

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
ENGENHARIA ELETRICA

VICTOR DE CAMPOS PENTEADO

**ANÁLISE DE ARQUITETURAS DE COMUNICAÇÃO DE SMART GRID**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO  
2016

VICTOR DE CAMPOS PENTEADO

## **ANÁLISE DE ARQUITETURAS DE COMUNICAÇÃO DE SMART GRID**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Fabio Renan Durand

CORNÉLIO PROCÓPIO  
2016



**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
**Campus Cornélio Procópio**  
**Departamento Acadêmico de Elétrica**  
**Curso de Engenharia Elétrica**



## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

**Victor de Campos Penteado**

### **Análise da arquiteturas de comunicação de smart grid**

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 10:20hs do dia 08/11/2016 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof(a). Dr(a). Fábio Renan Durand - Presidente (Orientador)

---

Prof(a). Dr(a). Leonardo Poltronieri Sampaio - (Membro)

---

Prof(a). Dr(a). Emerson Ravazzi Pires da Silva - (Membro)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Fabio Renan Durand, pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória.

Aos meus colegas de sala.

A Secretaria do Curso, pela cooperação.

Gostaria de deixar registrado também, o meu reconhecimento à minha família, pois acredito que sem o apoio deles seria muito difícil vencer esse desafio.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

## RESUMO

Este trabalho tem como proposta analisar arquiteturas de comunicação de dados de Smart Grid, através de uma abordagem que visa avaliar os custos envolvidos na implantação destas redes. O enfoque será então, através de uma análise os custos envolvidos com a implantação do Smart Grid (do inglês Capital Expenditure, Capex) e também com uma análise de custo de operação (do inglês Operational Expenditure, Opex). As arquiteturas utilizadas serão a rede óptica passiva (do inglês Passive Óptica Network, PON) e redes sem fio Fi-Wi (do inglês Fiber wireless). As arquiteturas foram analisadas separadamente e posteriormente comparadas entre si para avaliar a opção mais indicada.

**Palavras-chave:** redes inteligentes, Capex, Opex, PON, Fi-Wi.

## **ABSTRACT**

This paper aims to analyze smart grid architectures, through an approach that aims to evaluate the costs involved in deploying smart grid networks. This paper will focus in the analysis of the costs involved with the implementation of smart grids (Capex) and with an operating cost analysis (Opex). The architectures that will be used are network optical network (PON) and fiber wireless (Fi-Wi).The architectures were analyzed separately and then compared between each other to evaluate the best option.

**Keywords:** smart grid, capex, opex, PON, Fi-Wi

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – PROJEÇÃO DA MATRIZ ENERGÉTICA DO BRASIL.....	10
FIGURA 2 – CENÁRIO ENERGÉTICO PARA 2050.....	12
FIGURA 3 – SMART GRID, SOLUÇÕES SEM FIO DA AMPLA ÁREA E CENTROS DE DADOS DA INTERNET.....	18
FIGURA 4 – COMPARAÇÃO ENTRE REDE ÓPTICA ATIVA E PASSIVA.....	20
FIGURA 5 –ESQUEMA DAS ARQUITETURAS DE REDE UTILIZADAS NO TRABALHO.....	27
FIGURA 6 – NÚMERO DE OLT VARIANDO O NUMERO DE CARTÕES E PORTAS.....	28
FIGURA 7 – COMPARAÇÃO DE L VARIANDO O PARÂMETRO B E O NDF.....	29
FIGURA 8 – VARIAÇÃO DE PARÂMETROS PARA O CÁLCULO DO CUSTO DE INSTALAÇÃO.....	31
FIGURA 9 – RESUMO DOS CUSTOS DO CAPEX PARA A ARQUITETURA PON.....	32
FIGURA 10 – VARIAÇÕES DE PENALIDADES POR HORA.....	34
FIGURA 11 – VARIAÇÃO DO FCC PARA DIFERENTES VALORES DE PENALIDADES.....	34
FIGURA 12 – COMPARAÇÃO ENTRE CAPEX E OPEX EM RELAÇÃO AO TCO PARA O PON.....	35
FIGURA 13 – COMPARAÇÃO ENTRE CAPEX E OPEX EM RELAÇÃO AO TCO PARA FI-WI.....	38
FIGURA 14 – COMPARAÇÃO ENTRE AS ARQUITETURAS DE REDE EM RELAÇÃO AO CUSTO. ....	39
FIGURA 15 –COMPARAÇÃO ENTRE SITUAÇÃO ATUAL E FUTURO VARIANDO A POTÊNCIA NA UNIDADE TERMINAL E O NÚMERO DE NÓ REMOTO PARA PON.....	40
FIGURA 16 –COMPARAÇÃO ENTRE SITUAÇÃO ATUAL E FUTURO VARIANDO A POTÊNCIA E O NÚMERO DA UNIDADE TERMINAL PARA PON.....	41

FIGURA 17 –COMPARAÇÃO ENTRE SITUAÇÃO ATUAL E FUTURO  
VARIANDO A POTÊNCIA NA UNIDADE TERMINAL E O  
NÚMERO DE NÓ REMOTO PARA WI-FI..... 42

FIGURA 18–COMPARAÇÃO ENTRE SITUAÇÃO ATUAL E FUTURO  
VARIANDO A POTÊNCIA E O NÚMERO DA UNIDADE  
TERMINAL PARA FI-WI..... 43

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - COMPARAÇÃO ENTRE CAPACIDADE INSTALADA DE 2008 E 2016.....	11
TABELA 2 - DADOS DE CORNÉLIO PROCÓPIO – PR.....	27
TABELA 3 - CUSTOS DOS EQUIPAMENTOS DO CAPEX DAS REDES ÓPTICAS PASSIVAS.....	30
TABELA 4 - CUSTOS DE INFRAESTRUTURA DO CAPEX DAS REDES ÓPTICAS PASSIVAS.....	31
TABELA 5 - RESUMO DOS CUSTOS DO CAPEX PARA ARQUITETURA PON.....	33
TABELA 6 - VALORES NECESSÁRIOS PARA O CALCULO DO REPARO DE FALHAS E AS PENALIDADES.....	33
TABELA 7 – RESUMO DOS CