrutura cabeada, que hoje é necessária para realizar o controle dos *hardwares* experimentais sem fio e não de fato pelo alcance de cobertura dos mesmos. Para se ter um *testbed* sem fio outdoor com OMF, utilizando o principal *hardware* experimental sem fio atualmente, chamado nodo Icarus, requer um alto custo de infraestrutura cabeada no ambiente, mesmo operando em modo sem fio.

Na arquitetura do ambiente de experimentação sem fio do OMF é previsto que o plano de dados e o plano de controle fossem separados, assim como no contexto de Redes Definidas por Software(SDN), apresentado no Capítulo 2 sessão 2.3, independentemente

das tecnologias sem fio. Plano de Dados é a estrutura física de transmissão de dados na rede, o qual é composto por equipamentos de comutação, nodos experimentais, entre outros. É neste plano que são efetivamente executados os comandos e trafegados os dados referentes à testes de experimentação. O Plano de Controle é composto por elementos capazes de decidir sobre quais estratégias de roteamento usar para o bom funcionamento da rede, além de controlar experimentos e o ambiente experimental em si.

Estes elementos se relacionam diretamente com integrantes do Plano de Dados, embora existam alguns casos em que não há interação, como por exemplo a utilização de uma interface de provisionamento automático [Santos et al. 2008]. Contudo, a arquitetura física do OMF no FIBRE utiliza um único *hardware* (Icarus) para operar no plano de dados e no plano de controle. O que pode ocasionar perda na manipulação do nodo Icarus e/ou falha na comunicação com o plano de controle.

Na comunicação sem fio do plano de controle se pode utilizar qualquer tecnologia de rede sem fio, por exemplo a rede LTE (*Long Term Evolution*), onde é possível ter um sinal maior de cobertura quando comparada com rede sem fio WI-FI (IEEE 802.11g) e possibilitar experimentos de *SmartCity* [Leccese et al. 2014], porém como contrapartida atualmente para a utilização de LTE requerer o uso de equipamentos com custo financeiro superior aos que utilizam IEEE 802.11. Tendo em vista um custo financeiro viável, pode-se utilizar Redes de Múltiplos Saltos Sem Fio, provendo assim resiliência no plano de controle, porém um sinal de cobertura menor em relação ao LTE.

## 1.2 Motivação e desafios

A motivação e os desafios nascem da necessidade de se desenvolver uma solução sem fio para o plano de controle de ambientes experimentais que proporcione o gerenciamento, monitoramento e o controle da rede em ambientes *outdoor* sem a limitação de alcance de redes cabeadas. Oferecendo um ambiente experimental simples e sem a necessidade de uma infraestrutura cabeada complexa e um *framework* de controle para ambientes experimentais sem fio.

O processo de controle envolve a utilização de vários protocolos, ferramentas e técnicas para ajudar o usuário, seja administrador ou experimentador, a gerenciar os diferentes dispositivos presentes no ambiente. Sendo, pois, a interação entre estes elementos indispensáveis para tornar o controle possível.

Com esta visão, é necessária uma maneira de prover conectividade no plano de controle sem a necessidade de uma infraestrutura cabeada, ou seja, tanto o plano de dados quanto o plano de controle devem ser sem fio a fim de facilitar seu uso em ambientes *outdoor*, evitando a perda da manipulação do nodo Icarus, seja coletando ou no processando dados.

O plano de controle e o plano de dados devem utilizar nodos (*hardwares*) com processamento separado. É necessário que o nodo de controle tenha processamento, para

manter a manipulação do nodo Icarus. Estes planos devem estar separados, pois no plano de dados é possível realizar modificações de *firmware* e entre outras configurações que podem ocasionar a falha de comunicação com o plano de controle do ambiente de experimentação sem fio.

## 1.3 Objetivos

O principal objetivo desta dissertação é apresentar uma proposta sem fio para o plano de controle de ambientes experimentais, capaz de realizar o gerenciamento, monitoramento e o controle da rede em ambientes *outdoor* sem a limitação de alcance de redes cabeadas. A proposta irá auxiliar no processo de controle de ambientes experimentais de redes sem fio *outdoor* com baixo custo financeiro. As principais contribuições são:

- Investigar quais as propostas/ferramentas semelhantes já existentes;
- Definir métodos de controle para implantação, monitoramento, gerenciamento, controle do ambiente e da rede sem fio;
- Padronizar componentes em um ambiente experimental de rede sem fio *outdoor*;
- Especificar e analisar os requisitos do *framework* de controle a ser implementado;
- Adequar a infraestrutura do ambiente experimental sem fio do FIBRE para operar em modo *outdoor*;
- Aplicar resiliência no plano de controle sem fio do ambiente experimental;
- Definir a arquitetura do *framework* de controle;
- Validação do *framework* em um ambiente real.

## 1.4 Organização do texto

O restante da dissertação está dividido em 5 capítulos seguindo o ordenamento: Capítulo 2, onde são apresentadas as tecnologias, serviços e trabalhos que serviram de embasamento para o desenvolvimento desta proposta. Capítulo 3, neste é feita uma contextualização de trabalhos relacionados e apresenta algumas comparações entre elas. O Capítulo 4 expõe de forma detalhada a proposta deste trabalho, desde requisitos à arquitetura física e lógica. Em seguida o Capítulo 5 apresenta os resultados referentes aos testes de comprovação de funcionamento da proposta. Por fim, no Capítulo 6, conclui-se sobre o resultado deste trabalho e fala sobre os eventos em que foram aceitos artigos gerados a partir desta proposta.

---

---

# CAPÍTULO 2

---

## Referencial Teórico

Este capítulo apresenta uma visão geral sobre *internet* do Futuro e aborda as questões relacionadas aos serviços do ambiente experimental, como a utilização de *frameworks* no ambiente. No restante do capítulo introduzimos o OREx, propulsor da ideia central deste trabalho, mostrando sua arquitetura e detalhando seus componentes que são a base para o entendimento da proposta. Adicionalmente, apresentamos uma breve abordagem de Redes Sem Fio e suas características convencionais que possibilitam redundância.

### 2.1 Visão Geral

A arquitetura da Internet atual vem passando por muitas adaptações nos últimos anos para incluir novas funcionalidades que não foram previstas no projeto original. Muitos dos especialistas de rede envolvidos em projetos de pesquisa consideram que é necessário realizar o estudo de arquiteturas alternativas para Internet do Futuro (do inglês *Future Internet* - FI) como uma forma verdadeiramente eficaz para resolver muitos dos relevantes problemas resultantes de tais adequações.

O paradigma de Redes Definidas por *Software* (SDN) [Sezer et al. 2013] vem se apresentando como a alternativa mais promissora ao futuro da Internet atual, tendo em vista o recente processo de “ossificação” da arquitetura da mesma. Há algumas implementações que tornam possível o emprego do novo paradigma SDN, em contrapartida o que notoriamente tem recebido grande destaque, tanto no meio comercial quanto acadêmico, o protocolo desenvolvido por McKeown [McKeown et al. 2008], chamado OpenFlow, que originalmente foi desenvolvido para trabalhar com redes cabeadas, tornando possível a clara separação entre os planos de dados e de controle, melhorando desta forma o gerenciamento do fluxo da rede.

Diante deste novo cenário surgem novas oportunidades de pesquisas e novos projetos, para isso é necessário um ambiente propício para realização de testes de produtos e serviços para Internet do Futuro. Na medida em que as redes sem fio se tornam uma parte crítica da infraestrutura doméstica, empresarial e industrial, os pesquisadores irão atender a essas demandas fornecendo novas tecnologias de rede. No entanto, essas tecnologias devem ser testadas antes de serem liberadas para uso geral. Este foi um dos motivos que deram início aos ambientes experimentais de rede para Internet do Futuro, onde é possível testar de forma controlada experimentos de rede virtual, cabeada, sem fio e outros.

## 2.2 Internet do Futuro

A concepção original da arquitetura da internet foi baseada em uma rede fixa, confiável com conexão um para um, onde não era prevista a necessidade de integração de redes heterogêneas com dispositivos de tecnologia sem fio. Sendo assim, a Internet atual vem passando por diversas modificações, pois apresenta uma série de barreiras técnicas para prover estes serviços. Uma das maiores barreiras é a sobrecarga semântica do IP (Internet Protocol), essas modificações tornaram a Internet dinâmica, porém vulnerável e “ossificada” [Paul et al. 2011]. Esse fato deu força aos pesquisadores para trabalharem no desenvolvimento da Internet do Futuro.

Nas discussões entre pesquisadores de Internet do Futuro, "existem dois segmentos de pesquisas" [Rexford and Dovrolis 2010], o chamado “evolucionária”, que basicamente propõe extensões ou evoluções do protocolo IP, no qual seus defensores argumentam que, embora uma mudança na internet seja necessária, este protocolo vem funcionando de forma satisfatória nos últimos anos e que a mudança deve partir da evolução do próprio IP, como vem sendo pesquisado e implementado o IPv6, e não de uma ruptura com o IP. Por outro lado, há pesquisadores que defendem que uma nova Internet deve ser criada, assim como proposto por Feldmann em [Feldmann 2007], este grupo defende a ideia de abandonar o protocolo IP, sobre o qual está fundamentada a Internet atual e desenvolver uma base inteiramente nova sobre a qual a rede passará a funcionar, sendo esta a ideia do paradigma SDN. Esta ideia de “recomeçar a Internet do zero” é conhecida como *Clean Slate*, ou arquitetura disruptiva.

Diante dos dois segmentos abordados acima é possível considerar que a nova arquitetura seja uma adaptação do protocolo IP, contudo, também pode ser que o IP seja agregado a uma nova estrutura de arquitetura, mesmo ela não tendo o IP como base, ou seja, nenhum dos segmentos pesquisados são excludentes.

"Na comunidade acadêmica existe um amplo consenso de que a Internet atual sofre várias limitações relacionadas com a escalabilidade, suporte a redes móveis de vários tipos (múltiplos saltos, veiculares, celular, entre outros), mobilidade, ao consumo de energia, a transparência, a segurança, entre outros" [Farias et al. 2011], isto ocorre devido à crescente demanda da comunidade industrial para preencher a lacuna entre a pesquisa

visionária e a experimental em grande escala.

## 2.3 Redes Definidas por Software

As Redes Definidas por *Software* [Sezer et al. 2013] estão trazendo mudanças significativas no modo de criação e operação das redes, possuindo um modelo emergente ou, como uns denominam, de arquitetura emergente. Este modelo tem a pretensão de ser dinâmico, gerenciável, adaptável e de baixo custo, procurando ser adequada à alta largura de banda e à natureza dinâmica das aplicações de hoje.

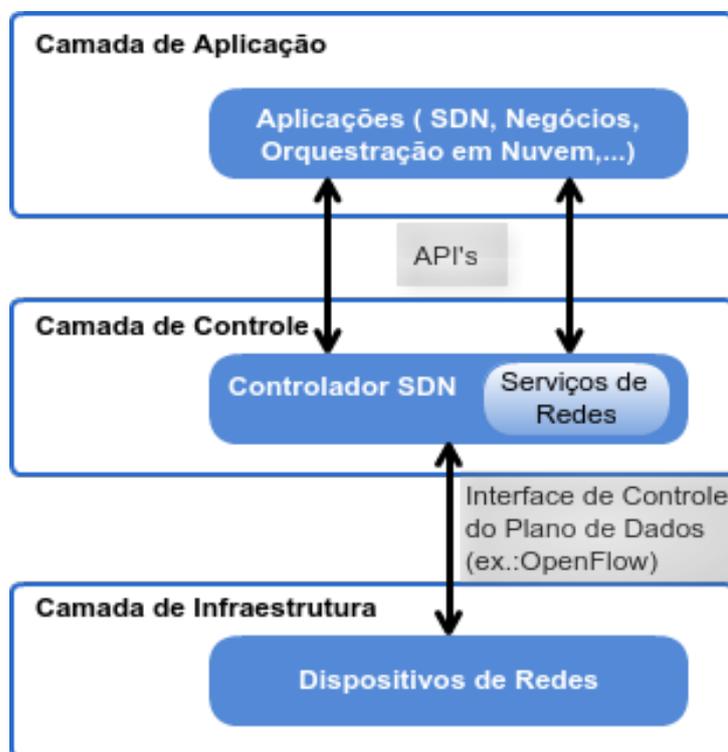


Figura 1: Arquitetura de Rede Definida por Software. Fonte: Autor

A arquitetura de Rede Definida por Software, Figura 1, permite desassociar o controle de rede das funções de encaminhamento, permitindo tornar programável o controle da rede e da infraestrutura subjacente a ser gerenciada a partir de aplicações e serviços de rede. Isto promove o desenvolvimento de um *software* mais inteligente, uma melhor automação das operações e do custo de controle, além de acelerar a criação de novos serviços.

Dentro deste conceito surgiram as redes sem fio definidas por software ou SDWN (Software Defined Wireless Networks), apresentado por Jagadeesan [Jagadeesan and Krishnamachari]. Estas, assim como em SDN, possuem um controle centralizado através de software e a separação entre o plano de controle e plano de dados, atuando com redes sem fio. Aproveitando a flexibilidade nativa das redes sem fio e usufruir dos benefícios de SDN.

## 2.4 Redes Sem Fio

Redes sem fio podem proporcionar aos usuários de dispositivos estáticos e móveis a capacidade de comunicação ubíqua e fácil acesso à informação, independentemente da localização. Segundo Royer [Royer and Toh 1999], existem duas variações das redes sem fio, a primeira é conhecida como rede sem fio infraestruturada, ou seja, redes que dependem de *gateway* fixos e cabeados, a partir dos quais os dispositivos que fazem parte da rede sem fio ganham acesso a outras redes, um exemplo bem conhecido, temos a rede 802.11g (WI-FI).

O segundo tipo de redes sem fio são as redes que não possuem qualquer infraestrutura de acesso central, realizando a transmissão em múltiplos saltos. Estes tipos de redes são geralmente conhecidos como redes auto organizáveis: redes ad hoc móveis, redes em malha sem fio, redes de pacotes de rádio, redes móveis e entre outros, de acordo com Macker [Macker 1999].

Com base nisto é possível dizer que atualmente grande parte dos ambientes experimentais de rede sem fio estão utilizando em seu plano de dados, redes auto organizáveis ou redes que possuem redundância, como as redes apresentadas a seguir:

### 2.4.1 Redes Ad Hoc

O conceito de redes Ad Hoc ou MANET MANET (*Mobile Adhoc Network*) teve início nos Estados Unidos na década de 70, para comunicação via rádio em um ambiente militar, onde há necessidade de mobilidade dos dispositivos da rede e facilidade na conexão de novos dispositivos.

Ad Hoc não necessita de um ponto de acesso comum aos computadores conectados a ela, de modo que todos os dispositivos da rede atuam ao mesmo tempo como cliente e roteador, encaminhando comunitariamente informações que vêm de dispositivos vizinhos, o que pode permitir que haja maior flexibilidade na posição dos dispositivos da rede. Contudo, para que seja possível usar isto é necessário um protocolo de roteamento proativo, sendo mais comumente usado o AODV (*Ad Hoc On-Demand Distance Vector*), um protocolo que opera por demanda com distância de vetor.

Esta rede tem como vantagem sua implantação simples e rápida, que pode ser em ambientes *indoor* ou *outdoor*, pois o dispositivo com suporte à tecnologia Ad Hoc, desde que tenha alcance de sinal entre os nodos da rede, pode se comunicar a qualquer momento na rede sem restrição.

Ou seja, uma vez que a rede ad hoc sem fio utiliza nodos móveis, a topologia da rede pode mudar rapidamente e de forma inesperada. Os nodos móveis podem se comunicar uns com os outros sem a intervenção de uma estação base ou ponto de acesso centralizado, onde cada nodo atua tanto como roteador e como (*host*). Dessa forma, cada nodo participa da descoberta e manutenção de rotas para os outros nodos. Devido ao limitado raio de transmissão das redes sem fio, múltiplos saltos (*hops*) podem ser

necessários para efetuar a troca de dados entre os nodos da rede, como apresentado por Fábio Buiati em [Buiati ].

## 2.4.2 Redes em Malha

O protocolo IEEE 802.11s, denominado Redes Mesh (do português, Redes em Malha) é uma das derivações de rede sem fio para o tráfego de dados e voz na rede, através de pontos de acessos que realizam o roteamento fazendo com que cada nodo da rede colabore na propagação e expansão da rede. Devido a sua praticidade de implantação, assim como na rede Ad Hoc Sem fio, esta ainda pode ser vista como uma tecnologia promissora em conjunto com as inovações tecnológicas pois é uma rede tolerante a falhas, ou seja, possui resiliência.

O protocolo de roteamento proativo da rede Mesh, chamado OLSR, uma versão melhorada do clássico de algoritmo de estado de enlace, sempre saberá quais saltos serão necessários para que a requisição de um usuário em qualquer ponto da rede, chegue da forma mais eficiente possível ao seu destino, além de ter como característica o *roaming* ou "*fast handoff*", apresentado por Sangheon Pack [Pack et al. 2007], onde é possível que o usuário transite entre os nodos da rede sem perder a conexão no momento da troca.

Uma rede mesh é composta de vários nodos/roteadores, que passam a se comportar como uma única e grande rede, dando possibilidade que o cliente se conecte em qualquer um destes nodos. Isto é possível devido o protocolo de roteamento fazer a varredura das diversas possibilidades de rotas de fluxo de dados, com base na tabela dinâmica, onde é decidido qual a rota mais eficiente a seguir, levando em conta diversos fatores como: menos saltos, menor perda de pacotes, entre outros.

Esta varredura é feita diversas vezes por segundo ou por um intervalo de tempo maior, sendo transparente ao usuário, mesmo quando ocorre alteração de rota de acesso aos *gateways*. Ou seja, o sistema rearranja automaticamente outra rota, sem que usuário perceba ou perca a conexão. Porém isto sobrecarrega a rede, consumindo recursos como largura de banda e tempo de processamento, o que geralmente é uma desvantagem.

## 2.4.3 OpenMesh

As redes OpenMesh apresentadas em Tsarmpopoulos [Tsarmpopoulos et al. 2005] consistem de um *hardware* com *firmware* de código-fonte aberto GPL General Public License, no qual, através desta, é possível desenvolver uma solução inteira apenas com *software* livre para implementar uma rede Mesh sem fio.

Os componentes necessários para se obter uma rede OpenMesh são: Roteadores que independem de fabricante, marca e modelo, que permitam alteração no *firmware* e que possuam os mesmos padrões na camada física e de enlace; *firmware* GPL, o responsável por abstrair as diferenças entre fabricantes, marcas e modelos de roteadores, proporcionando uma camada homogênea na qual é possível usar as mesmas ferramentas e configurações;

e protocolo de roteamento que faça com que os roteadores atuem como roteadores Mesh.

As alterações são feitas apenas nos roteadores, já que este tipo de rede geralmente implementada usando uma arquitetura infraestruturada. "O *backbone* da rede é composto apenas de roteadores Mesh que fornece a infraestrutura básica de acesso aos clientes não Mesh. Através deste *backbone* é possível interligar diferentes redes com diferentes tecnologias de transmissão. Normalmente, esta é a arquitetura de rede mais utilizada, visto que requer alterações apenas nos roteadores, no entanto, estas redes aceitam a comunicação com outros tipos de redes e seus respectivos equipamentos"[Aguiar<sup>1</sup> et al. ].

## 2.5 Ambiente Experimental

Ambiente Experimental, também chamado de *Testbed*, segundo Leandro Ciuffo [Ciuffo 2016], é uma plataforma de experimentação que permitem a realização de testes de teorias científicas e de novas tecnologias em um ambiente que reproduz em escala um cenário real. Este *testbed* é protegido contra os possíveis riscos de experimentos, mesmo em um ambiente já em produção (rede de produção), permite também a sua utilização para testes com ferramentas computacionais e novas tecnologias de forma transparente e repetível.

Com isso é possível realizar o gerenciamento de forma compartilhada e dinâmica, gerindo todo a rede e o ambiente experimental como um todo. Possuindo dois tipos de usuários: administradores, que irão gerenciar e controlar os recursos do [Ciuffo 2016] e usuários experimentadores, que irão realizar e executar seus experimentos no [Ciuffo 2016], onde seu desenvolvimento é protegido contra os riscos a que estão sujeitos os testes em um ambiente de produção.

Sua organização permite entregar serviços da forma mais eficiente possível, otimizando a sua computação, armazenamento e infraestrutura de rede para que possa se adaptar ao tipo de trabalho exigido, ou seja, a infraestrutura é completamente programável, rapidamente configurável e definida sob demanda. Para este feito, os ambientes experimentais são divididos em planos, assim como os ambientes tradicionais, plano de dados, por onde circula os experimentos, e o plano de controle, para o controle do ambiente experimental, ou seja, é necessário que o controle da rede não interfira nos experimentos e que a rede de cada plano seja separada fisicamente.

Posto que existem diversos ambientes experimentais com tecnologias diferentes, os ambientes experimentais de rede sem fio geralmente demandam rede cabeada em sua infraestrutura para a rede de controle, inviabilizando seu uso em ambientes *outdoor*. Hoje há vários tipos de pesquisa sendo testadas em ambientes experimentais, como redes veiculares, redes em malhas, nodos móveis, WiMax entre outros, que estão possibilitando diversos tipos de avaliação com 802.11, como controle de taxa, troca de canais, efeito de captura, dentre outros.

### 2.5.1 Ambientes Experimentais de Redes Sem Fio

Definido o conceito de Ambiente Experimental, um Ambiente Experimental de Rede Sem Fio (em inglês, *Wireless Network Testbed* – WNT) em sua plataforma de pesquisa fornece a capacidade de implementar a integração de serviços de voz, multimídia e dados sem fio. Facilitando a avaliação e otimização de novas tecnologias para rede sem fio e tecnologias já desenvolvidas.

Muitos dos ambientes experimentais de rede sem fio operam de forma heterogênea, existe uma parte cabeada e outra sem fio, onde geralmente a rede sem fio permite a redundância com a finalidade de reduzir os riscos de insegurança e perda de pacote. Atualmente ambientes como o ORBIT [Raychaudhuri et al. 2005], FIBRE [call 2010], GENI [Berman et al. 2014], WISHFULL[Programme 2015], entre outros, possibilitam a realização pesquisas práticas em sistemas de comunicação de dados móveis e fixos com base na mistura de tecnologias de transmissão. Vale destacar que nesses ambientes somente o plano de dados é sem fio e o plano de controle é cabeado.

Nesses ambientes são encontradas algumas funções como: precisão no comportamento da rede; controlabilidade da configuração de topologia e condições do ambiente; mobilidade dos nodos; repetibilidade dos experimentos; custo eficaz em termos de *hardware*, mão de obra, espaço e tempo; ferramentas para a coleta de dados; Compartilhamento de recursos; capacidade para suportar múltiplos nodos; escalabilidade.

## 2.6 Framework

Uma rede sem fio em um ambiente experimental consiste de uma série de características e requisitos que devem ser levados em consideração na implantação, gerência e controle do ambiente. Com isso, para suprir as necessidades e facilitar a interação com o usuário, se faz necessário o uso de um *framework* que auxilie nas tarefas, descritas no Capítulo 4.

### 2.6.1 Visão Geral

Na área de desenvolvimento de *software*, um *framework* é uma abstração que une códigos comuns entre vários projetos de *software* provendo uma funcionalidade genérica ou específica por configuração durante a programação de uma aplicação.

Um *framework* captura a funcionalidade de várias aplicações com as quais tem algo em comum ou pertencente ao mesmo domínio de interesse. Tendo como objetivo prover uma solução para uma família de interesses semelhantes, que devem ser flexíveis e extensíveis para permitir a construção de aplicações com pouco esforço, especificando apenas as particularidades de cada aplicação, ou seja, pode-se dizer que um *framework* é uma aplicação quase completa, mas com pedaços faltando.

## 2.6.2 Arquitetura Model-View-Controller

*Model-View-Controller*, ou simplesmente MVC, é uma arquitetura de aplicação apresentada em [Deacon 2009], Figura 2, é a mais utilizada em *frameworks* de aplicação comercial e não comercial, pois pode ser implementada em diversas linguagens de programação. *Model-View-Controller* é um padrão de arquitetura de *software* que faz a separação de conceitos e a representação da informação da interação do usuário com ele, além da reusabilidade do código.

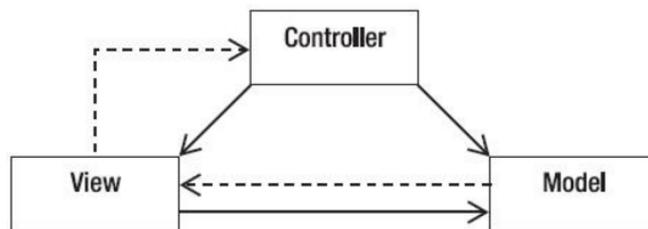


Figura 2: Arquitetura MVC.

Fonte: <https://www.devmedia.com.br/introducao-ao-padrao-mvc/29308>

- O Modelo (*Model*) consiste no armazenamento de dados da aplicação, regras de negócios, lógica e funções como notificação de visões e controladores associados quando há uma mudança em seu estado, permitindo que haja visões de saídas atualizadas e que controladores alterem o conjunto de comandos disponíveis.
- Uma visão (*View*) pode ser qualquer saída de representação dos dados, como uma tabela ou um diagrama solicitado no Modelo. É possível ter várias visões do mesmo dado, como um gráfico de barras para gerenciamento e uma visão tabular para contadores.
- O controlador (*Controller*) faz a mediação da entrada, convertendo-a em comandos para o modelo ou visão, enviando comandos para o modelo atualizar o seu estado e para a visão associada alterar a apresentação da visão do modelo.

Devido ao aumento da complexidade das aplicações atualmente, visando a programação orientada ao objeto, torna-se relevante a separação entre os dados e a apresentação das aplicações, por isso é comum o uso de *frameworks* utilizando MVC em ambientes experimentais, seja para realização de experimentos, controle, gerenciamento, monitoramento e outros. Um *frameworks* para ambientes experimentais sem fio essencial para o desenvolvimento desta proposta e que utiliza arquitetura MVC e redes de múltiplos saltos é o OREx, descrito a seguir.

### 2.6.3 OREx (Orquestrador para Redes Experimentais Sem Fio de Múltiplos Saltos Definidas por *Software*)

O *Framework* OREx [Nascimento 2014], visa atender a comunidade científica por ambientes experimentais voltados para a Internet do Futuro focado nas tecnologias sem fio. Esta proposta também prevê uma extensão do paradigma SDN de forma a contemplar também as redes sem fio e garantir a máxima compatibilidade do paradigma SDN entre os ambientes de rede sem fio e cabeado, definindo a arquitetura de *hardware* mínima e as alterações necessárias no OpenFlow para atender aos requisitos da SDMWN.

Devido a necessidade de dar maior autonomia por parte dos dispositivos é viável inserção de um *middleware* que irá desempenhar essa função, além dos demais componentes necessários da arquitetura para exercer o monitoramento e gerenciamento. Detalha-se a arquitetura de gerência de forma modular MVC, a descrição de cada componente é apresentada a seguir:

Serão destacados o modo de operacional com o módulo de gerenciamento de todos os componentes especificados a seguir.

#### Componente Modelo:

- API Banco de Dados: Responsável pela leitura e escrita das informações no banco de dados permitindo a existência de histórico da rede, histórico de experimentos por usuário, histórico de aplicações executadas na rede por usuário.
- API Controladores: Responsável pela comunicação com os controladores de rede através de *plugins*. É também responsável por fazer a verificação quantitativa de controladores na rede e da inclusão/exclusão dos controladores na rede juntamente com o módulo de Gerenciamento.
- API Virtualização: Responsável pelo controle das máquinas virtuais criadas tanto pelos experimentadores quanto pelos administradores. É quem vai gerenciar as máquinas virtuais.
- API Coleta: Requisita informação para o MIDDROUTER e envia para o MIDDROUTER Gerente. Estas são algumas das informações que podem ser solicitadas:
  - Informações de tráfego para identificar possíveis gargalos na rede;
  - Informação de *hardware* para prevenir sobrecarga nos roteadores;
  - Informação de endereçamento de cada roteador e/ou máquina virtual;
  - Informações da tabela de roteamento para monitorar enlaces e possíveis problemas de roteamento;
  - Informações de quais controladores estão ativo na rede;
  - Informações sobre qual *firmware* está instalado em cada roteador;
  - Informações da versão openflow;
  - Informação da aplicação ativa na rede;

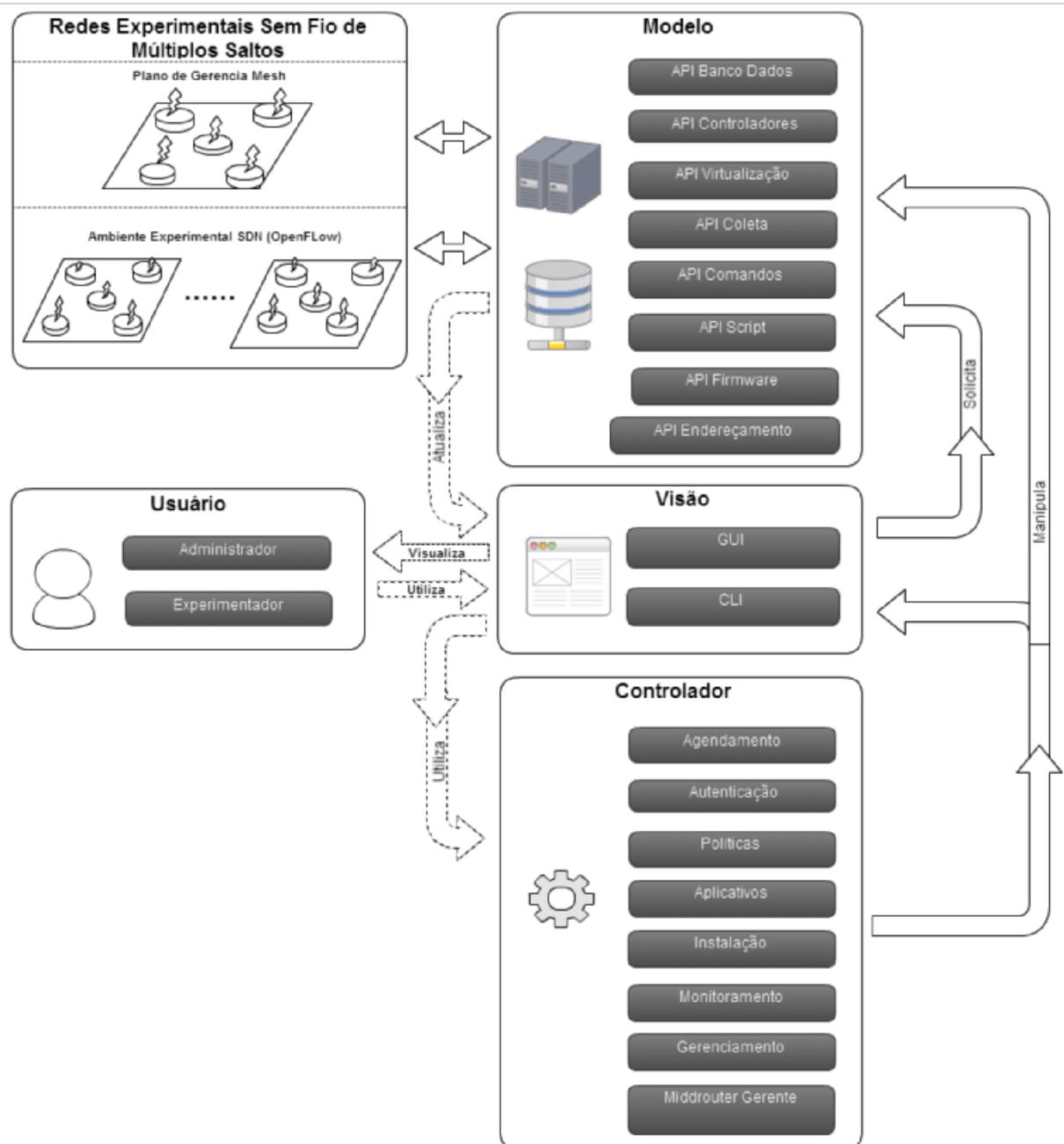


Figura 3: Arquitetura OREx. Fonte: [Nascimento 2014]

- API Comandos: Responsável pelo envio de comandos para o Middrouter. Normalmente, este é utilizado para tarefas administrativas que precisem de intervenção humana. Os comandos possíveis de serem realizados são:
  - Coleta
  - Configurações
  - Status
  - Reiniciar (aplicação, experimento, roteador e/ou máquina virtual)
  - Ligar

– Desligar

- API Script: Os *scripts* gerados pelo módulo de gerenciamento contendo as informações de configuração do nó mesh e/ou OpenFlow e transferido para o roteador e executado através do MIDDROUTER;
- API Firmware: Obtém os *firmwares* inseridos pelo administrador/Experimentador e fornece-os de acordo com as necessidades do *software* de Instalação no módulo controlador.
- API Endereçamento: Coordena os IDs dos roteadores e realiza a separação das redes e IPs utilizados;
  - Através dos IDs dos roteadores recebidos da API de Coleta e a envia para a API de Endereçamento fazer separação da rede de controle da rede de experimentação.

#### Componente Visão:

- GUI: A interface gráfica do utilizador será totalmente *web* e irá auxiliar o(s) usuários Administrador(es) e Experimentador(es).
- CLI: Permitirá aos Administradores e Pesquisadores terem acesso aos dispositivos através de linha de texto.

#### Componente Controlador:

- Agendamento: É uma ferramenta que é responsável pela gestão dos recursos de experimentação, e principalmente constituída por dois componentes, uma interface com o experimentador baseada na *web* e utiliza para a sua tarefa a API Scripts e a API Banco de Dados. A interface do experimentador é responsável por orientá-lo através do processo de reserva, certificando-se de que ele não faça uma reserva em conflito com outras reservas já feitas.
- Autenticação: Será responsável pela gerência de autenticação e autorização, utilizará um esquema misto com base em LDAP e banco de dados local, a utilização da base LDAP irá permitir que a estrutura aceite clientes de outros *testbeds* através de base de dados de usuários já consolidadas em outros projetos como FIBRE.
- Políticas: O módulo de Políticas irá abranger a política de utilização do ambiente assim como a política de privacidade dos resultados e dos dados dos experimentadores envolvidos no *testbed*.
- Aplicativos: Irá disponibilizar um conjunto de *softwares* para testes, esses *softwares* poderão ser tanto para o experimentador quanto para o administrador. No caso do experimentador podemos usar uma base de aplicativos SDN em um repositório que será alimentado pelos próprios experimentadores. E por parte do administrador um conjunto de ferramentas para auxiliar na tarefa de monitorar, gerenciar e administrar este ambiente experimental.

- Instalação: É o responsável por fazer as mudanças de *firmware* nos roteadores e executar a configuração inicial. Uma descrição mais precisa sobre o seu funcionamento e fornecida a seguir:
  - Faz uma solicitação a API Firmware para obter os *firmwares* disponíveis no servidor e que são adequados a escolha do administrador/experimentador, além de obter as informações para integrar o roteador a WMN e/ou a rede SDN de experimentação;
  - Conecta-se ao roteador e transfere o *firmware* para este, reiniciando-o no final do processo de transferência;
  - O *script* gerado pela API Scripts contendo as informações de configuração do nodo mesh e transferido para o roteador e executado através do Agente de Comandos;
  - O roteador é reiniciado e, em seguida, já fará parte da WMN;
  - Ao final desse processo o novo nodo é adicionado à rede e suas configurações são armazenadas no banco de dados;
- Monitoramento: O módulo de monitoramento será responsável por coletar as informações da rede de gerência e do ambiente experimental, a ideia principal deste módulo é que todas as ferramentas sejam implementadas internamente, sem que haja a necessidade de outro *software* para efetuar tal tarefa. Ela irá ajudar tanto o experimentador quanto o administrador do ambiente a visualizar o comportamento do tráfego de controle que irá passar pelo plano de gerência assim como acompanhar o status dos dispositivos.
- Gerenciamento: Este é um dos módulos mais importantes deste *framework*, pois irá conter as funcionalidades principais tanto para o gerente quanto para o experimentador, ele fornecerá um *dashboard* personalizado para cada perfil permitindo que ações sejam feitas para auxiliar e simplificar a operação do ambiente experimental.
- Middrouter Gerente: Este é o responsável por controlar o Middrouter e modificar seus parâmetros. Através dele é possível inserir novos coletores e agentes de decisão, bem como agendar ações a serem tomadas pelos roteadores de forma autônoma.
- Middrouter: É responsável por responder às solicitações da API Coleta, fornecendo as informações solicitadas no formato XML. É preciso também aceitar os comandos enviados pela API Comando e executá-los nos roteadores, além de prover a parte autônoma do sistema. Este agente é dividido em seis camadas, como podemos ver na 4, que representam suas principais funcionalidades. Estas funcionalidades são descritas a seguir:
  - Entrada e Saída: Responsável pela recepção dos pedidos e por encaminhá-los para a camada correta dependendo do tipo de dados recebidos. E também responsável por enviar os resultados dos comandos executados e das métricas coletadas;

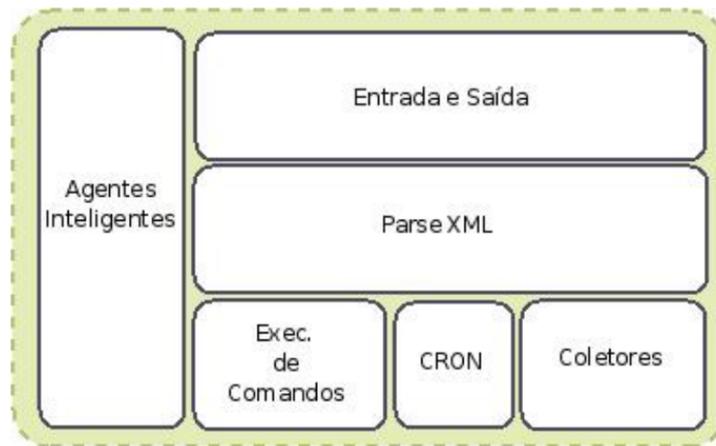


Figura 4: Arquitetura do MiddRoute. Fonte: [Pinheiro et al. 2009]

- Parser XML: Recebe informações em XML da camada superior e identifica qual o tipo da requisição, caso seja de coleta esta é encaminhada para o coletor selecionado, caso seja um comando ele é enviado ao Exec. Comandos. Na direção oposta, ele recebe as informações coletadas e converte-as em XML para que a camada superior possa enviá-las;

- Exec. Comandos: Recebe e executa os comandos cada um deles enviando uma resposta positiva ou negativa relativa a sua execução;

- Coletores: É um conjunto de pequenos módulos responsáveis pela coleta de informações e o envio para a camada superior. Quando um pedido chega ao XML Parser, apenas o nome do coletor é fornecido para que este seja acionado. Uma vez que o módulo coletor é acionado, ele deve executar esse pedido e responder com a informação solicitada. Assim, é fácil a integração dos novos módulos de coleta;

- CRON: Este é o elemento responsável por agendar ações no Middrouter, chamando os elementos de tomada de decisão de acordo com regras temporais estabelecidas;

- Agentes Inteligentes: Estes são os responsáveis por prover a autonomia dos roteadores, permitindo que estes possam tomar decisões com base em informações coletadas e executando comandos de acordo com a análise dos dados recebidos;

## 2.7 Conclusões do Capítulo

Este capítulo teve como objetivo apresentar uma revisão sobre pesquisas e serviços em Internet do Futuro, assim como redes SDN, que propõe separação de planos na rede; Ambiente Experimental; Redes Sem Fio, que possibilitam resiliência em sua infraestrutura; *Frameworks* e a arquitetura MVC, bem como a arquitetura do OREx abordando os principais conceitos e características relevantes para fornecer o claro entendimento da proposta dessa dissertação, exposto no Capítulo 4.

---

---

# CAPÍTULO 3

---

## Trabalhos Relacionados

Este Capítulo apresenta os principais trabalhos, encontrados na literatura, relacionados a proposta desta dissertação. As propostas listadas estão associadas a, ao menos, um aspecto considerado neste trabalho. Desta forma, a seção 3.1, mostra alguns dos *frameworks* e propostas já existentes para redes sem fio convencionais. Em seguida, a seção 3.2 apresenta a ideia central e principais características dos *frameworks* para ambientes experimentais em Internet do Futuro, assim como propostas e serviços para ambientes experimentais sem fio. Na seção 3.3 é concluído o capítulo.

### 3.1 Frameworks para Redes Sem Fio

Nesta sessão serão vistos os *frameworks* e propostas já existentes para redes sem fio que possibilitam redundância no meio de transmissão, dando ênfase assim as redes de múltiplos saltos, como Mesh e Ad Hoc. Onde esses *frameworks* têm como característica realizar o controle, gerenciamento e/ou monitoramento.

#### 3.1.1 SCUBA

Jardosh [Jardosh et al. 2008] projetou o SCUBA, um *framework* para visualização interativa de problemas em redes Mesh de grande escala. Neste *framework*, várias métricas são reunidas em um banco de dados através de um nó *gateway*. Esta informação é usada para gerar uma visão interativa. Uma implementação inicial do *framework* foi testado em uma rede com 15 nós que mostrou a viabilidade do *framework* para fornecer o serviço de visualização. É importante ressaltar que apenas a visualização é fornecida por este *framework*, como forma de monitoramento, não fornecendo nenhum mecanismo de gerência.

### 3.1.2 JANUS

Riggio [Riggio et al. 2007] propôs um *framework* distribuído para redes Mesh chamado JANUS, que utiliza tabela *hash* distribuída, em inglês Distributed Hash Table (DHT) para coletar e armazenar as informações da rede. Os testes realizados foram em uma rede Mesh do tipo cliente [Aggelou et al 2009] usando microcomputadores com MCL (Mesh Connectivity Layer) instalada [Padhye]. Apesar dos testes positivos, a proposta atual é restrita à tarefa de monitorar a rede, sendo necessário o uso de outra ferramenta de gerenciamento para configurar a rede.

### 3.1.3 Mesh-Mon

Mesh-Mon é um *framework* proposto em [Nanda and Kotz 2008] e implementado por Nanda e Kotz, com o objetivo de monitorar a rede para auxiliar o administrador com suas tarefas. Este sistema de gerenciamento é definido como sendo escalável e distribuído, capaz de detectar automaticamente e recuperar falhas na rede. No entanto, o *framework* é reduzido às tarefas de monitoramento da rede e execução de ações automáticas se o comportamento da rede for diferente do padrão definido estaticamente pelo autor.

### 3.1.4 MAYA

Proposta por Mazano [Manzano et al. 2007], MAYA é uma ferramenta para o gerenciamento de rede Mesh que utiliza a base do OpenWRT e disponibiliza uma interface, acessível via navegador WEB, por onde é possível realizar as configurações de cada um dos nós da rede. A ferramenta é disponibilizada com um software gratuito. Apesar da integração da ferramenta com o OpenWRT, ela não oferece mecanismos de monitoramento e de implantação, além da fraca descrição sobre a arquitetura da solução proposta que fica restrita a ser apenas uma ferramenta e não um *framework* que poderia ser implementado de diferentes maneiras.

### 3.1.5 MobiMESH

"MobiMESH é uma implementação para redes Mesh que fornece um *framework* abrangente para análise do comportamento em tempo real, incluindo suporte avançado de roteamento considerando múltiplos nodos, alocação de canais, bem como de gerenciamento" segundo Capone [Capone et al. 2007]. No entanto, este *framework*, como acontece na maioria das outras propostas, não oferece suporte a módulos adicionais que poderiam torná-los adaptáveis à realidade da rede ao longo do tempo.

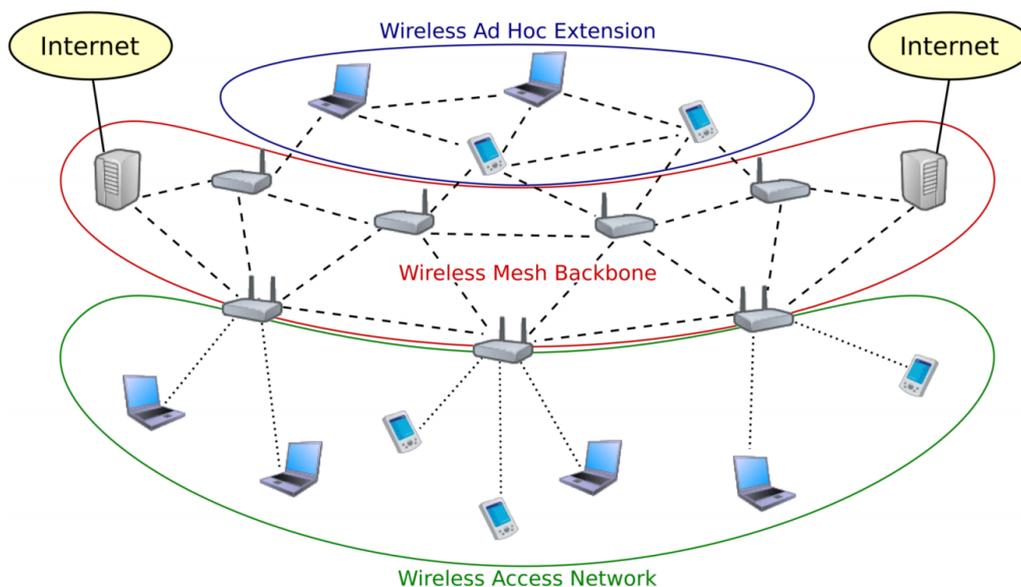


Figura 5: Arquitetura MobiMESH. Fonte: [Capone et al. 2007]

### 3.1.6 Abaré

O Abaré [Pinheiro et al. 2009], é um *framework* controlado e autônomo para implantação e gerenciamento de WMNs em grande escala, sendo dividido em três camadas:

- **Administração:** É a camada responsável pela comunicação e interação entre os roteadores e o administrador da rede. Nesta camada, encontra-se o agente gerente e o agente instalador.
- **Núcleo:** Nesta camada central se encontra o Abaré Core API (*Application Programming Interface*) e outros módulos que compõem o núcleo da ferramenta. Aqui estão localizados os módulos responsáveis por enviar, armazenar, processar e coletar as informações transmitidas.
- **Roteador:** A camada de roteador, é responsável pelos programas instalados no roteador, através do Middrouter, permitindo o acesso ao roteador para comunicação direta com o sistema operacional de cada nodo.

O *framework* Abaré utiliza *scripts* para coletar dados em cada roteador. A configuração dos roteadores está na mudança de endereços IPs, criação de *scripts* que executarão as tarefas que serão processadas em cada roteador e a mudança do *firmware* de cada máquina. A comunicação entre os gerentes e agentes são realizadas através da linguagem, XML que serão executadas pelo Middrouter. O administrador da rede tem uma visualização de toda rede através de um servidor Web que está localizado no Abaré Core API. Apesar do Abaré ser feito para WMNs, ele não foi baseado no padrão IEEE802.11s.

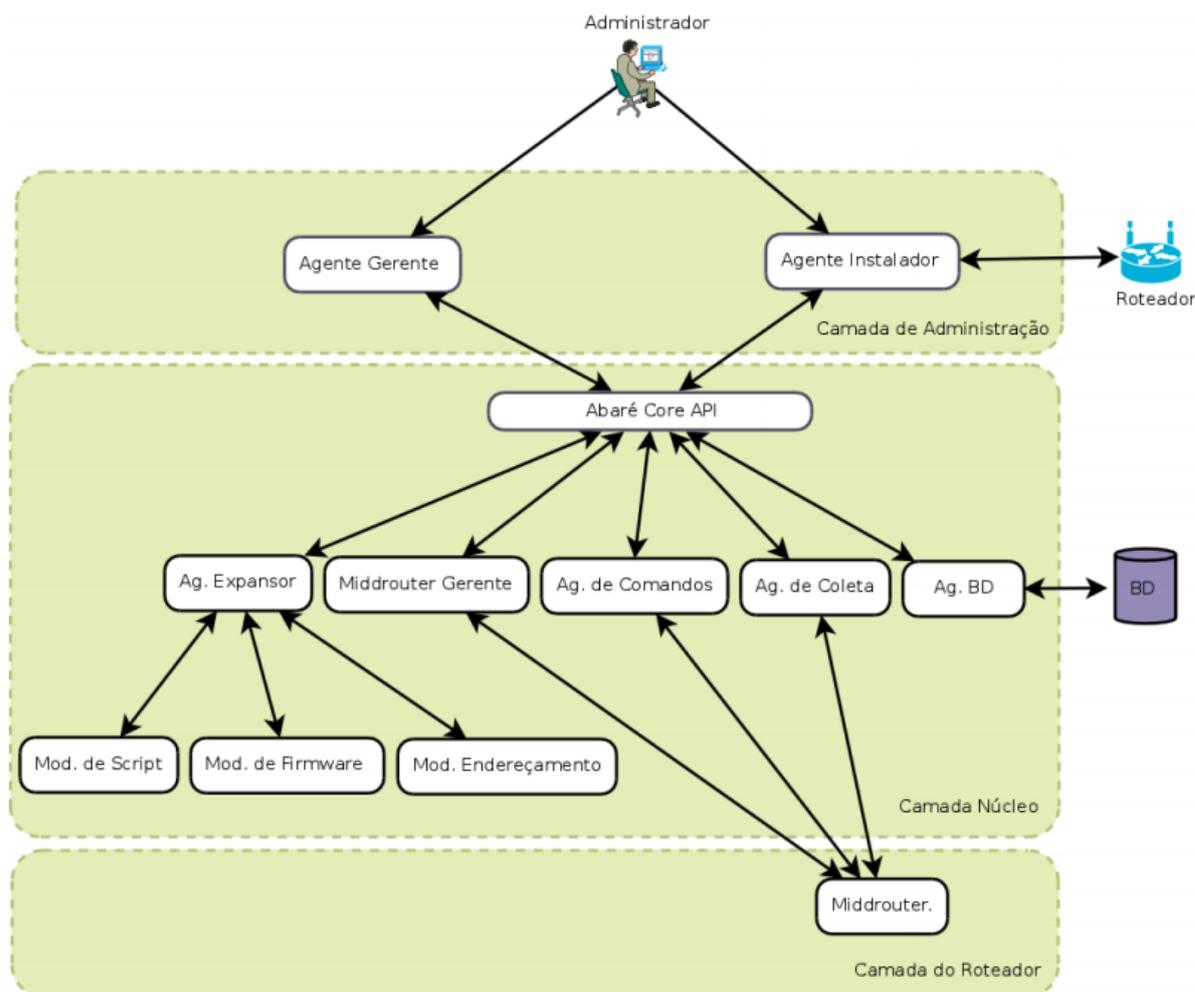


Figura 6: Arquitetura Abaré. Fonte: [Pinheiro et al. 2009]

### 3.1.7 AIGA (Ambiente Integrado de Gerência para Redes em Malha Sem Fio IEEE 802.11s)

Esta proposta desenvolvida por Carvalho [Carvalho 2014] em conjunto com a UFRG (Universidade Federal do Rio Grande do Norte), chamada AIGA, facilita o gerenciamento de WMNs de produção, bem como da utilização de ambientes experimentais para realização de experimentos.

Com o AIGA é possível configurar os parâmetros que atendam às demandas de seus usuários, por exemplo, os canais de frequência, as antenas de energia, os endereços de IPs, MeshID, topologia, entre outros. Esta configuração pode ser feita através de uma CLI ou uma interface remota fornecida pelo fabricante do equipamento. Para verificar se a configuração de rede proposta se comporta conforme o esperado é injetado tráfego na rede e monitorado seu comportamento.

### 3.1.8 meshAdmin

Valle e Muchaluat [do Valle and Muchaluat-Saade 2012] desenvolveram o meshAdmin que é um *framework* criado dentro da UFF (Universidade Federal Fluminense) que compõem um conjunto de ferramentas para gerência de Redes em Malha Sem Fio utilizando o protocolo SNMP para sua implantação, configuração e monitoramento.

O objetivo do *framework* é mostrar em tempo real a topologia da rede Mesh e a qualidade dos links de redes de malha sem fio baseadas em IEEE 802.11 além de coletar informações de estado do nodo. Para alcançar o objetivo a estrutura do meshAdmin possui cinco módulos principais:

- Módulo de coleta de dados: realiza a coleta dos dados no nodos e enlaces entre eles. Em cada nodo Mesh foi adicionado um programa agente (Mini SNMP) que é utilizado para coleta das informações solicitadas pelo gerente da rede.
- Módulos de armazenamento de dados: As informações obtidas pelo módulo de coleta são armazenadas no módulo de armazenamento de dados; Este módulo recebe as informações adicionais pelo administrador da rede através do Painel de Configuração e armazena as mensagens geradas pelo módulo de alerta.
- Painel de configuração da ferramenta: É o painel utilizado pelo administrador para inserir os nodos da rede Mesh e outros parâmetros de configuração. Este painel é dividido em quatro partes: Autenticação, Configuração, Diagnóstico e Monitoramento.
- Módulo de Alerta: tem como objetivo alertar o administrador sobre qualquer problema que esteja acontecendo na rede. Os alertas são divididos em: crítico, aviso e informação.
- Módulo de Exibição: para uma melhor visualização da ferramenta, o meshAdmin oferece uma interface web desenvolvida utilizando Django [Foundation]. A tela inicial da ferramenta é dividida em três partes: visualização da topologia, informações de redes e nodos e mensagens de alerta. O módulo de exibição tem como objetivo gerenciar a rede em tempo real.

Para avaliar os conceitos do meshAdmin, foi testes de desempenho em um ambiente de teste aberto na própria UFF com o intuito de verificar o impacto do *overhead* gerado pelo tráfego de monitoramento injetado pelo módulo de Coleta. Nos teste foram elaborados cinco cenários com 5, 7, 9, 10 e 12 nodos, e foram realizadas 30 medições com intervalos de 20 min cada. Todos os testes realizados obtiveram resultados satisfatórios.

### 3.1.9 IEEE 802.11-based Wireless Mesh Network Testbed

Neste trabalho Song [Song et al. 2007] propôs uma rede em malha sem fio baseada em IEEE 802.11 desenvolvida para avaliar o desempenho de redes Mesh sem fio em

ambiente de teste real. Para construir o ambiente com a rede de malha sem fio baseada em 802.11 e utilizado o protocolo de roteamento proativo OLSR, um computador portátil com base em Intel x86 foi usado para implementar os roteadores de malha e clientes de malha, assim como serviços multimídia, seja voz, vídeo e/ou texto também foram usados para confirmar as funções dos componentes de teste, os roteadores de malha que possuem uma mobilidade mínima e formam o core da rede, e clientes de malha.

Os roteadores de malha possuem várias funções necessárias para ser suportada na rede, como múltiplas interfaces sem fio, pontos de acesso IEEE 802.11, gerenciamento de mobilidade e um protocolo de roteamento. Por esta razão, cada função foi implementada com software de código aberto apropriado e que foi modificada até serem adequadas para o teste proposto.

Para um cliente de malha, um *handoff* de atraso baixo na camada de enlace de dados e gerenciamento de mobilidade são capacidades necessárias para um cliente de malha funcionar como desejado.

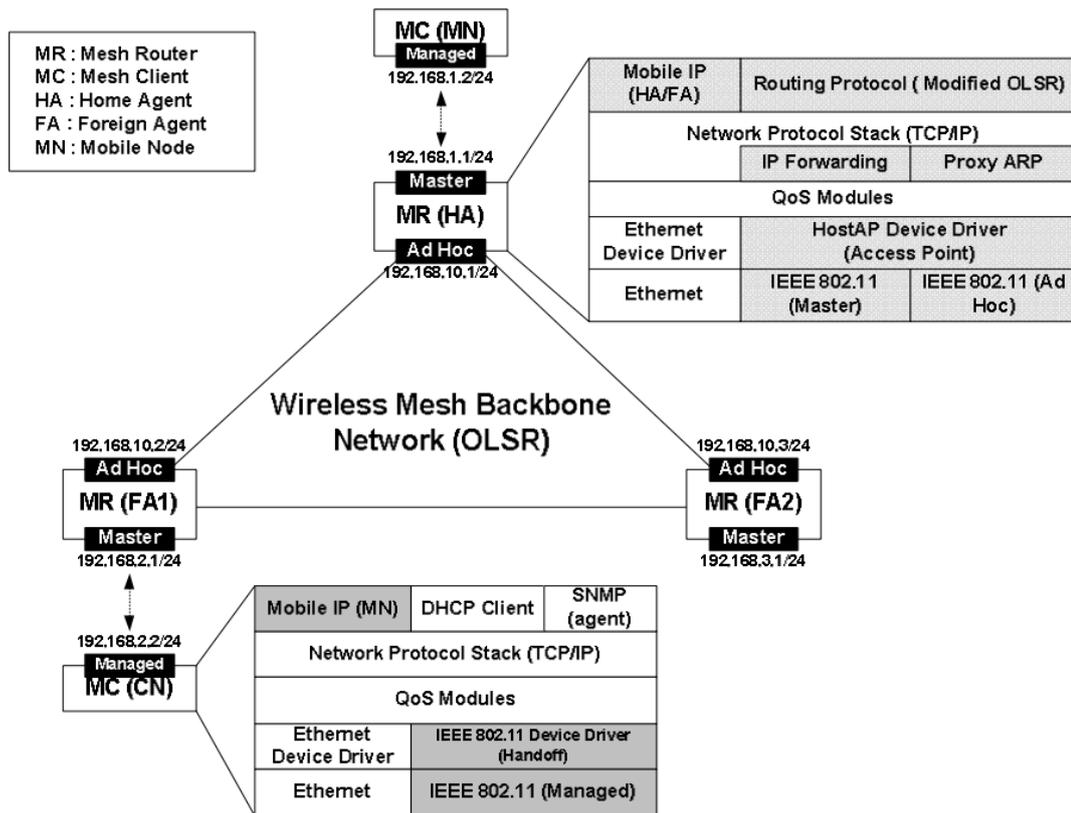


Figura 7: Arquitetura do Ambiente Experimental de Redes em Malha Sem Fio. Fonte: [Song et al. 2007]

Portanto, um método de varredura seletiva em vez de um método de varredura completa foi implementado no *driver* de dispositivo de rede, onde o Mobile IPv4 foi usado para gerenciamento de mobilidade.

## 3.2 Frameworks e Ambientes Experimentais para Internet do Futuro

Nesta parte serão vistos serviços e iniciativas para Internet do Futuro, e propostas para ambientes experimentais, bem como *frameworks* para ambientes experimentais que contêm suporte para redes sem fio e que possibilitam seu uso e implantação em ambientes outdoor.

### 3.2.1 OMF (cOntrol and Management Framework)

O OMF [Rakotoarivelo et al. 2010] é um notável conjunto de ferramentas para experimentação, em sua arquitetura são encontrados três (03) planos lógicos: controle, medição e o gerenciamento.

O plano de controle inclui ferramentas para a descrição do experimento e das entidades responsáveis pela orquestração, permitindo que o usuário indique, no próprio *script* de experimentação quais serão os recursos utilizados no experimento, como serão inicializados e como serão conduzidos.

O plano de medição inclui ferramentas para a instrumentação do experimento e para coletar e armazenar os dados obtidos através da experimentação OML, uma linguagem de descrição de experimento, que permite a orquestração e combinação de múltiplos requisitos de recursos, assim como sua configuração, conforme especificado pelo usuário.

Finalmente, o plano de gerência inclui as funções e entidades para o provisionamento e configuração dos recursos da instalação do experimento, sendo possível que o usuário experimentador indique quais recursos serão alocados e configurados, podendo também reiniciar um recurso, salvar ou carregar imagem em nodos experimentais, entre outros.

Estes planos da arquitetura OMF, indicado na Figura 8, é composta por conjuntos de bibliotecas OMF (OML), módulos de serviços e ferramentas. Alguns dos módulos de interesse da proposta de extensão, serão descritos a seguir:

- Experiment Controller (EC): É o componente que faz a comunicação entre o ambiente experimental e o usuário. O EC recebe um ED e instrui o AM sobre quais recursos alocar ou configurar para o experimento. Também é através do EC que o usuário experimentador solicita a captura dos resultados do experimento.
- Experiment Description (ED): É o *script* escrito em OEDL pelo experimentador. Esse *script* descreve os recursos que serão usados no experimento, os parâmetros de configuração dos recursos e o fluxo de execução do experimento.
- OMF Measurement Library (OML): é uma biblioteca de desenvolvimento, utilizada para instrumentar o programa executado no experimento e deve estar disponível em cada um dos recursos do experimento a ser medido, onde o OML os envia ao AM.

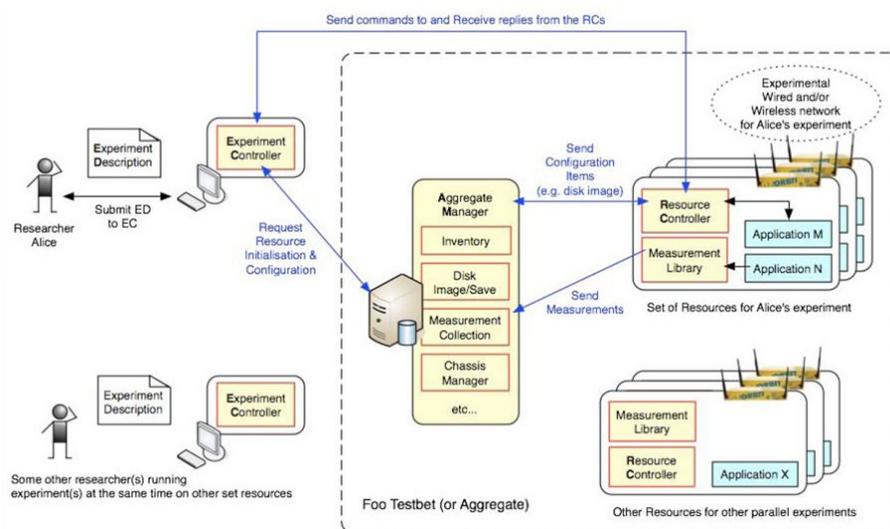


Figura 8: Arquitetura OMF.

Fonte: [https://mytestbed.net/projects/omf/wiki/An\\_Introduction\\_to\\_OMF](https://mytestbed.net/projects/omf/wiki/An_Introduction_to_OMF)

- **Aggregate Manager (AM):** É o gerenciador central dos recursos do testbed que contém um conjunto de componentes, onde é o responsável por gerenciar sem interagir diretamente com o usuário, minuciosamente todos os recursos de um testbed, seja para alocar recurso, inicializar a coleta de dados dos experimentos, armazenar imagens de discos, ligar e desligar um nó experimental, etc. A seguir são descritos os principais componentes da arquitetura do sistema OMF:
- **Measurement Collection Server (MCS):** É um serviço dentro do AM que tem como responsabilidade a coleta e o armazenamento de dados vindos dos diversos experimentos.
- **Chassis Manager (CM):** Este módulo é responsável por parte do controle do recurso, onde é possível, ligar, desligar e saber o status atual do recurso.
- **Inventory:** Tem como objetivo alocar recursos do ambiente experimental.
- **Disk Image/Save Manager:** Este módulo é responsável em armazenar imagens nos discos.
- **Resource Manager (RM):** Este componente é quem realiza a manipulação do firmware (imagem de discos) em cada um dos nós experimentais, sendo capaz de adicionar, retirar, alterar ou gerar uma imagem do estado atual do nó experimental.
- **Resource Controller (RC):** Presente em cada um dos nós experimentais existentes no ambiente, tem a finalidade de executar as ações definidas para os recursos, ou seja, o módulo responde aos comandos descritos no ED.

Ainda em relação à arquitetura do sistema OMF, é importante mencionar que o *framework* permite a execução de múltiplos experimentos concorrentes. Visto que na

versão atual do OMF não é possível realizar o fatiamento dos recursos entre diversos experimentos, faz-se necessário que experimentos concorrentes usem um conjunto disjuncto de recursos. Contudo, com sua estrutura modular é possível a customização dos respectivos recursos de um ambiente experimental. Sendo assim, os comandos para configurar cada um dos recursos do ambiente podem ser diferentes. Essa abordagem permite que o OMF seja estendido para lidar com diferentes tecnologias, sistemas e equipamentos, por exemplo, controladores WiMax, Sensores sem fio, entre outros.

### 3.2.2 NITOS (Network Implementation Testbed using Open Source platforms)

NITOS [NITLab 2016] é um ambiente experimental desenvolvido pelo NITLab (Network Implementation Testbed Laboratory) e implantando inicialmente no campus universitário da Universidade da Tessália (UTH), como ilustrado na Figura 9. O ambiente experimental é projetado para alcançar a reprodução da experimentação, ao mesmo tempo, apoiando a avaliação de protocolos e aplicações em ambientes do mundo real, fazendo uso de plataformas de código aberto.

O ambiente experimental NITOS possui diversos tipos de tecnologias disponíveis que podem ser usadas no teste, como SDN, SRD, LTE, Openflow, etc e entre elas a de redes sem fio 802.11, que por sua vez foi desenvolvido como parte das instalações do projeto OneLab2 e consiste em nodos sem fio baseados em softwares, possuindo *drivers* de código aberto e placas Wi-Fi comerciais. Seu controle e gerenciamento é realizado através do OMF, já mencionado neste capítulo.

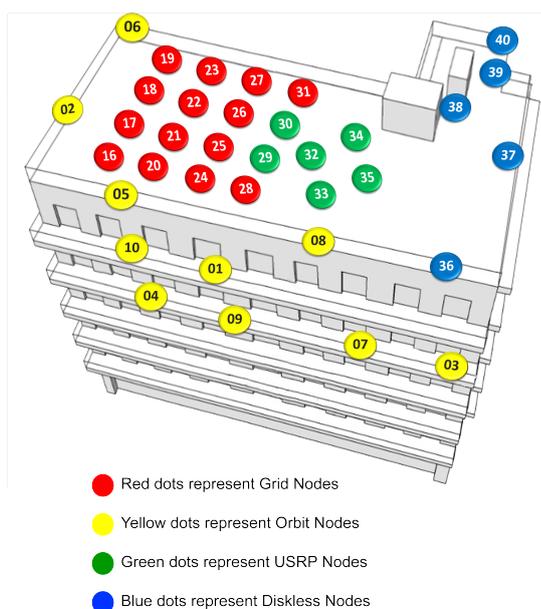


Figura 9: Ambiente Interno - NITOS. Fonte: [NITLab 2016]

Visto que o NITOS apoia a experimentação de pesquisa na área de diversos tipos de redes sem fio, demonstrado na Figura 10, seu ambiente experimental disponibiliza para

a comunidade de pesquisa 24 horas por dias, ambientes *Outdoor*, *Indoor* com Isolamento e *Office* (do inglês, escritório) para atender os diversos tipos de testes fazendo com que centenas de experimentos em todo o mundo já tenham sido testados.

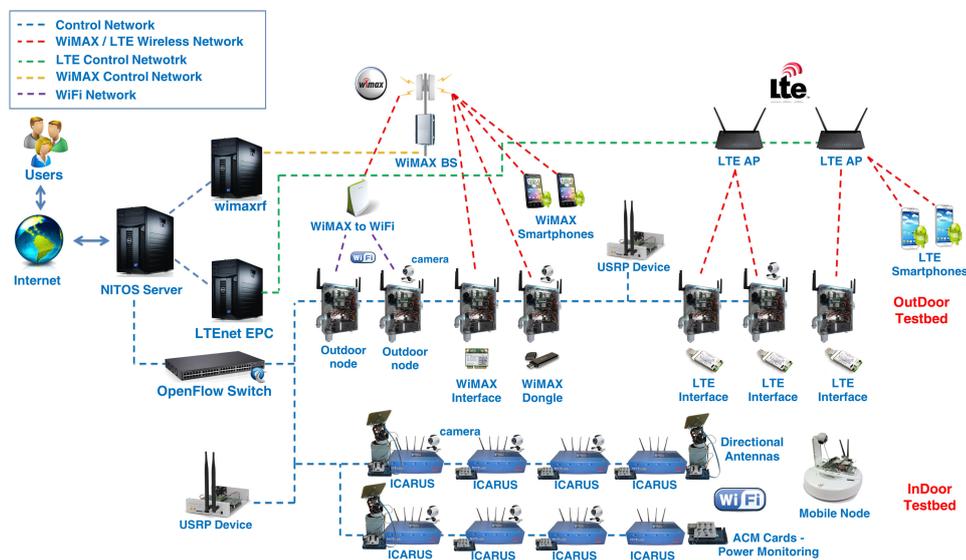


Figura 10: Visão Geral- NITOS. Fonte: [NITLab 2016]

### 3.2.3 GENI (Global Environment for Network Innovation)

Desde 2005 o GENI [GENI 2016] é patrocinado pela National Science Foundation (NSF), vista até então como a principal iniciativa norte americana em investigação e experimentação em Internet do Futuro. O GENI é uma infraestrutura aberta para redes de computadores em larga escala, onde a maior importância é validar novas possibilidades para Internet do Futuro.

O objetivo do GENI é fornecer um grande laboratório em larga escala para experimentações em redes de computadores, onde a maior importância é validar novas possibilidades para Internet do Futuro. Para o GENI, os conceitos principais relacionados a experimentação em Internet do Futuro e que fazem parte do projeto de sua arquitetura são [GENI 2016]:

- Programabilidade: Os pesquisadores poderão carregar software nos nodos do GENI para modificar o seu comportamento.
- Virtualização e outras formas de compartilhamento de recursos: Qualquer que seja a implementação de máquina virtual sobre um nodo GENI, será permitido que múltiplos pesquisadores simultaneamente compartilhem a mesma infraestrutura. Cada experimento terá a sua disposição uma fatia isolada, com recursos fim-a-fim alocados dentro do infraestrutura do GENI.
- Federação: O GENI será composto por infraestruturas próprias e por outras de apoio, operadas por organizações parceiras ao projeto, criando o conceito de uma

federação de recursos e nodos, que, na visão de um pesquisador, comportar-se-a como se fosse uma única infraestrutura.

- Experimentos baseados em fatias: Cada experimento no GENI será realizada sobre uma plataforma composta de um conjunto de recursos reservados em diversas localizações, chamada de uma fatia de recursos. Dentro dessa fatia o pesquisador poderá remotamente descobrir, reservar, configurar, “depurar”, operar e gerenciar seus experimentos e recursos disponíveis.

Apesar de ser uma grande iniciativa de experimentação em Internet do Futuro atualmente o GENI não tem em sua infraestrutura fundamental suporte a redes sem fio, permitindo apenas execuções de experimentos em Mobile Edge Computing (MEC), onde em sua arquitetura de rede que permite capacidades de computação em nuvem e um ambiente de serviços de TI na borda da rede celular, incluindo vinte estações base 4G LTE, pequenos recursos do centro de dados (*racks* GENI) e dispositivos personalizáveis de usuário final.

### 3.2.3.1 PlanetLab

O PlanetLab é uma rede global para testes e desenvolvimento de aplicações distribuídas, criado a partir de 2002 por um consórcio de instituições acadêmicas, governamentais e industriais, que montou uma grande malha de computadores espalhados pelo mundo em diversas redes [Peterson et al. 2006]. Hoje, possui 1353 máquinas espalhadas em mais de 717 locais diferentes, em todos os continentes (<http://www.planet-lab.org/>), no Brasil há participação do consórcio desde 2004.

O projeto é dirigido a partir da Universidade de Princeton, EUA, mas há segmentos, por exemplo, na Europa, onde há outros centros de desenvolvimento e controle dos recursos comuns. O PlanetLab foi pioneiro no uso amplo dos conceitos de virtualização dos nodos e de criação de fatias de recursos virtuais e dedicados nos nodos usados em um experimento, onde cada projeto de pesquisa tem uma "fatia", ou o acesso da máquina virtual a um subconjunto dos nós.

No projeto GENI, o PlanetLab GENI [Spiral ], a base de dados de usuário do PlanetLab que é limitada à pessoas afiliadas a corporações e universidades que hospedam nodos PlanetLab é federada junto ao GENI. O grupo de Princeton dirige esta atividade e tem como escopo integrar logicamente os componentes GENI aos serviços PlanetLab como: PLC (PlanetLab Central Software), responsável por criar a rede sobreposta definindo a topologia virtual que será usada para experimento; e o SFA (Slice-Based Facility Architecture), responsável por localizar e alocar os recursos para os experimentos [Peterson et al. 2009].

O PlanetLab não tem como foco a experimentação em redes sem fio, fazendo uso de nodos virtuais (máquinas virtuais) para testes de tecnologias de armazenamento distribuído, mapeamento de rede, sistemas *peer-to-peer*, tabelas de *hash* distribuídas, processamento de consultas, entre outros.

No entanto, uma série de serviços públicos gratuitos foram implantados no PlanetLab, incluindo serviços de ambientes, como o Stork e AppManager; serviços de monitoramento e descoberta, como o MOM, CoMon, PlanetFlow, SWORD; além de serviços como CoDeeN, a Coral Content Distribution Network, entre outros.

### 3.2.3.2 ORBIT

O ORBIT apresentado por Raychaudhuri [Raychaudhuri et al. 2005] provê uma rede sem fio flexível aberta à comunidade acadêmica para experimentação. Ele foi desenvolvido para que pesquisadores entendessem as limitações do mundo real das redes sem fio, que muitas vezes não são percebidas em simulações por causa das simplificações aplicadas ao modelo ou por terem sido aplicadas em uma quantidade pequenas de nodos.

Atualmente, no ORBIT existem cerca de 1000 usuários registrados, tendo em sua infraestrutura dois ambientes de teste no campus da Universidade Rutgers, o primeiro é dentro de um laboratório, constituído por cerca de 400 nodos dispostos em uma grade 20x20 ilustrado na Figura 11, separados por um metro de distância entre os nodos adjacentes, onde cada nodo é composto por uma plataforma PC com múltiplas interfaces sem fio e com fio. O segundo está localizado ao ar livre (*outdoor*), numa área de 1,5 hectares. Entre eles existem nodos fixos, e também nodos móveis para prover mobilidade entre os roteadores, que incluem WiFi, WiMAX, OpenFlow, entre outros (<http://www.orbit-lab.org>).



Figura 11: Ambiente Experimental Sem Fio ORBIT.

Fonte: <http://www.winlab.rutgers.edu/projects/Orbit.html>

O banco de teste ORBIT também está sendo usado para suportar aspectos sem fio do GENI, e o OMF (cOntrol and Management Framework) com OML (ORBIT Measurement Framework and Library) está sendo usado como um dos *frameworks* de controle do núcleo no GENI. O OMF é um notável conjunto ferramentas para o controle, medição e gerência de experimentos. Exemplos de experimentos específicos sendo suportados incluem coordenação de espectro multi-rádio, redes de rádio cognitivas, encaminhamento de rede Ad Hoc, roteamento com reconhecimento de armazenamento, redes de tolerância a atraso, entrega de conteúdo móvel, protocolos de reconhecimento de localização e

segurança sem fio.

### 3.2.3.3 EmuLab

EmuLab desenvolvido por Eide [Eide et al. 2006] é um ambiente de teste em redes de computadores, que oferece aos seus pesquisadores um leque de ambientes nos quais eles podem desenvolver, analisar e avaliar seus sistemas. Gerenciado pela Universidade de Utah onde foram desenvolvidos os primeiros nodos do EmuLab, seu nome refere-se tanto ao ambiente de teste quanto ao software de interação do usuário com ele. Atualmente, há mais de doze países utilizando o EmuLab, totalizando uma rede para experimentação com mais de cem nodos. No Brasil há um nodo desta rede instalado na USP (<http://www.emulab.net/>).

A Figura 12 apresenta os clusters de computadores utilizados pelo EmuLab. Os ambientes disponíveis no EmuLab são: Emulação (Emulation), neste ambiente, o pesquisador define uma topologia arbitrária com *switches* ou roteadores e nodos computacionais; *Live-Internet*, onde o Emulab oferece um ambiente federado para experimentos sobre Internet; No 802.11 sem fio, provê um ambiente com ponto de acesso, roteadores e cliente para experimentos em rede sem fio; e o ambiente *Software-Defined Radio* o qual permite experimentações em camada 1 para análise de processamento de sinal.

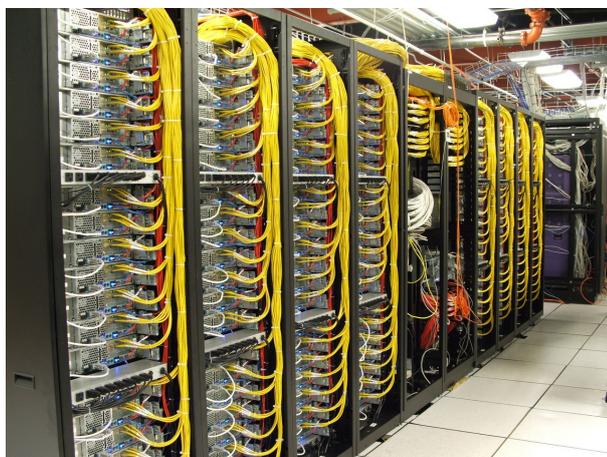


Figura 12: Cluster EmuLab.  
Fonte: <https://www.emulab.net/>

O EmuLab possui uma integração com o GENI, um *software* de monitoramento e controle baseado no SFA para federação entre os ambientes, chamada ProtoGENI [ProtoGENI ], permitindo expandir ainda mais seu ambiente experimental, além de controlar, por exemplo, a infraestrutura de altíssima velocidade da rede Internet2, entre outros.



### 3.3 FIRE (Future Internet Research and Experimentation)

A iniciativa FIRE (Future Internet Research and Experimentation) na Europa, vem crescendo desde sua criação em 2010 e visa a pesquisa experimental e ao financiamento de projetos que produzam infraestruturas para experimentação em Internet do Futuro. A meta é que as pesquisas em tecnologias para Internet do Futuro sejam direcionadas a rede ou a serviço e tenham a possibilidade de comparar as soluções correntes com as propostas futuras. "Neste contexto, afirma-se que o FIRE possui duas dimensões relacionadas que direcionam suas pesquisas e seus investimentos"[Commission 2008]:

- Pesquisa Experimental: O objetivo é integrar a pesquisa visionária multidisciplinar e a experimentação em larga escala. A partir daí definir uma metodologia que direciona a pesquisa experimental na infraestrutura FIRE, baseada em um ciclo interativo que vai da pesquisa, passando pelo projeto e chegando a experimentação.
- Facilidades para Testes: O objetivo é oferecer múltiplos ambientes de teste, suportando várias tecnologias, interligados e federados entre si, para permitir a realização de experimentos envolvendo dois ou mais dos ambientes distintos. Deste modo entende-se que FIRE seja sustentável, renovável, dinâmico e integrado em larga escala. Deverá ainda facilitar a pesquisa experimental na comunidade acadêmica, nos centros de pesquisa e na indústria.

Para o FIRE, as experiências práticas são essenciais para dar credibilidade e levantar o nível de confiança na conclusão da pesquisa. Além disso, a experimentação deve ser executada em larga escala para que seja representativa, convincente e, para provar a escalabilidade da solução, testada.

A sustentabilidade para instalações experimentais de FIRE é essencial para garantir a disponibilidade por tempo suficiente permitindo que pesquisadores planejem e conduzam seus experimentos. Federação da infraestrutura é um caminho para se obter sustentabilidade, porém não o suficiente, pois é necessário encorajar os pesquisadores para a utilização de sua infraestrutura, além de ligar o FIRE às demais iniciativas internacionais. Os projetos de ambiente de teste em destaque aqui, financiados pela iniciativa FIRE incluem [Gavras et al. 2007]: BonFIRE, Fed4FIRE, OFELIA, CREW, que será apresentada a seguir, e entre outros.

#### 3.3.1 CREW (Cognitive Radio Experimentation World)

O principal objetivo do (CREW) [Commission 2010] é estabelecer uma plataforma de teste aberta e federada que facilite o avanço em pesquisa em sensoriamento de espectros, rádios cognitivos e estratégias de redes cognitivas em visões horizontais e verticais do espectro compartilhado em bandas licenciadas e não licenciadas. A Figura 14 ilustra a topologia e as tecnologias utilizadas no ambiente experimentais.

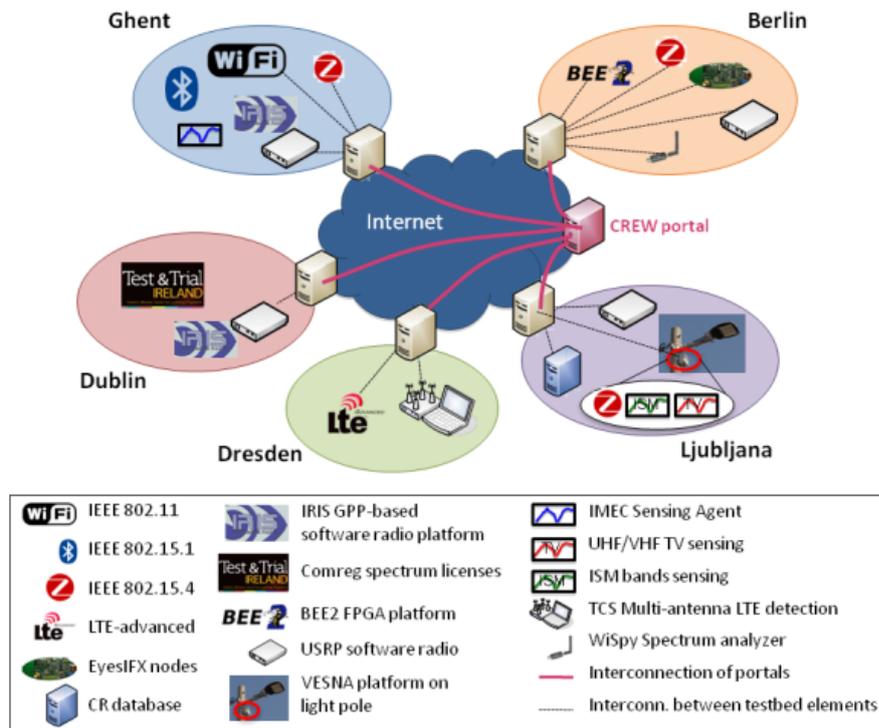


Figura 14: Ambiente Experimental CREW federado. Fonte: [Commission 2010]

A federação do CREW incorpora cinco ambientes individuais de experimentação de rede sem fio utilizando um leque de tecnologias sem fio como: heterogêneos ISM, Celular e Sensores sem fio, com o estado da arte de plataforma de sensoriamento cognitivo, incorporando analisadores de espectro e softwares de rádio.

Os ambientes de experimentação do CREW são federados fisicamente e virtualmente através de componentes interligando entidades de software e hardware de diferentes padrões usando APIs padronizadas, e tornando possível a realização funcionalidades avançadas de detecção cognitiva nos ambientes. Além disso, o CREW estabelece um “*benchmark framework*” (arcabouço de controle padrão), que habilita experimentos controlados, metodologias para análise automática de performance e reproduz a condições para testes, permitindo assim, a detecção de alta sensibilidade e identificação de interferências.

### 3.4 WISHFUL (Wireless Software and Hardware platforms for Flexible and Unified radio and network control)

Fundado pela European Commission’s Horizon 2020 Programme, o WISHFUL [Programme 2015] é uma plataforma de software aberta inteligente usada para controle de rádio e desenvolvimento de protocolo de rede de forma unificada. Onde sua característica inclui várias Interfaces de Programação Unificada UPI (*Unificated Programmed*

Unificaded), visto na Figura 15, que suportam o Controle de Rádio, Controle de Rede, Controle Inteligente e Instalação Portátil.

A arquitetura da plataforma demonstra uma separação clara entre as funções de controle e a lógica de protocolo, também mostra do plano de gerenciamento de dados/controla quebrando a implementação monolítica das redes sem fio convencionais.

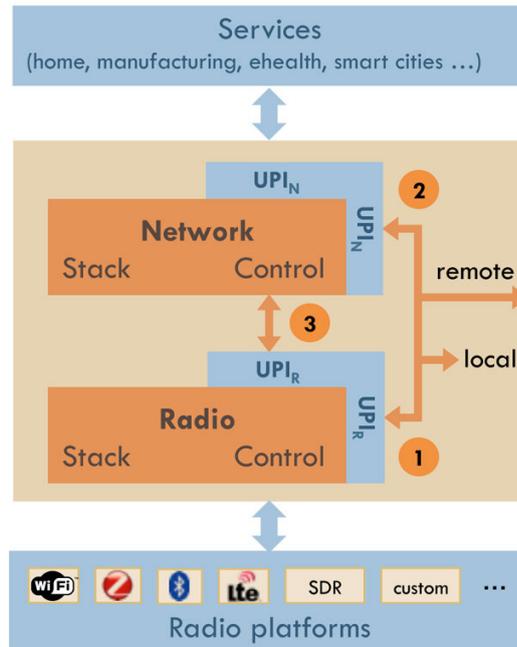


Figura 15: Diagrama conceitual da arquitetura WISHFUL com interface de programação unificada. Fonte: [Programme 2015]

Com respeito às instalações de hardware e infraestrutura, o WISHFUL, devido a sua portabilidade de instalação, visa a utilização de ambientes experimentais já existentes como Fed4FIRE, wiLab.t, IRIS, TWIST, ORBIT e FIBRE, onde já possuem uma vasta gama de dispositivos e sistemas de Infraestruturas.

Através da infraestrutura, Figura 16, é possível identificar que o WISHFUL propõe em seu ambiente de rede sem fio, a adição de um nodo de controle separado do nodo experimental sem fio, com a funcionalidade de controle de energia através da rede sem fio. Apesar de possibilitar a resiliência no plano de controle sem fio, o nodo de controle atua como *backbone* e não tem relação de “um para um” com o nodo experimental, o que ainda mostra a necessidade de uma topologia infraestruturada. Sendo que o usuário experimentador no momento da alocação do nodo experimental, tem a visibilidade do nodo de controle a fim de saber a disponibilidade do mesmo.

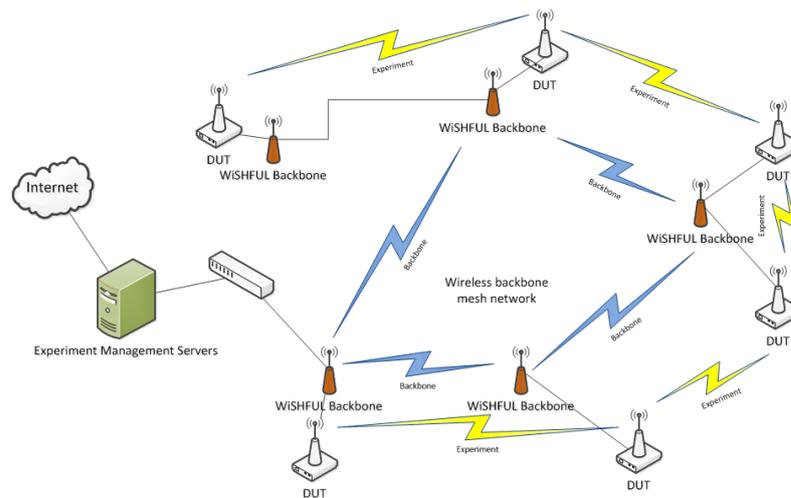


Figura 16: Infraestrutura do ambiente experimental portátil (Fed4FIRE). Fonte: [Programme 2015]

### 3.5 Challenges in Deploying Steerable Wireless Testbeds

O artigo desenvolvido por Erick Anderson [Anderson et al. 2010] juntamente com a Universidade do Colorado apresenta uma plataforma chamada Wide-Area Radio Testbed (WART) para estudos de antenas em redes sem fio, como direcionais, adaptativas, inteligentes e entre outros, permitindo o uso de *beamforming* e *null-steering* em tempo real para aumentar ainda mais o controle da intensidade e interferência do sinal. Onde seu potencial para redes sem fio está se tornando mais importante à medida que as antenas inteligentes começam a aparecer em padrões de redes emergentes.

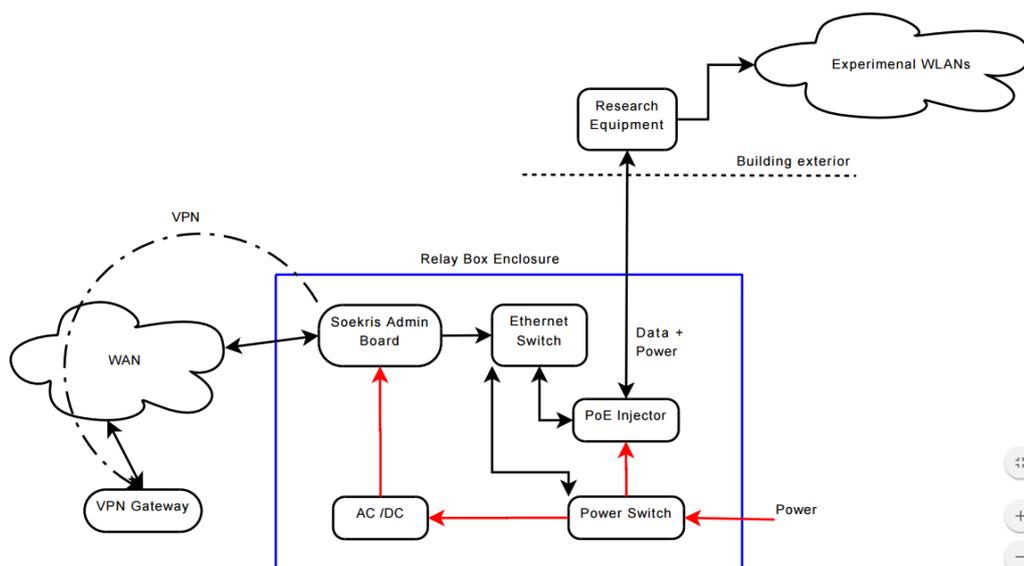


Figura 17: Visão Geral. Fonte: [Anderson et al. 2010]

A validação da proposta apresenta uma infraestrutura física e uma "caixa de

gerenciamento" com funcionalidades de controle para cada nodo experimental, além de possibilitar sua utilização em qualquer lugar com internet em modo *outdoor* através de um VPN, Figura 17, facilitando assim, a gerencia e administração do ambiente experimental. Tendo a finalidade de estudar tecnologias de camada física específicas, já citadas como o uso de *beamforming* e *null-steering*.

## 3.6 Conclusões do capítulo

Diante do que foi apresentado neste capítulo, a Tabela 1 mostra as propostas e *frameworks* de controle para redes sem fio listando algumas características de suas arquiteturas que são desejáveis para a proposta deste trabalho. É notório que *frameworks* e as propostas para rede sem fio possuem muitos desafios, pois, apesar de alguns *frameworks* apresentarem características de monitoramento e gerenciamento, suas características ainda são limitadas, poucos apresentaram caráter de extensibilidade, implantação, autonomia e suporte a controle de experimentação. Pois em suas características apresentam apenas uma função, ou seja, um tipo de gerenciamento, ou um tipo de monitoramento. Entre essas características estão: configuração de nodos, gerar tráfego na rede e monitorar, teste de desempenho de protocolo de descoberta de caminho, entre outros.

Tabela 1: Frameworks de Controle para Redes Sem Fio: Características da Arquitetura

Trabalhos	Implant.	Monitoram.	Gerenciam.	Autonomia	Extens.	Distrib.	Experim.
SCUBA	Não	Sim	Não	Não	Não	Não	Não
JANUS	Não	Sim	Não	Não	Não	Sim	Não
Mesh-Mon	Não	Sim	Sim	Parcial	Não	Sim	Não
MAYA	Não	Não	Sim	Não	Não	Não	Não
MobiMESH	Não	Sim	Sim	Não	Não	Sim	Não
Abaré	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Não
AIGA	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
MeshAdmin	Sim	Sim	Não	Indef.	Sim	Indef.	Não
802.11-based WMN	Indef.	Sim	Sim	Parcial	Sim	Sim	Não
Proposta	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim

Uma comparação das características dos *frameworks* para ambientes de redes sem fio, Tabela 2, é apresentada para o bom entendimento da proposta desta dissertação. Dentre os apresentados, apenas CREW, OMF, Challenges e AIGA foram projetados exclusivamente para redes sem fio e experimental. Mesmo que alguns estejam se adequando a uma nova exigência da comunidade científica, nem todos possibilitam trabalhar com o paradigma SDN e nem fazem o diferencimento de controle através dos tipos de usuários, como administrador e experimentador.

Assim como os *frameworks*, os ambientes experimentais vistos neste capítulo também possuem muitos desafios, visto na Tabela 3, onde a topologia dos ambientes experimentais no contexto sem fio e outdoor, ainda é muito limitada em função da necessidade de infraestrutura cabeada para o controle dos nodos, além de possuir muitos desafios téc-

Tabela 2: Framework para Ambientes de Redes Sem Fio: Comparação de Características

Trabalhos	Separação de Planos	Ambiente de Prod.	Ambiente de Exp.	Tipos de Usuários
meshAdmin	Não	Sim	Não	Não
SCUBA	Não	Sim	Não	Não
JANUS	Não	Sim	Não	Não
Mesh-Mon	Não	Sim	Não	Não
MAYA	Não	Sim	Não	Não
MobiMESH	Não	Sim	Não	Não
Abaré	Não	Sim	Não	Não
CREW	Não	Não	Sim	Não
OMF	Parcial	Não	Sim	Não
Challenges	Não	Não	Sim	Não
AIGA	Não	Sim	Sim	Não
Proposta	Parcial	Não	Sim	Sim

nicos de *hardware* e *software*, como ligações físicas e lógicas, custo de implantação, entre outros, além da resiliência no plano de controle.

Tabela 3: Ambientes Experimentais de Rede Sem Fio: Comparação da Arquitetura de Rede

Trabalhos	Rede Exp.	Custo Financ.	Separação de Pl.	Controle S. Fio	Out/Indoor	Resiliência	Nodos 1 pra 1
802.11-based WMN	Não	Baixo	Não	N/A	Indoor	N/A	Sim
WISHFUL	Sim	Razoável	Sim	Sim	Indoor	Sim	Não
NITOS	Sim	Razoável	Parcial	Não	Indoor	Não	Não
ORBIT	Sim	Razoável	Parcial	Não	Indoor	Não	Não
FIBRE	Sim	Razoável	Parcial	Não	Indoor	Não	Não
Proposta	Sim	Baixo	Sim	Sim	Ind/Out	Sim	Sim

Após a análise dos trabalhos relacionados, podemos observar que o controle, monitoramento e gerenciamento de um ambiente experimental de redes sem fio, utilizando múltiplos saltos, não é uma tarefa tão simples pelo fato de que tanto a rede, quanto o ambiente possuem requisitos específicos necessários. Para atender a esses requisitos, visto que existe uma demanda crescente por esse tipo de ambiente experimental, é necessária uma arquitetura de um *framework* de controle para ambiente experimental de redes sem fio outdoor, além da adição de nodos sem fio no plano de controle para permitir a independência de infraestrutura cabeada, os quais são propostos nesta dissertação e será apresentada no próximo capítulo deste trabalho.

---

---

## CAPÍTULO 4

---

# Extensão do Plano de Controle Sem Fio para Ambientes Experimentais Outdoor

Conforme vem sendo apresentado ao longo deste trabalho, não existe uma quantidade significativa de *frameworks* de controle para ambientes experimentais no qual o plano de controle opera com rede sem fio e quando se trata de operar em modo *outdoor* e *out-of-band*, como vimos no Capítulo 3 a carência é ainda maior. A comparação das características deixou claro que existem pontos a serem explorados neste campo de pesquisa.

Com base nessas informações, neste capítulo se apresenta a proposta deste trabalho que, é uma Extensão do Plano de Controle Sem Fio para Ambientes Experimentais Outdoor. Apresentando inicialmente os principais requisitos necessários para implementação da proposta, seguido da demonstração do ambiente experimental sem fio implementado, abordando suas principais características, além de explicar a arquitetura do ambiente e suas funcionalidades. Na seção 4.5 é concluído o capítulo.

### 4.1 Considerações Iniciais

A proposta da extensão do plano de controle surgiu ao utilizar o ambiente experimental sem fio do FIBRE e visualizar que o plano de controle operava com uma infraestrutura totalmente cabeada e sem resiliência. Além de não possuir uma API (*Application Programming Interface*) de controle dos planos de dados e controle para o usuário administrador e o experimentador.

Neste momento vimos a oportunidade de utilizar como base fundamental para o desenvolvimento deste trabalho o *framework* OREx, que como visto no Capítulo 2 define

um conjunto de módulos e componentes que compõem a arquitetura de um *framework* para ambiente experimental sem fio outdoor com o objetivo de auxiliar a implantação, controle, monitoramento e o gerenciamento de ambientes experimentais de redes sem fio, além de oferecer uma estrutura modular que permite ser extensível e ter características autonômicas.

Além dos requisitos e características herdadas pelo *framework* OREx citado anteriormente e que apoia este trabalho, o módulo de controle implementado (<https://gitlab.com/alexander.nunez/middleware.git>) é uma proposta totalmente independente que possui seus próprios requisitos em particulares e que apresenta uma nova arquitetura com base em outros conceitos de desenvolvimento de software assim como a adição de novos componentes, funcionalidades e características.

## 4.2 Requisitos de Controle para Ambientes Experimentais

Para a criação da extensão é indispensável o levantamento de requisitos, que são condições para se alcançar um determinado fim. Para se atingir o objetivo da proposta com suas características, nesta seção se abordada o que é necessário para se obter o controle do ambiente experimental como um todo, bem como requisitos de infraestrutura, usuários, operação, instrumentação e medição da extensão do plano de controle, assim como os requisitos para divisão dos planos, funcionamento e para utilização sem fio.

Os requisitos abaixo são relacionados ao controle, para que se alcance o mínimo de um gerenciamento e monitoramento de um ambiente experimental sem fio. São requisito de controle:

- Requisitos de Infraestrutura: Os requisitos de infraestrutura ajudam a definir os componentes e a criação do ambiente, tal como suas características.
  - Expansibilidade;
  - Serviços para Recursos Computacionais;
  - Componentes Programáveis;
  - Componentes Sem Fio Programáveis;
  - Dispositivos Móveis;
  - Sub-redes em malha sem fio baseado em 802.11;
  - Suporte à instalação e utilização OpenFlow; (tplink(openwrt) + icarus(linux))
- Requisito ambiente experimental: Os requisitos de controle do ambiente experimental são indispensáveis para a implementação do plano de controle sem fio em ambiente experimental outdoor, assim como para agregar novas características e manter as já existentes nos ambientes experimentais sem fio, como mostrado por Silvestre [Silvestre et al. 2012].

- Plano de Dados Sem Fio Apesar do foco desta dissertação ser no plano de controle, é viável arrolar alguns requisitos básicos necessário para um bom funcionamento na utilização do plano de dados, estão listados abaixo os que são encontrados com a utilização do OMF.
  - Componente de coleta de experimento;
  - Componente de monitoramento de experimento;
  - Componente de gerencia de experimento;
- Plano de Controle Sem Fio
  - Manter o funcionamento existente do Ambiente Experimental FIBRE;
  - Possibilitar o uso em ambiente *outdoor*;
  - Possibilitar o uso do plano de controle *out-of-band*;
  - Domínio completo do *hardware* e *software* utilizado, não devendo depender de equipes externas para realização de alterações de *software*.
- Requisitos de Usuários: O usuário do ambiente experimental é a principal fonte de requisitos para o sistema inteiro, então, este sistema deve permitir que banco de dados de usuários cadastrados em outros ambientes experimentais ou mesma base de dados consolidadas de potenciais usuários tenham acesso ao *framework* OREx. Dentro dos requisitos de usuários também devemos englobar aos seguintes tópicos, citados a seguir:
  - Tipos Usuários;
  - Credenciais de Acesso; (Autenticação e Autorização)
  - Serviço de Suporte;
- Requisitos de Operação: Descrição de como é feita a manutenção e suporte aos equipamentos de *hardware* e *software*.
  - Estrutura de Suporte;
  - Sistema de Chamado; (Ticket)
  - Monitoramento da Infraestrutura;
  - Registro do Trafego;
- Requisitos de Instrumentação e Medição: É um subsistema que proporciona a coleta de dados, análise e capacidade de armazenamento para os operadores da rede, pesquisadores e administradores do ambiente experimental.
  - Medições do Substrato da Rede;
  - Medições de Link;
  - Armazenamento e Transmissão de Medições de Dados;
  - Localização de Componentes; (utilização do *phpmyadmin*)
  - Serviço de Tempo (Sincronização), mesmo que o ideal seja a precisão da ordem de microssegundo, a ordem de milissegundos é tolerada; (utilização do *ntp*)

- Requisitos de Arquitetura: Os requisitos de arquitetura servem para mostrar as principais funcionalidades que devem ser atendidas pelo *framework* OREx, facilitando a modelagem e o desenvolvimento dos componentes, a seguir os principais tópicos desta categoria:
  - Possibilitar a extensibilidade na arquitetura; (utilização de outros comandos)
  - Fornecer desempenho e operacionais medidas, incluindo o uso de CPU, ICMP, entre outros;
  - Interface de gráfica de acesso ao controle única; (utilização do Bootstrap (MVC) )
  - Deve conter um mecanismo para proteger os seus dados medidos, tal como definidos pela política de acesso; (utilização de tela login)
  - Permitir que os dados medidos possam ser coletados e armazenados; (utilização do OMF)
  - Interfaces Abertas
  - Tecnologias Heterógeneas e Extensibilidade;
  - Ferramenta para gerencia de múltiplos experimentos;
  - Medição e Monitoramento de Rede;
  - Gerencia de Recursos Integrados;
  - Tecnologia de Rede Sem Fio;
  - Conectividade Transparente;

Como visto anteriormente existe uma grande quantidade de requisitos que precisam ser analisados, discutidos e testados. Durante o desenvolvimento da proposta esses tópicos foram levantados e estão presentes nos componentes da arquitetura do *framework* OREx e no módulo de controle, assim como no ambiente criado para validação.

### 4.3 **Arquitetura dos Planos Lógicos do Ambientes Experimentais Outdoor**

A extensão aqui proposta pode ser dividida em dois aspectos: prover um plano de controle sem fio para ambiente experimental utilizando o OMF e estender suas funcionalidades de controle e gerência, através de um componente sem fio controlável. Onde será demonstrado a implantação de um ambiente outdoor utilizando o ambiente experimental FIBRE/OMF [UFPA ] estendendo a infraestrutura presente no plano de controle do ambiente experimental OMF.

A arquitetura de cada plano lógico do ambiente experimental possui um conjunto de módulos para atender os requisitos da proposta, em especial os módulos agregados ao nodo do plano de controle e gerência. Visto que dentre os planos existentes, este é

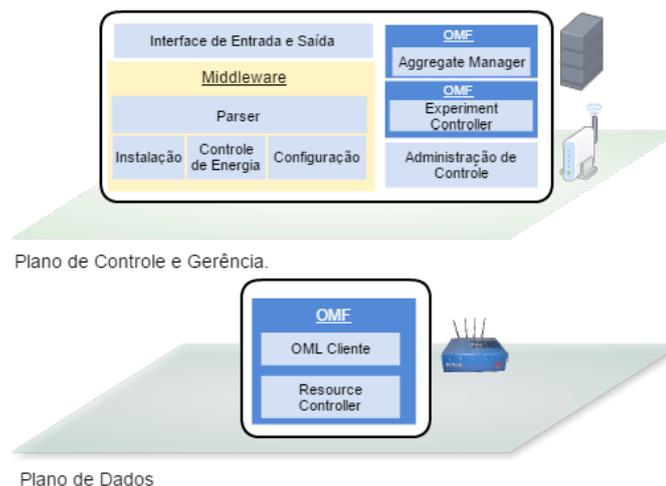


Figura 18: Arquitetura dos Planos Lógicos do Ambientes Experimentais Outdoor. Fonte: Autor

o plano abordado no tema desta dissertação, não realizando alterações significativas ao plano de dados. Esses módulos do plano de controle e gerência, vistos na Figura 18 são apresentados a seguir:

#### 4.3.1 Plano de Controle e Gerência

O plano de controle e gerência possui em sua arquitetura um módulo que permite o acesso do usuário para realizar funções de controle, um *middleware* que contém os componentes para manipular o plano de controle e o plano de dados. Além de possuir um módulo que viabiliza o tráfego de informações do plano de controle entre o plano de gerência e o plano de dados, chamado Interface de Entrada e Saída.

- **Administração de Controle:** Este é responsável por permitir o acesso do usuário para realizar funções de controle e gerência, através de uma interface web, dando a possibilidade de realizar o controle do ambiente experimental em modo *out-of-band*.
- **Interface de Entrada e Saída:** Responsável por fazer a comunicação entre os nodos do plano de controle e pela comunicação com os demais planos. Para tornar isto possível este módulo possui dois tipos de interface:
  - **Interface Cabeada:** Que faz a comunicação lógica e física direta entre o nodo de controle e o nodo experimental. Ela é necessária pois não é possível realizar certas ações pela Interface Wireless, como a execução de comandos de instalação e controle de energia, sem perder seu provisionamento. Esta comunicação cabeada pode ser serial, USB, Ethernet, entre outros.
  - **Interface Wireless:** Usada para a comunicação do plano de controle com o plano de gerência. O mesmo tem como característica operar em redes de longo alcance, como WiMAX, Mesh, LTE, entre outros. Facilitando o uso do ambiente experimental em topologia outdoor.

- **Middleware:** Este é o elemento que troca informações com o módulo Interface de Entrada e Saída, gerando e enviando comandos no formato *shell*. O Middleware é quem aceita os comandos do plano de gerência para então agir como um proxy de forma inteligente e independente do nodo experimental. Este é dividido em quatro componentes, que representam suas principais funcionalidades como Parse, Configurações, Controle de Energia, Instalação e Base de Dados. Estas funcionalidades são descritas a seguir:
  - **Parse (comandos):** Responsável por gerar script a cada informação recebida, identificar o tipo de comando que está sendo requisitado, caso a requisição seja um comando de instalar, esta é encaminhada para o componente Instalação, caso seja um comando de controle, ele é enviado ao Controle de Energia e caso seja de gerenciamento ou monitoramento do plano de controle, este é encaminhado ao componente Configurações. Além disso consegue identificar a compatibilidade da requisição do usuário com o tipo de nodo experimental utilizado.
  - **Configurações:** Este componente possui um conjunto de ferramentas e métodos, capazes de monitorar, configurar e gerenciar o nodo de controle, intermediando a interação do mesmo com o usuário através do módulo Administração de Controle.
  - **Controle de Energia:** É capaz de requisitar o status, ligar e desligar os nodos experimentais. Essas requisições são realizadas através da comunicação direta com hardware específico do nodo experimental, variando entre USB, comunicação serial, Ethernet, etc.
  - **Instalação:** Responsável por aceitar o comando de instalação, realizar o download e armazenamento do firmware, e instalar o firmware no nodo experimental.
- **Base de Dados:** Este elemento compõe a Instalação, onde permite o armazenamento de firmware, seja em cache ou até mesmo banco de dados.

### 4.3.2 Plano de Dados

O plano de dados possui em sua arquitetura módulos para realizar, manipular e coletar dados referentes a experimentação. Visto que o foco desta dissertação é o plano de controle, não foi implementado módulos no plano de dados e sim utilizado módulos já existentes na arquitetura OMF, como o OML Client e Resource Controller. Sendo assim a arquitetura do plano de controle e gerência pode se dizer que possui integração com outros aplicativos e *frameworks*.

## 4.4 Infraestrutura de Rede do Ambiente do Experimental Outdoor

A extensão apresentada na Figura 19 é adicionada um nodo com interface sem fio, separado fisicamente do nodo experimental presente no plano de dados e interligados

através de uma conexão cabeada. Reduzindo assim a grande infraestrutura cabeada e flexibilizando a utilização do ambiente experimental em topologias outdoor.

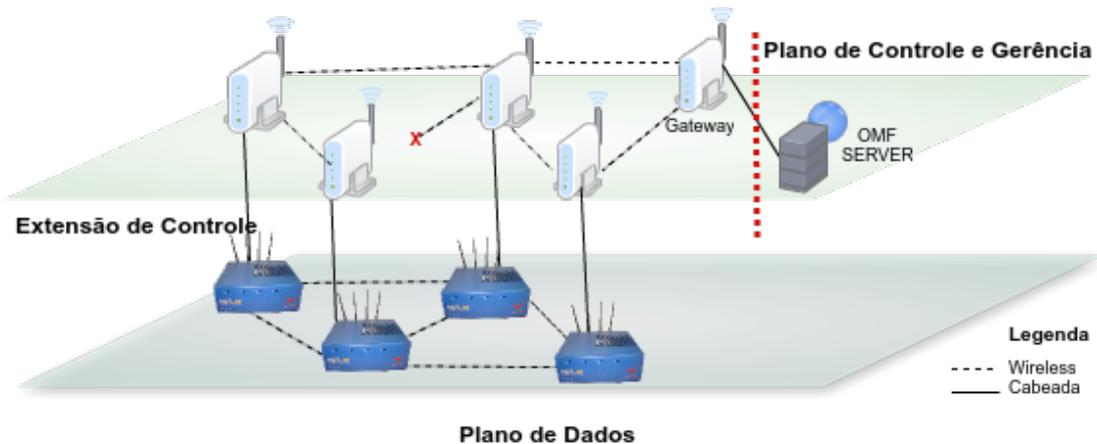


Figura 19: Infraestrutura de Rede. Fonte: Autor.

Com um nodo sem fio no plano de controle, os métodos das funcionalidades podem sofrer alterações. Desta forma, para manter os conceitos e funcionalidades já existentes na arquitetura do ambiente experimental OMF, é necessário que este nodo de controle não apenas suporte a comunicação sem fio, mas que mantenha as funcionalidades de controle sobre o plano de dados e consiga ser manipulado através do módulo Administração de Controle presente no plano de controle e gerência.

#### 4.4.1 Definição dos Componentes da Infraestrutura

Além dos requisitos é preciso definir os componentes dos equipamentos físicos, para que possa ser atendido o objetivo da infraestrutura do ambiente experimental com baixo custo, bem como o da arquitetura. Onde para isto são utilizados equipamentos de *firmware* aberto. Abaixo segue a breve descrição desses componentes:

- Servidor: É necessário um servidor de preferencialmente com sistema operacional de distribuição Linux, e que possa realizar virtualização, tenha acesso a internet e a rede de dados interna para o ambiente experimental. Neste trabalho é utilizado um SO Ubuntu 14.04 virtualizado com 8G de Memória e um SSD de 500GB, com o middleware e os módulos AM e EC do OMF instalado, além de possuir interfaces para os planos de dados e de controle interligadas a um node de controle gateway (TP-LINK TL-WRN1043ND).
- Nodo Experimental: O nodo experimental deve utilizar sistema operacional Linux, com métodos de controle através da interface sem fio, além de possuir uma interface sem fio tráfego de experimentos no plano de dados. O nodo utilizado é o nodo Icarus encontrado no ambiente experimental sem fio do FIBRE, o nodo Icarus trabalha com SO Ubuntu 16.04, com 8G de memória um SSD de 60GB, 4 antenas de 5dBi e duas

(02) interfaces ethernet, além de já possuir o RC do OMF instalado, sendo possível a utilização do OMF também.

- **Nodo de Controle:** Este nodo é adicionado ao plano de controle, com inteligência computacional, interface sem fio para o tráfego no plano de controle e interface ethernet para a conexão com os nodos experimentais, demonstrado na Figura 20. O nodo de controle gateway que vai ligado fisicamente ao servidor deve possuir uma interface ethernet a mais para conexão com a internet. Além disso, deve possuir hardware aberto, possibilidade de expansão e interface de gráfica de gerência. O nodo utilizado no ambiente é o radio TP-LINK, modelo TL-WRN1043ND, operando com o Openwrt Chaos Calmer 15.05 e o Luci para auxiliar na gerência graficamente.

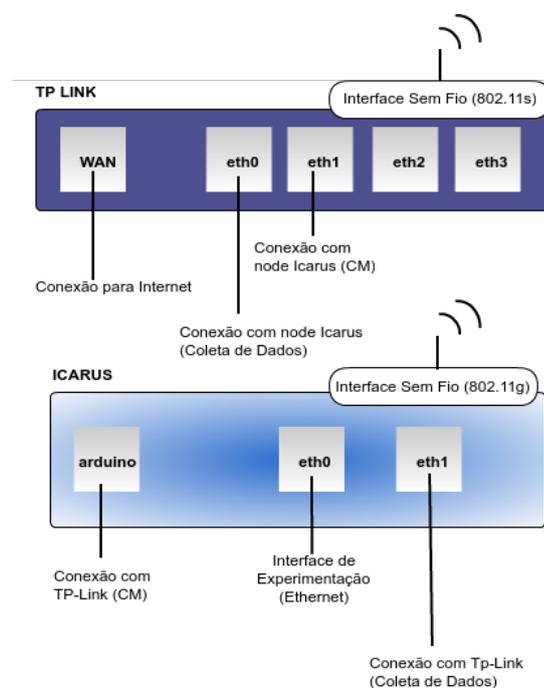


Figura 20: Esquema de ligação física (cabeadada). Fonte: Autor.

## 4.5 Características do Plano de Controle e Gerência

Dentre os planos existentes em um ambiente experimental sem fio, o plano de controle é o plano abordado no tema deste trabalho, não realizando alterações significativas ao plano de dados. Onde o plano de controle deve conter características específicas.

- **Agragação de Nodo de Controle:** O artigo desenvolvido por [Rakotoarivelo et al. 2010] diz que o OMF possui a separação do plano de dados do plano de controle, como em SDN (Software Defined-Network), independentemente da tecnologia sem fio. Porém, o plano de controle do FIBRE utiliza um único nodo (Icarus Node) para operar no plano de dados e no plano de controle, o que pode ocasionar indisponibilidade

no plano de controle do nodo Icarus, já que o usuário através do plano de dados pode realizar modificações de firmware, entre outras configurações. Para resolver este problema é preciso que o nodo do plano de dados seja separado do nodo do plano de controle, demonstrado na Figura 21.

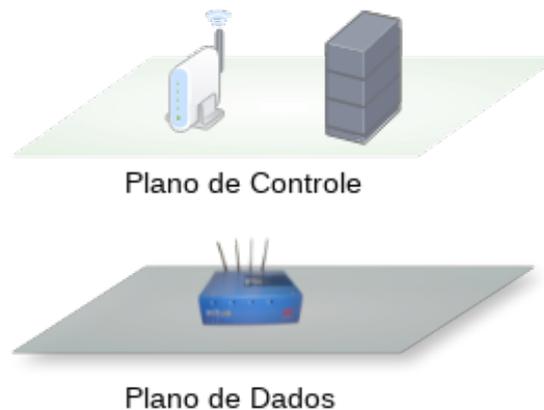


Figura 21: Separação de Planos com adição do Nodo Sem Fio. Fonte: Autor.

- Rede Sem Fio no Plano de Controle (redundância): O nodo de controle, como dito anteriormente, deve possuir interface sem fio para comunicação no plano de controle. Independentemente da tecnologia de rede sem fio utilizada no plano de controle, esta deve possibilitar o remanejamento do ambiente experimental, como a utilização em ambientes outdoor, possibilitando autonomia quanto a infraestrutura cabeada no momento de implantação do ambiente. Com o uso de redes sem fio é possível também obter redundância de acesso aos nodos, como visto na Figura 22, visando confiabilidade na comunicação sem fio. Tal característica habilita resiliência, reduzindo a possibilidade de falhas, como apresentado em [Vasconcelos and Salles 2012].

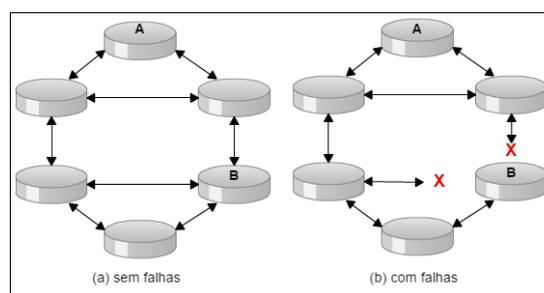


Figura 22: Resiliência (tolerância à falhas). Fonte: Autor.

Uma primeira ideia, visto em [Vasconcelos and Salles 2012], que pode ser vinculada a resiliência de uma rede é a quantidade de redundâncias que a mesma possui. De maneira intuitiva, uma topologia completamente conectada é mais resiliente do que uma rede que não possui redundância. Quando comparamos esses dois tipos de topologia é fácil perceber a diferença em termos de resiliência, mas o que existe na prática são situações intermediárias difíceis de atribuir uma classificação de acordo com a sua resiliência.

Porém vale destacar que além da quantidade, as capacidades das redundâncias são fundamentais, ou seja, o método de roteamento também é importante para se obter uma resiliência de qualidade.

- **Funcionamento do Plano de Controle:** Visando propor integração e flexibilidade o plano de controle garante todo o funcionamento de controle de experimentação do OMF, já apresentado no Capítulo 3, onde os módulos e ferramentas do OMF são capazes de controlar de forma eficiente alguns dos recursos do ambiente experimental, por exemplo, alocar recursos, resetar os nodos, reportar seus status, instalar um novo firmware; além de descrever, instrumentar, executar e coletar dados de experimentos. Porém, além de manter os módulos e ferramentas, existe a necessidade de agregar os módulos de controle da arquitetura apresentado neste Capítulo, que operam no plano de controle sem fio.

## 4.6 Conclusões do capítulo

Este capítulo teve como ênfase apresentar uma arquitetura de um *framework* de controle para ambientes experimentais de rede sem fio, com característica flexível que possibilita a integração com outros *frameworks* e inserção de comandos, como o exemplo do OMF. Foi apresentado também uma infraestrutura de um ambiente experimental sem fio com a adição de um nodo de controle que opera de modo sem fio e cabeado. Todas as características que o diferenciam dos trabalhos relacionados descritos no Capítulo 3, foram abordadas e solucionadas. A Extensão do Plano de Controle para Ambientes Experimentais Outdoor também leva em consideração todas as questões apresentadas no Capítulo 2.

As principais características da Extensão do Plano de Controle para Ambientes Experimentais Outdoor são prover um ambiente experimental sem fio que possibilita operar com resiliência e em modo outdoor de baixo custo; e um *framework* de controle para rede experimental sem fio que forneça todas as funcionalidades necessárias para a implantação, gerenciamento, monitoramento, administração e experimentação pelo paradigma de redes definidas por software.

---

---

# CAPÍTULO 5

---

## Análise da Proposta

Neste capítulo são apresentados os experimentos e os resultados encontrados referentes a comparação de ambientes experimentais, implantação da arquitetura de controle e da definição de controle por usuário no ambiente experimental sem fio.

### 5.1 Ambiente Experimental Sem Fio

Nesta sessão é apresentado um comparativo entre o ambiente experimental sem fio proposto e o ambiente experimental sem fio tradicional do FIBRE. A comparação é feita desde o uso de topologia, tecnologia, custo benefício, disponibilidade de uso *outdoor*, possibilidade do uso de controle *out-of-band*, interface de controle e tipo de controle, no qual são demonstradas as vantagens e desvantagens da utilização do ambiente proposto.

#### 5.1.1 Comparação entre Ambiente Experimental Sem Fio

A comparação de ambientes experimentais é realizada entre o ambiente experimental sem fio tradicional utilizado atualmente no FIBRE e o ambiente experimental sem fio proposto, onde ambos os ambientes ilustrados contam com dois nodos experimentais sem fio e um servidor, por onde é possível acessá-lo e obter acesso ao ambiente experimental.

O ambiente experimental sem fio tradicional do FIBRE, Figura 23a, conta com um *switch* concentrador para conexão cabeada do plano de controle, requerendo um alto custo de infraestrutura cabeada em seu plano de controle, por esta razão é utilizado de forma *indoor* tornando inviável a utilização em modo *outdoor*, pois na infraestrutura do ambiente experimental atual o nodo experimental Icarus necessita de infraestrutura para

2 redes *ethernet*. Com a utilização de tecnologia cabeada no plano de controle, torna a conexão mais segura referente a tecnologia sem fio, porém não a torna resiliente.

O acesso ao controle do ambiente experimental é através de SSH via terminal, onde o OMF [UFPA]. É utilizado para esse controle do ambiente tradicional, não existindo distinção de controle para cada tipo de usuário sendo possível somente controlar os experimentos do ambiente experimental e a troca de *firmware*, além de não possuir uma interface web de controle para se tornar intuitivo o controle do ambiente.

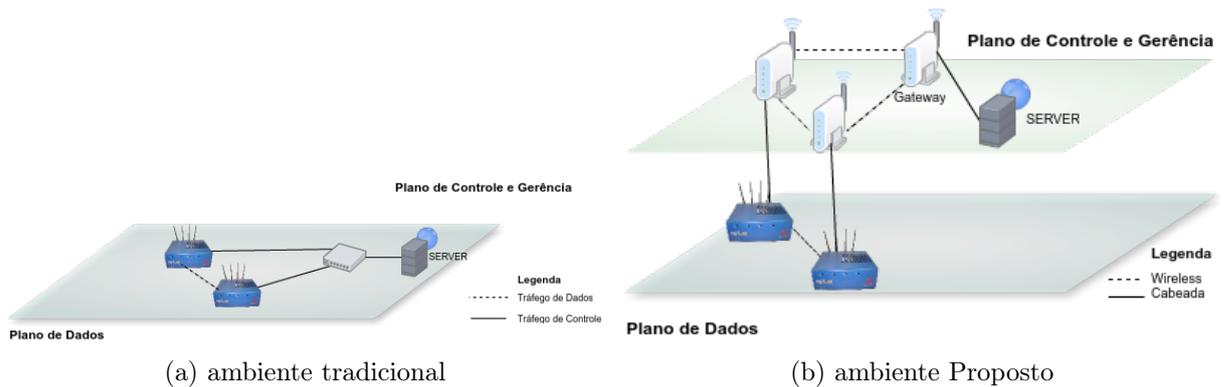


Figura 23: Comparação entre ambientes. Fonte: Autor.

O ambiente experimental sem fio proposto, Figura 23b, dispõe de uma infraestrutura cabeada mínima, para interligar cada um dos nodos experimentais com um nodo de controle que por sua vez torna possível a comunicação sem fio com o servidor. Esta comunicação sem fio pode ser qualquer tipo de conexão que possibilite resiliência, como Ad Hoc Sem Fio, Mesh, entre outros, para que seja tolerante e reduza a possibilidade de falhas na comunicação sem fio.

Apesar de ter sido utilizado um dos nodos de controle como *gateway* conectado diretamente com o servidor, caso o servidor possua interface sem fio não se faz necessário a utilização de um nodo como *gateway*. Vale destacar que devido cada nodo de controle possuir sua interface de conexão com a internet é possível acessá-los de forma *out-of-band* além do *in-band*, assim como acessar o servidor, ou seja, é possível realizar o controle de forma centralizada ou descentralizada.

Tabela 4: Comparação entre ambientes

Trabalhos	Custo Infra.	Controle Sem Fio	Resiliência	In/Outdoor	In/Out-of-Band
Amb. Tradicional	Alto	Não	Não	Indoor	In-Band
Amb. Proposto	Baixo	Sim	Sim	In/Outdoor	Ind/Outdoor

Diante dos cenários apresentados as principais diferenças e semelhanças referentes ao plano de controle ficaram mais evidentes, e estão representadas na Tabela 4 acima, para melhor compreensão da comparação. O plano de controle do ambiente experimental

proposto possui um baixo custo financeiro com relação ao ambiente tradicional (atual), devido não demandar de um projeto de infraestrutura cabeada para a implantação do plano de controle, já que ele atua em modo sem fio com redundância (resiliência) possibilitando o uso do ambiente experimental sem fio *indoor* e *outdoor*. Além da API de controle acessível de modo *in-band* e *out-of-band*.

### 5.1.2 Resultados do Ambiente Experimental Sem Fio

A possibilidade de utilizar o controle do ambiente experimental sem fio de modo *in-band* ou *out-of-band*, além dos diferentes tipos de topologia *indoor* e *outdoor*, com equipamentos de baixo custo financeiro é a principal vantagem em comparação com o ambiente tradicional, que requer um alto custo de infraestrutura cabeada para a implantação do ambiente *outdoor*, dependendo das distâncias entre as posições dos nodos experimentais. Já a desvantagem é devido o plano de controle operar em modo sem fio, pois o tempo de respostas dos nodos torna-se mais lento e inseguro. Porém para contornar isto o plano de controle sem fio implementado e aqui exemplificado opera em modo Mesh (IEEE 802.11s) para assim obter a resiliência e reduzir a possibilidade de perda de dados e insegurança do plano.

## 5.2 Definição de Controle por Usuário

Como mencionado anteriormente, o ambiente experimental possui dois tipos de usuário, administrador e experimentador. Através dos requisitos e das funcionalidades dos módulos da arquitetura apresentados neste trabalho, foi desenvolvido uma interface de controle web para os usuários do ambiente experimental sem fio, onde cada tipo de usuário possui suas definições de controle, podendo controlar o ambiente *outdoor* em modo *out-of-band*.

Visto que no ambiente experimental sem fio tradicional, o único controle que o usuário experimentador possui é através de linha de comando, com a finalidade de obter o controle de energia do nodo experimental, instalação de *firmware* e captura de dados do experimento, já o usuário administrador além de possuir as mesmas definições de controle do experimentador, onde através do Labora Schedule [Schedule] desenvolvido pela Universidade Federal do Goiás - UFG é possível adicionar ou excluir credenciais de usuários do ambiente experimental e prover a federação e alocação dos recursos do FIBRE e seus parceiros.

O método de acesso para o controle é realizado com os usuários já credenciados no ambiente, no caso do FIBRE é a partir do Labora Schedule. Para este trabalho foi desenvolvido uma Interface de Login, Figura 24, que faz a diferenciação dos ambientes de controle para o experimentador e administrador, e que serão apresentados a seguir:

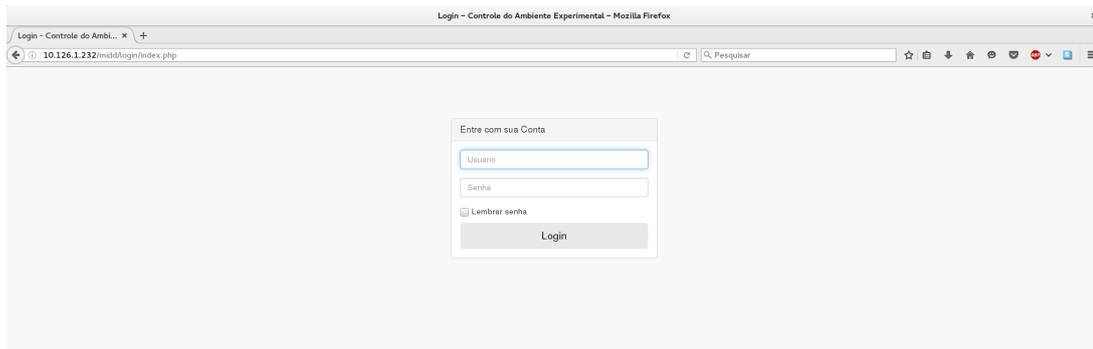


Figura 24: Tela de Login. Fonte: Autor.

### 5.2.1 Interface de Controle do Usuário: Administrador e Experimentador

A interface de controle do administrador permite somente acesso em modo *in-band*, por questões de segurança do ambiente. A Figura 25 demonstra esta interface, onde através dela é possível obter dados do servidor, dos nodos de controle e nodos experimentais, além de executar funções de controle no ambiente experimental como um todo.

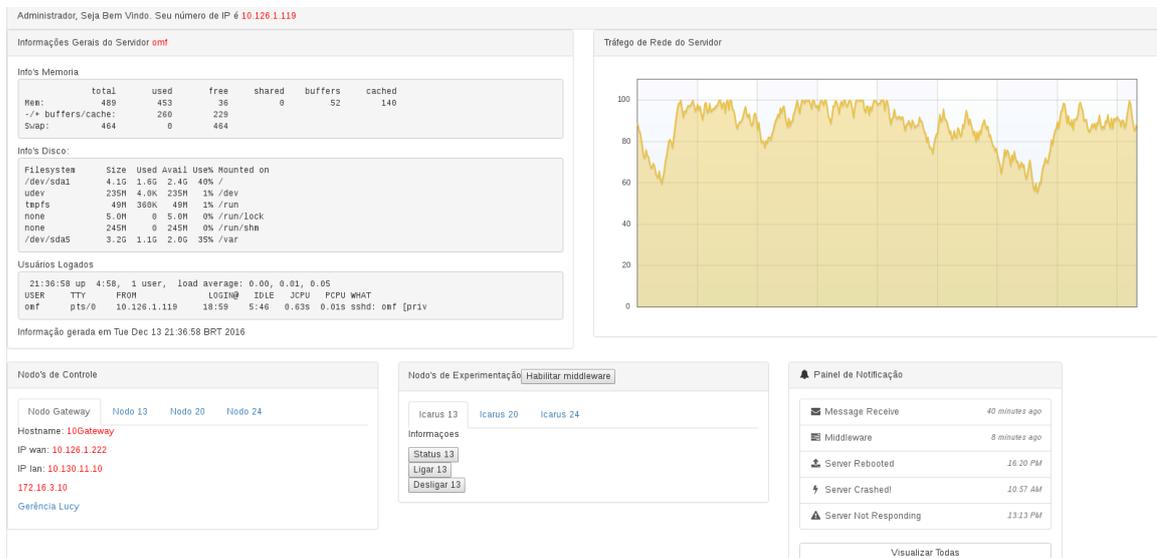


Figura 25: Interface gráfica para usuário administrador. Fonte: Autor.

Diferentemente da interface de controle do usuário administrador, a interface do experimentador, Figura 26, pode ser acessada tanto *in-band* quanto *out-of-band* e não possui a interface de gerência e acesso aos nodos de controle e nem é exibida o número de usuários logados no ambiente experimental. O tráfego de rede mostrado é referente a interface de experimentação do servidor, que pode ou não ser utilizada pelo experimentador, já que os experimentos podem ser executados somente nos nodos de experimentação.

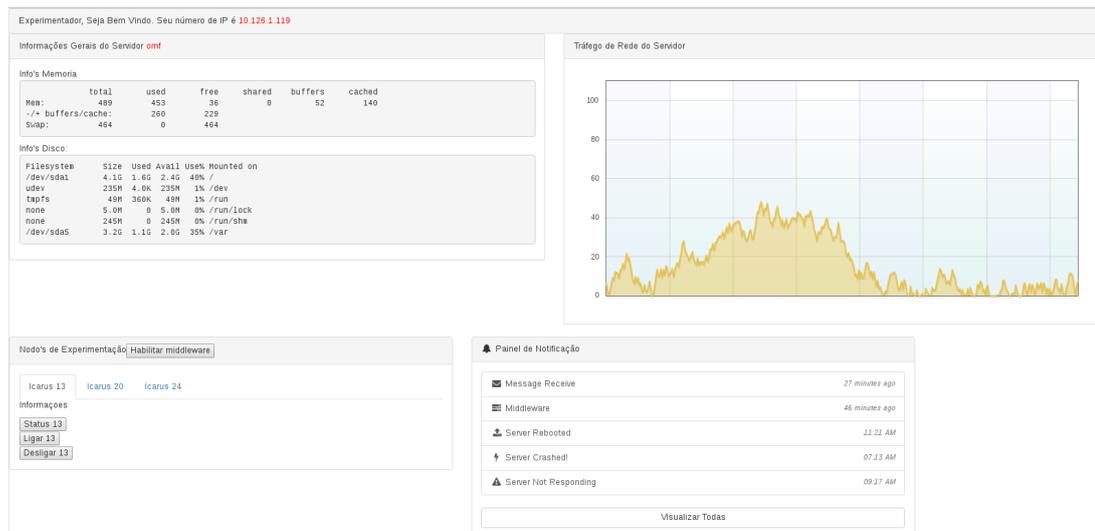


Figura 26: Interface gráfica para usuário administrador. Fonte: Autor.

## 5.3 Implantação da Arquitetura de Controle Proposta

Como já apresentado no capítulo anterior, a arquitetura de controle para ambientes experimentais sem fio prove extensibilidade, sendo possível ser adicionado a ela novos comandos e/ou aplicações. Com a implantação da arquitetura de controle no ambiente experimental é facilitada a realização e visualização das operações de controle de um ambiente experimental sem fio, além de padronizar a forma de envio de comandos, possibilitando assim sua extensibilidade podendo ser implantada em ambientes experimentais que não possuem as funções de controle obtidas na arquitetura ou até mesmo em ambientes experimentais já consolidados, não excluindo a atual forma de funcionamento.

### 5.3.1 Funcionamento da Arquitetura (comandos, extensibilidade, etc)

A interface de controle é um *front-end* que se comunica com o *middleware* que reside no servidor, onde o mesmo envia comandos de controle para o nodo experimental. Para entender melhor esta interação e o funcionamento da arquitetura foi montado um ambiente experimental sem fio *outdoor* para testes.

#### 5.3.1.1 Cenário de Teste

O cenário de teste montado, foi um Ambiente Experimental Sem Fio *Outdoor* composto por 05 (cinco) nodos de controle sem fio, sendo que 01 (um) dos nodos de controle atua como *gateway* conectados por interface *ethernet* a 01 (um) servidor e os 04 (quatro) nodos restantes atuam no controle referente aos outros 04 (quatro) nodos

experimentais Icarus. Vale destacar que foi utilizado um gateway pelo fato do servidor não possuir interface de rede que opere com tecnologia sem feio com redundância.

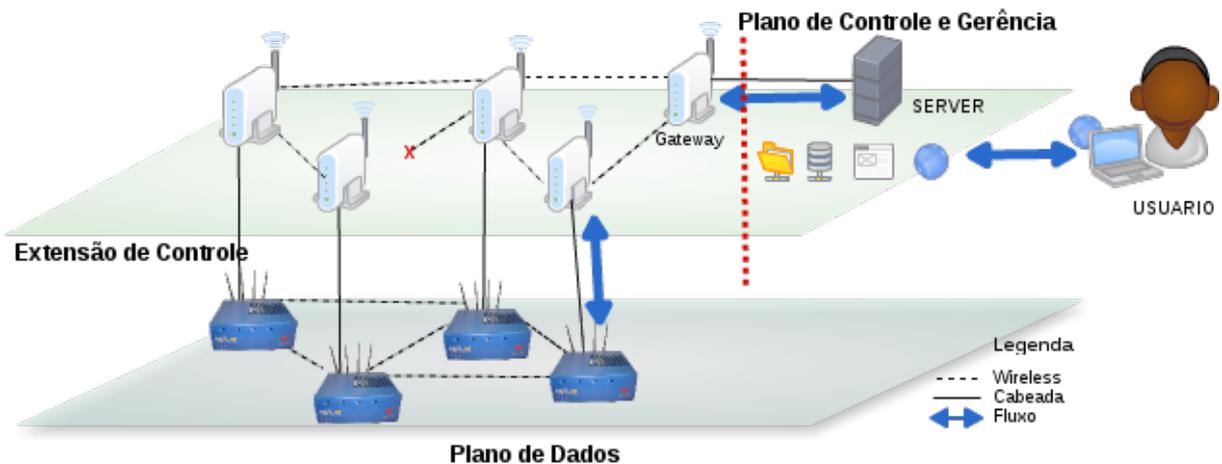


Figura 27: Cenário de Teste. Fonte: Autor.

Os testes e resultados apresentados a seguir são com a utilização do servidor e do nodo de experimentação Icarus 20, com exceção do teste de carga na rede que foi realizado com o servidor, Icarus 20 e Icarus 24.

### 5.3.1.2 Teste do Controle de Energia

Em Nodo's de Experimentação, Figura 28 da interface de controle o usuário administrador tem a opção de habilitar o *middleware* de controle, que irá receber os comandos requisitados, os comandos possíveis são os de controle energia, como ligar, desligar e saber o status de um nodo experimental.

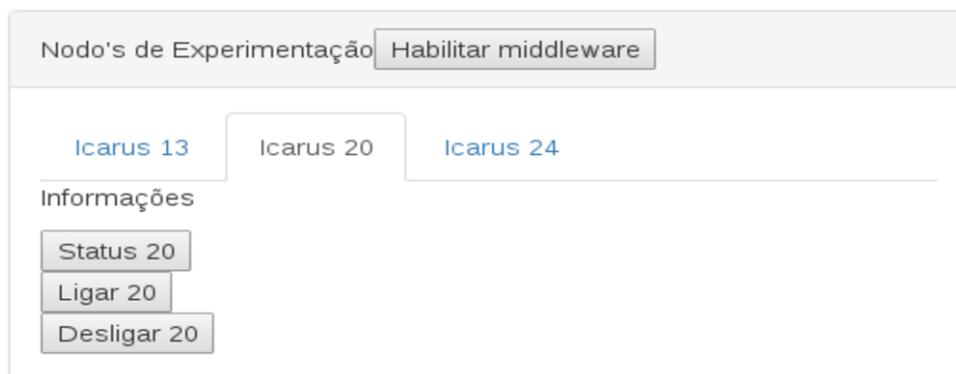
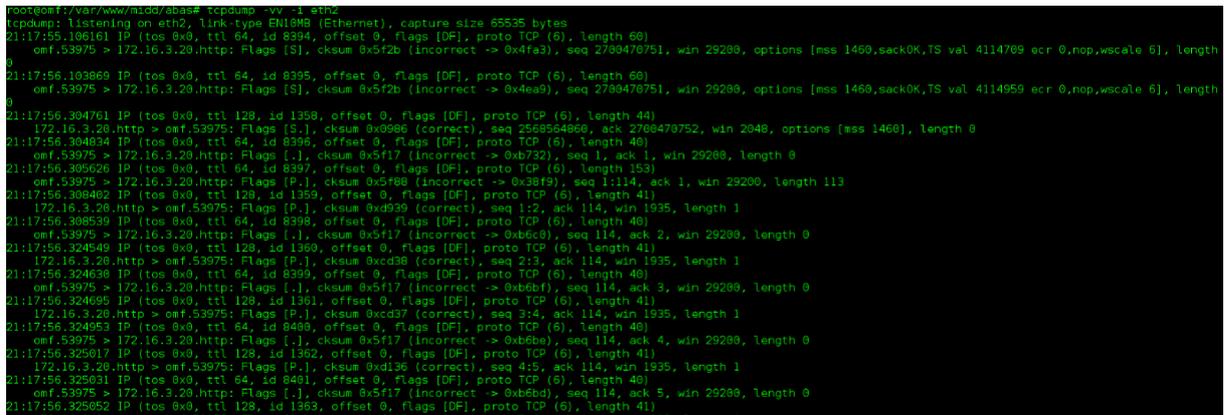


Figura 28: Interface de Controle de Energia. Fonte: Autor.

Com isso, realizado dois teste com 15 repetições cada, um utilizando rede cabeada e outro utilizando a rede sem fio, para demonstrar o funcionamento da API de controle em ambas as redes. Quando enviada a requisição de comando para Ligar o nodo Icarus 20, um script é executado contendo o comando, descrito na Figura 29, interpretado pelo *middleware* que por sua vez executa o comando solicitado. Vale destacar que a forma de envio dos comandos de controle de energia dos nodos experimentais do ambiente FIBRE é através de requisição http, então foi realizado um monitoramento, Figura 30 na interface de rede do servidor no momento da requisição do comando e verificado o tráfego dos pacotes para constatação de envio.

```
#!/bin/bash
curl -X POST -d '{"jsonrpc": "2.0","method": "controle","params": [{"status": "on"}]}' http://10.130.11.200:8080/api
```

Figura 29: Comando do script do middleware. Fonte: Autor.



```
root@omf:/var/www/midd/abast# tcpdump -vv -i eth0
tcpdump: listening on eth0, link-type EN10MB (Ethernet), capture size 65535 bytes
21:17:55.106161 IP (tos 0x0, ttl 64, id 8394, offset 0, flags [DF], proto TCP (6), length 60)
    omf.53975 > 172.16.3.20.http: Flags [S], cksum 0x5f2b (incorrect -> 0x4faa), seq 2700470751, win 29280, options [mss 1460,sackOK,TS val 4114709 ecr 0,nop,wscale 6], length 0
21:17:56.103869 IP (tos 0x0, ttl 64, id 8395, offset 0, flags [DF], proto TCP (6), length 60)
    omf.53975 > 172.16.3.20.http: Flags [S], cksum 0x5f2b (incorrect -> 0x4ea9), seq 2700470751, win 29280, options [mss 1460,sackOK,TS val 4114959 ecr 0,nop,wscale 6], length 0
21:17:56.304761 IP (tos 0x0, ttl 128, id 1358, offset 0, flags [DF], proto TCP (6), length 44)
    172.16.3.20.http > omf.53975: Flags [R], cksum 0x9986 (correct), seq 2568564889, ack 2700470752, win 2048, options [sca 1460], length 0
21:17:56.304894 IP (tos 0x0, ttl 64, id 8395, offset 0, flags [DF], proto TCP (6), length 40)
    omf.53975 > 172.16.3.20.http: Flags [R], cksum 0x5f17 (incorrect -> 0xb732), seq 1, ack 1, win 29280, length 0
21:17:56.305626 IP (tos 0x0, ttl 64, id 8397, offset 0, flags [DF], proto TCP (6), length 153)
    omf.53975 > 172.16.3.20.http: Flags [P.], cksum 0x5f68 (incorrect -> 0x38f9), seq 1:114, ack 1, win 29280, length 113
21:17:56.306402 IP (tos 0x0, ttl 128, id 1359, offset 0, flags [DF], proto TCP (6), length 41)
    172.16.3.20.http > omf.53975: Flags [P.], cksum 0xad99 (correct), seq 1:2, ack 114, win 1935, length 1
21:17:56.308599 IP (tos 0x0, ttl 64, id 8398, offset 0, flags [DF], proto TCP (6), length 40)
    omf.53975 > 172.16.3.20.http: Flags [R], cksum 0x5f17 (incorrect -> 0xb6c0), seq 114, ack 2, win 29280, length 0
21:17:56.324549 IP (tos 0x0, ttl 128, id 1360, offset 0, flags [DF], proto TCP (6), length 41)
    172.16.3.20.http > omf.53975: Flags [P.], cksum 0xcd38 (correct), seq 2:3, ack 114, win 1935, length 1
21:17:56.324630 IP (tos 0x0, ttl 64, id 8399, offset 0, flags [DF], proto TCP (6), length 40)
    omf.53975 > 172.16.3.20.http: Flags [R], cksum 0x5f17 (incorrect -> 0xb5b1), seq 114, ack 3, win 29280, length 0
21:17:56.324695 IP (tos 0x0, ttl 128, id 1361, offset 0, flags [DF], proto TCP (6), length 41)
    172.16.3.20.http > omf.53975: Flags [P.], cksum 0xcd37 (correct), seq 3:4, ack 114, win 1935, length 1
21:17:56.324953 IP (tos 0x0, ttl 64, id 8400, offset 0, flags [DF], proto TCP (6), length 40)
    omf.53975 > 172.16.3.20.http: Flags [R], cksum 0x5f17 (incorrect -> 0xb6be), seq 114, ack 4, win 29280, length 0
21:17:56.325017 IP (tos 0x0, ttl 128, id 1362, offset 0, flags [DF], proto TCP (6), length 41)
    172.16.3.20.http > omf.53975: Flags [P.], cksum 0xd136 (correct), seq 4:5, ack 114, win 1935, length 1
21:17:56.325091 IP (tos 0x0, ttl 64, id 8401, offset 0, flags [DF], proto TCP (6), length 40)
    omf.53975 > 172.16.3.20.http: Flags [R], cksum 0x5f17 (incorrect -> 0xb6bd), seq 114, ack 5, win 29280, length 0
21:17:56.325652 IP (tos 0x0, ttl 128, id 1363, offset 0, flags [DF], proto TCP (6), length 41)
```

Figura 30: Trafego de Pacotes (tcpdump). Fonte: Autor.

Visto que o *script* foi executado e enviado as requisições http, foi monitorado o tempo de resposta para ligar o nodo Icarus 20. A Figura seguir, Figura 31 mostra o tempo em milissegundos que leva para nodo experimental receber o comando “Ligar” do servidor, onde foi realizado o teste tanto com a tecnologia de rede sem fio quanto cabeada.

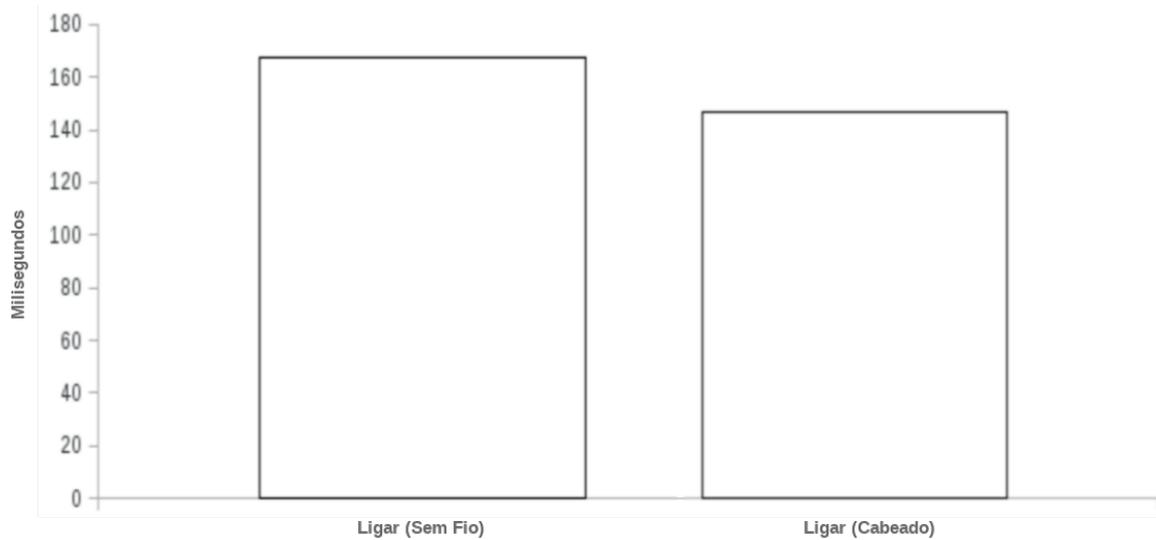


Figura 31: Tempo de resposta para ligar o Nodo Experimental (sem fio x cabeado).  
Fonte: Autor.

É possível observar que através da tecnologia cabeada alcançamos o tempo médio de 146,4 milissegundos enquanto que com a tecnologia sem fio alcançou em torno de 168,7 milissegundos. Essa diferença com o menor tempo pela rede cabeada é esperado devido a taxa de transferência ser superior em relação à rede sem fio.

### 5.3.1.3 Teste da Instalação de Firmware (Caso de Uso)

A imagem padrão utilizada no ambiente FIBRE para instalação nos nodos de experimentação é nomeada como `baseline.gz` e ocupa 3Gb de espaço em disco, localizada em `/tftpboot/`. Diferentemente do Controle de Energia suas requisições não são realizadas através de HTTP, mas sim por protocolo de transferência de arquivo, neste caso o FTP como é demonstrado na Figura 32.

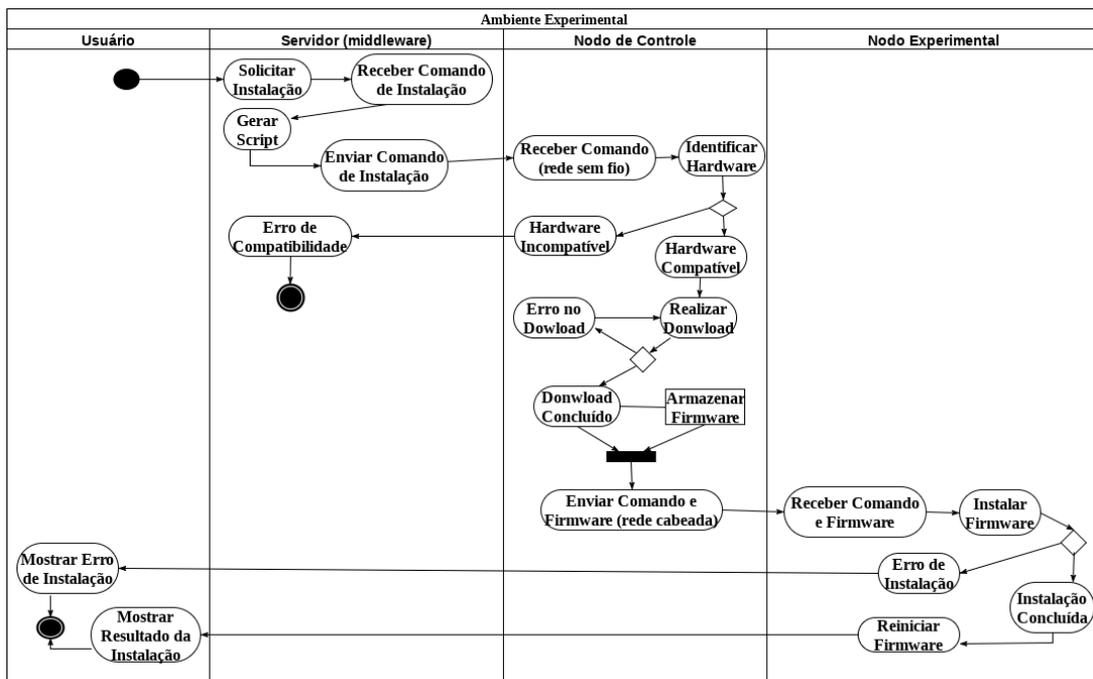


Figura 32: Diagrama de Atividade - Instalação de Firmware. Fonte: Autor.

O diagrama de atividade demonstra a ação de cada componente atuante no processo de instalação de firmware. O usuário através da interface de controle ou pelo terminal de comandos solicita a instalação no nodo experimental, onde por sua vez executa um script e envia a solicitação no formato de comando ao *middleware* que interpreta o comando, identificando a compatibilidade entre o *firmware* a ser instalado com o nodo experimental e envia o *firmware* para o nodo de controle através da interface *wireless*. Com isso, o nodo de controle realiza o download do *firmware* e o armazena, para então enviar o *firmware* através da Interface Cabeada para o nodo experimental que por sua vez finaliza a instalação e reinicia logo após já com o novo *firmware*. Vale destacar que grande parte deste processo tem visão transparente para o usuário experimentador, como o resultado da etapa de download e instalação.

Apesar do fluxo demonstrado na Figura 32, até o final desta dissertação não foi implementado a inteligência no nodo de controle. Para realização desses testes de funcionamento, foram realizadas dois testes com 15 simulações de transferência FTP de um arquivo com 3,3GB/s com o IPERF cada, um teste foi utilizando o plano de controle cabeado, o tradicional do FIBRE, e o outro com o plano de controle sem fio proposto. Para o teste foi gerado tráfego TCP com a intenção de capturar dados para comprovação de funcionamento e o comportamento da rede durante o experimento. A Figura 33 apresenta a comparação da média de tempo de duração das simulações de tráfego TCP realizada.

A comparação da média da vazão da rede durante os testes é apresentado a seguir, Figura 34.

A partir das Figuras 33 e 34 apresentadas é possível observar que quanto maior o tempo, menor é vazão, onde esse comportamento é dado como comum na literatura

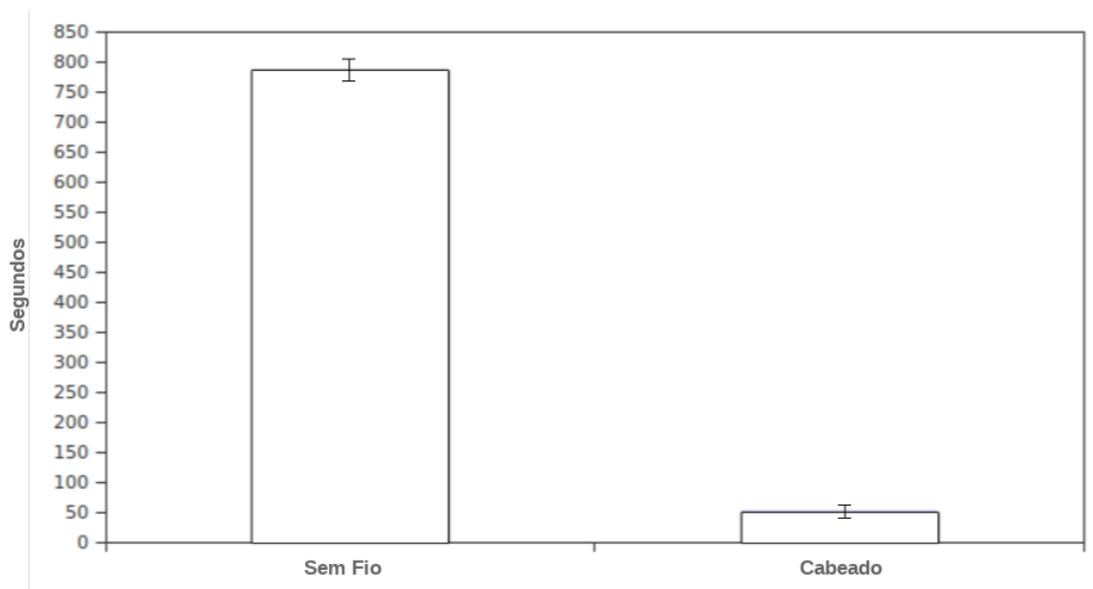


Figura 33: Média do Tempo de Transferência. Fonte: Autor.

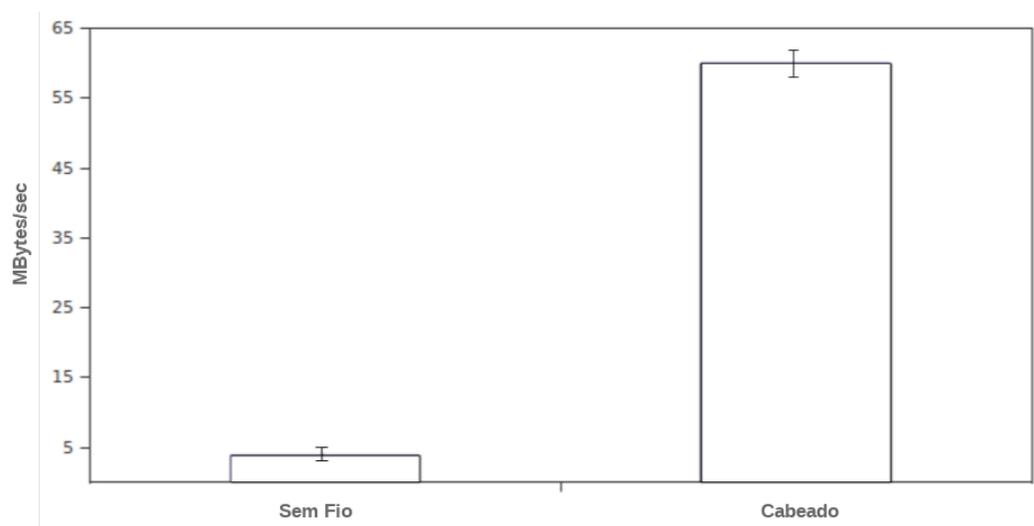


Figura 34: Média da Vazão. Fonte: Autor.

de redes. Devido a infraestrutura e a diferença de comportamento das redes, o teste da rede sem fio levou em média 869 segundos com uma vazão de 3,5 MBytes/s enquanto a rede cabeada obteve em média 60 segundos para transferência de 3GB/s com uma vazão de 58 MBytes/s. Este resultado já era esperado pois a rede sem fio opera com 54MB/s enquanto que a rede *ethernet* opera com 1GB/s.

#### 5.3.1.4 Teste da capacidade do plano de controle sem fio

Um teste de saturação de rede comum normalmente é realizado com uma duração de 24 horas, pois em determinados horários existem maiores variações no comportamento de tráfego da rede, porém como a proposta é para um ambiente de rede controlado, onde essas variações são inexistentes, o experimento foi realizado com duração de 2 minutos

com 15 repetições utilizando o protocolo UDP, pois o TCP possui janela de controle da banda, ou seja não permite testar a saturação da rede.

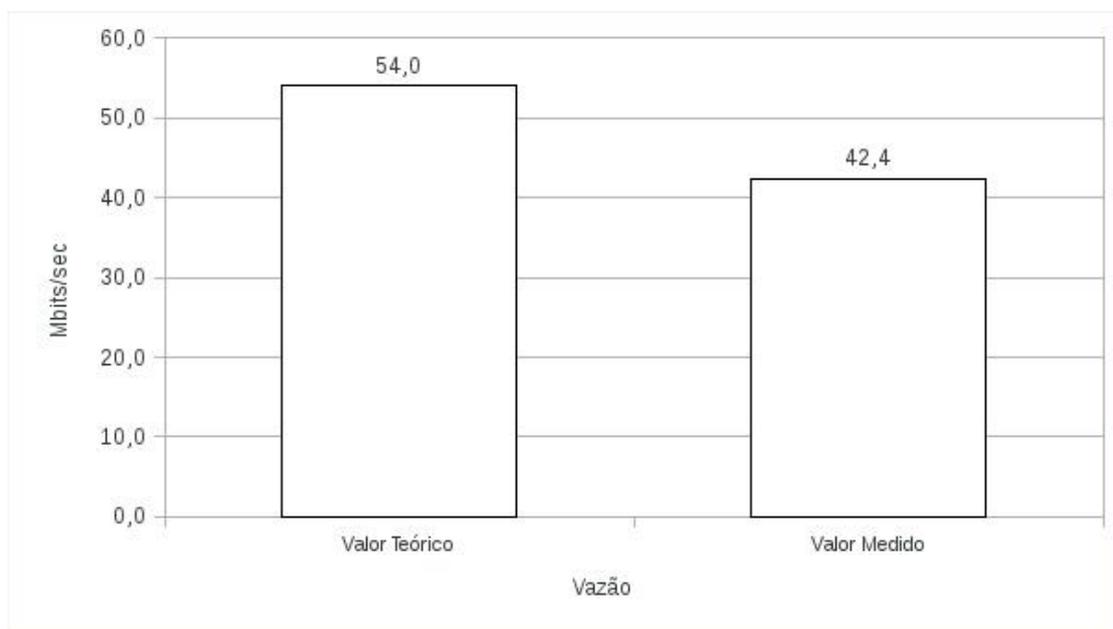


Figura 35: Sobrecarga no Plano de Controle. Fonte: Autor.

A Figura 35 apresenta dois resultados do experimento realizado com duração de 2 minutos no plano de controle. O valor da média quantitativa em Mbits transferidos onde obteve o resultado de 3948,00 Mbits/s e a largura de banda com 68,85Mbits/s que representa a média de onde ocorre o gargalo na rede. Demonstrando assim a capacidade média da rede de controle sem fio.

## 5.4 Conclusões do Capítulo

Diante dos resultados apresentados, demonstrou-se a possibilidade de implantação e a viabilidade de um plano de controle sem fio com equipamentos de baixo custo financeiro em um ambiente experimental sem fio. Apresentou também os requisitos e funcionamento do módulo de controle pré definido no *framework* OREx.

Com o cenário implementado pode-se definir facilmente a topologia do ambiente experimental como *indoor* ou *outdoor*. Devido não necessitar de uma grande infraestrutura cabeada para movimentar as posições de alocações dos nodes experimentais foi possível prover resiliência no plano de controle com a finalidade de sanar os possíveis erros na comunicação sem fio.

Devido grande parte das literaturas de Engenharia de Software afirmar que um *framework* deve prover extensibilidade em sua arquitetura, assim como visto no OREx. A arquitetura do módulo de controle criada foi definida neste conceito.

A definição da arquitetura de controle manteve o funcionamento do plano de

---

controle existente, além de definir requisitos de controle para cada tipo de usuário, experimentador ou administrador, onde cada um possui suas políticas de acesso. Por sua vez foi perceptível estas diferenças na interface web para o plano de controle implementada, que auxilia e traz facilidades na interação do usuário com o ambiente experimental, além proporcionar a operação do controle em modo *out-of-band* e de demonstrar funcional todo o ciclo de implementação da proposta.

---

---

# CAPÍTULO 6

---

## Considerações Finais e Publicações

### 6.1 Conclusões

Esta dissertação propõe um extensão do plano de controle que opera com rede sem fio em ambientes experimentais e que possibilita sua utilização em modo *outdoor*, realizando modificações na infraestrutura do ambiente experimental FIBRE, no qual é apresentado um novo *framework* de controle para ambientes experimentais de rede sem fio. Tem como objetivo prover gerência, monitoramento e controle de ambientes experimentais de redes sem fio, seja em modo *in-band* ou *out-of-band*, além de possibilitar a fácil instalação *outdoor* com baixo custo, para assim os experimentadores conseguirem executar e controlar experimentos sem fio *outdoor*.

Posto que o trabalho aqui apresentado é baseado no *framework* OREx, o aspecto inovador é devido ao fato de que a solução proposta tenta se apoiar em seu desenvolvimento em um modelo de arquitetura de software já consolidado na comunidade científica e no mercado de grandes softwares, o MVC, também como diferencial foi pensado em uma rede sem fio e sem nenhuma infraestrutura cabeada, considerando apenas que alguns pontos da topologia tem acesso ao mundo externo (*gateways*), e que todos os componentes são de fácil aquisição no mercado nacional, facilitando assim seu uso *outdoor*.

### 6.2 Disseminação de Informação

Como resultado deste trabalho foi gerado, submetido, aprovado e publicado o artigo abaixo.

Extensão do Plano de Controle Sem Fio para Ambientes Experimentais Outdoor, submetido e aceito na trilha principal do XXXIV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações

e Processamento de Sinais (SBrT), 2016.

## 6.3 Trabalhos Futuros

Com a conclusão desta dissertação, a ideia posterior é dar continuidade neste trabalho com os seguintes tópicos:

- Implementar os módulos pendentes desta proposta.
- Substituir o nodo Icarus por um nodo computacional aberto e sem fio de baixo custo financeiro no plano de dados, diminuindo o custo de implantação do ambiente experimental como um todo
- Integrar o middleware de controle ao Labora Schedule utilizado atualmente no OMF do FIBRE.
- Habilitar políticas de QoS no plano de controle e gerência.

---

## Referências

- [Aguiar<sup>1</sup> et al. ] Aguiar<sup>1</sup>, E. S., Abelém, A. J. G., Damalio, D. B., Gomes, R. L., and Pinheiro, B. A. Segurança em redes mesh: Tendências, desafios e aplicações.
- [Anderson et al. 2010] Anderson, E., Phillips, C., Yee, G., Sicker, D., and Grunwald, D. (2010). Challenges in deploying steerable wireless testbeds. In *International Conference on Testbeds and Research Infrastructures*, pages 231–240. Springer.
- [Berman et al. 2014] Berman, M., Chase, J. S., Landweber, L., Nakao, A., Ott, M., Raychaudhuri, D., Ricci, R., and Seskar, I. (2014). Geni: A federated testbed for innovative network experiments. *Computer Networks*, 61(0):5 – 23. Special issue on Future Internet Testbeds – Part I.
- [Buiati ] Buiati, F. *Protocolo Seguro para Autoconfiguração de Endereços de Redes Móveis Ad Hoc*. PhD thesis, MS thesis.
- [call 2010] call, I. E.-B. C. (2010). Future internet brazilian environment for experimentation. Website Project. Disponível em [fibre.org.br](http://fibre.org.br).
- [Capone et al. 2007] Capone, A., Cesana, M., Napoli, S., and Pollastro, A. (2007). Mobimesh: a complete solution for wireless mesh networking. In *Mobile Adhoc and Sensor Systems, 2007. MASS 2007. IEEE International Conference on*, pages 1–3. IEEE.
- [Carvalho 2014] Carvalho, D. F. (2014). Aiga: um ambiente integrado de gerência para redes em malha sem fio ieee 802.11 s. Master's thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- [Ciuffo 2016] Ciuffo, Leandro e Machado, I. (2016). Taas: Testbeds como serviço. TaaS: Testbeds como Serviço. Disponível em <https://pt.slideshare.net/leandrociuffo/taas-testbeds-como-servio>. Acessado: 14-06-2016.
- [Commission 2008] Commission, E. (2008). Area 6 "future internet research and experimentation". Draft Issues Paper for discussion at the conference "The Future of the Internet". Disponível em [http://www.future-internet.eu/fileadmin/documents/bled\\_documents/experiental\\_facilities/FIRE-Issues-paper-2.2.pdf](http://www.future-internet.eu/fileadmin/documents/bled_documents/experiental_facilities/FIRE-Issues-paper-2.2.pdf). Acessado: 21-12-2016.

- [Commission 2010] Commission, E. (2010). Cognitive radio experimentation world. Website Project. Disponível em [www.crew-project.eu/overview](http://www.crew-project.eu/overview). Acessado: 08-01-2017.
- [da Silva 2017] da Silva, A. M. (2017). Inclusão digital e literacia informacional em ciência da informação. *Prisma. com*, (7).
- [Deacon 2009] Deacon, J. (2009). Model-view-controller (mvc) architecture. *Online* [Citado em: 10 de março de 2006] <http://www.jdl.co.uk/briefings/MVC.pdf>.
- [do Valle and Muchaluat-Saade 2012] do Valle, R. D. T. and Muchaluat-Saade, D. C. (2012). Meshadmin: An integrated platform for wireless mesh network management. In *Network Operations and Management Symposium (NOMS), 2012 IEEE*, pages 293–301. IEEE.
- [Eide et al. 2006] Eide, E., Stoller, L., Stack, T., Freire, J., and Lepreau, J. (2006). Integrated scientific workflow management for the emulab network testbed. In *USENIX Annual Technical Conference, General Track*, pages 363–368.
- [Farias et al. 2011] Farias, F. N., Júnior, J. M. D., Salvatti, J. J., Silva, S., Abelém, A. J., Salvador, M. R., and Stanton, M. A. (2011). Pesquisa experimental para a internet do futuro: Uma proposta utilizando virtualização e o framework openflow. *XXIX Simpósio de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos-SBRC*.
- [Feldmann 2007] Feldmann, A. (2007). Internet clean-slate design: what and why? *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 37(3):59–64.
- [FIND 2013] FIND (2013). Nsf nets find initiative. Website Project. Disponível em [www.nets-find.net/index.php](http://www.nets-find.net/index.php). Acessado: 13-07-2015.
- [Foundation ] Foundation, D. S. Django - the web framework for perfectionists with deadlines. Website Project. Disponível em [www.djangoproject.com](http://www.djangoproject.com). Acessado: 19-09-2016.
- [Gavras et al. 2007] Gavras, A., Karila, A., Fdida, S., May, M., and Potts, M. (2007). Future internet research and experimentation: the fire initiative. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 37(3):89–92.
- [GENI 2016] GENI (2016). Geni-global environment for network innovations. Website Project. Disponível em [www.geni.net](http://www.geni.net). Acessado: 29-11-2016.
- [GERCOM ] GERCOM. Grupo de estudos em redes de computadores e comunicação multimídia. Website. Disponível em [http://www.gercom.ufpa.br/index.php?option=com\\_content&view=article&id=132&Itemid=312](http://www.gercom.ufpa.br/index.php?option=com_content&view=article&id=132&Itemid=312). Acessado: 25-01-2017.
- [Guedes et al. 2012] Guedes, D., Vieira, L., Vieira, M., Rodrigues, H., and Nunes, R. V. (2012). Redes definidas por software: uma abordagem sistêmica para o desenvolvimento de pesquisas em redes de computadores. *Minicursos do Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores-SBRC 2012*, 30(4):160–210.
- [Jagadeesan and Krishnamachari 2015] Jagadeesan, N. A. and Krishnamachari, B. (2015). Software-defined networking paradigms in wireless networks: a survey. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 47(2):27.

- [Jardosh et al. 2008] Jardosh, A. P., Suwannatat, P., Höllerer, T., Belding, E. M., and Almeroth, K. C. (2008). Scuba: focus and context for real-time mesh network health diagnosis. In *International Conference on Passive and Active Network Measurement*, pages 162–171. Springer.
- [Leccese et al. 2014] Leccese, F., Cagnetti, M., and Trinca, D. (2014). A smart city application: A fully controlled street lighting isle based on raspberry-pi card, a zigbee sensor network and wimax. *Sensors*, 14(12):24408–24424.
- [Macker 1999] Macker, J. (1999). Mobile ad hoc networking (manet): Routing protocol performance issues and evaluation considerations.
- [Manzano et al. 2007] Manzano, D., Cano, J.-C., Calafate, C. T., and Manzoni, P. (2007). Maya: A tool for wireless mesh networks management. In *Mobile Adhoc and Sensor Systems, 2007. MASS 2007. IEEE International Conference on*, pages 1–6. IEEE.
- [McKeown et al. 2008] McKeown, N., Anderson, T., Balakrishnan, H., Parulkar, G., Peterson, L., Rexford, J., Shenker, S., and Turner, J. (2008). Openflow: enabling innovation in campus networks. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 38(2):69–74.
- [Moraes et al. 2013] Moraes, M., Pinheiro, B., Nascimento, V., and Abelém, A. (2013). Redes sem fio de multiplos saltos definidas por software. In *IV Workshop de Pesquisa Experimental da Internet do Futuro*.
- [Nanda and Kotz 2008] Nanda, S. and Kotz, D. (2008). Mesh-mon: A multi-radio mesh monitoring and management system. *Computer Communications*, 31(8):1588–1601.
- [Nascimento 2014] Nascimento, V. d. B. (2014). Orquestrador para redes experimentais sem fio de múltiplos saltos definidas por software. Master’s thesis. Disponível em <http://www.gercom.ufpa.br/>.
- [NITLab 2016] NITLab (2016). Nitos: Network implementation testbed using open source platforms. Website Project. Disponível em [nitlab.inf.uth.gr/NITlab/nitos](http://nitlab.inf.uth.gr/NITlab/nitos). Acessado: 27-11-2016.
- [OMF ] OMF. control and management framework. Website Project. Disponível em [omf.mytestbed.net](http://omf.mytestbed.net). Acessado: 05-05-2016.
- [Pack et al. 2007] Pack, S., Choi, J., Kwon, T., and Choi, Y. (2007). Fast-handoff support in iee 802.11 wireless networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 9(1):2–12.
- [Padhye ] Padhye, J., Z. B. B. V. Self organizing wireless mesh networks. Wikipedia. Disponível em [www.microsoft.com/en-us/research/project/self-organizing-wireless-mesh-networks/](http://www.microsoft.com/en-us/research/project/self-organizing-wireless-mesh-networks/). Acessado: 09-07-2016.
- [Paul et al. 2011] Paul, S., Pan, J., and Jain, R. (2011). Architectures for the future networks and the next generation internet: A survey. *Computer Communications*, 34(1):2–42.
- [Peterson et al. 2006] Peterson, L., Muir, S., Roscoe, T., and Klingaman, A. (2006). Planetlab architecture: An overview. *PlanetLab Consortium May*, 1(15):4–1.

- [Peterson et al. 2009] Peterson, L., Sevinc, S., Lepreau, J., Ricci, R., Wroclawski, K., Faber, T., Schwab, S., and Baker, S. (2009). Slice-based facility architecture, draft version 1.04. *April*, 7:2009.
- [Pinheiro et al. 2009] Pinheiro, B., Nascimento, V., Moreira, W., and Abelém, A. (2009). Abaré: A deployment and management framework for wireless mesh network. In *Communications, 2009. LATINCOM'09. IEEE Latin-American Conference on*, pages 1–6. IEEE.
- [Programme 2015] Programme, E. C. H. . (2015). Wireless software and hardware platforms for flexible and unified radio and network control. Website Project. Disponível em [www.wishful-project.eu/about](http://www.wishful-project.eu/about). Acessado: 13-08-2016.
- [ProtoGENI ] ProtoGENI. Protogeni - geni. Website Project. Disponível em [groups.geni.net/geni/wiki/ProtoGENI](http://groups.geni.net/geni/wiki/ProtoGENI). Acessado: 21-12-2016.
- [Radatz et al. 1990] Radatz, J., Geraci, A., and Katki, F. (1990). Ieee standard glossary of software engineering terminology. *IEEE Std*, 610121990(121990):3.
- [Rakotoarivelo et al. 2010] Rakotoarivelo, T., Ott, M., Jourjon, G., and Seskar, I. (2010). Omf: a control and management framework for networking testbeds. *ACM SIGOPS Operating Systems Review*, 43(4):54–59.
- [Raychaudhuri et al. 2005] Raychaudhuri, D., Seskar, I., Ott, M., Ganu, S., Ramachandran, K., Kremo, H., Siracusa, R., Liu, H., and Singh, M. (2005). Overview of the orbit radio grid testbed for evaluation of next-generation wireless network protocols. In *Wireless Communications and Networking Conference, 2005 IEEE*, volume 3, pages 1664–1669. IEEE.
- [Rexford and Dovrolis 2010] Rexford, J. and Dovrolis, C. (2010). Future internet architecture: clean-slate versus evolutionary research. *Communications of the ACM*, 53(9):36–40.
- [Riggio et al. 2007] Riggio, R., Scalabrino, N., Miorandi, D., and Chlamtac, I. (2007). Janus: A framework for distributed management of wireless mesh networks. In *Testbeds and Research Infrastructure for the Development of Networks and Communities, 2007. TridentCom 2007. 3rd International Conference on*, pages 1–7. IEEE.
- [Royer and Toh 1999] Royer, E. M. and Toh, C.-K. (1999). A review of current routing protocols for ad hoc mobile wireless networks. *IEEE personal communications*, 6(2):46–55.
- [Santos et al. 2008] Santos, G. C., Santos, F. D., and Oliveira, J. (2008). Aprovisionamento automático de circuitos ópticos via plano de controle gmpls aplicado a uma rede óptica reconfigurável baseada em roadms. *XXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*.
- [Schedule ] Schedule, L. Ufg labora schedule. Portal Web. Disponível em [portal.ufg.fibre.org.br/LS-WEB/](http://portal.ufg.fibre.org.br/LS-WEB/). Acessado: 18-05-2016.

- [Sezer et al. 2013] Sezer, S., Scott-Hayward, S., Chouhan, P. K., Fraser, B., Lake, D., Finnegan, J., Viljoen, N., Miller, M., and Rao, N. (2013). Are we ready for sdn? implementation challenges for software-defined networks. *IEEE Communications Magazine*, 51(7):36–43.
- [Silvestre et al. 2012] Silvestre, B. O., Cardoso, K. V., and Corrêa, S. L. (2012). Controle e monitoramento de experimentos para a internet do futuro usando omf. In *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*.
- [Song et al. 2007] Song, H., Kim, B. C., Lee, J. Y., and Lee, H. S. (2007). Ieee 802.11-based wireless mesh network testbed. In *Mobile and Wireless Communications Summit, 2007. 16th IST*, pages 1–5. IEEE.
- [Spiral ] Spiral, G. Geni spiral 2 overview. Website Project. Disponível em [groups.geni.net/geni/attachment/wiki/SpiralTwo/GENIS2Ovrvw060310.pdf](http://groups.geni.net/geni/attachment/wiki/SpiralTwo/GENIS2Ovrvw060310.pdf). Acessado: 03-12-2016.
- [Tsarmopoulos et al. 2005] Tsarmopoulos, N., Kalavros, I., and Lalis, S. (2005). A low-cost and simple-to-deploy peer-to-peer wireless network based on open source linux routers. In *Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities, 2005. Tridentcom 2005. First International Conference on*, pages 92–97. IEEE.
- [UFPA ] UFPA, F. O. Omf ufpa testbed. Portal Web. Disponível em [portal.ufpa.fibre.org.br](http://portal.ufpa.fibre.org.br). Acessado: 17-05-2016.
- [Vasconcelos and Salles 2012] Vasconcelos, M. F. and Salles, R. M. (2012). Emprego de resiliência na gerência de redes de computadores. *Anais do XXX Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, pages 596–609.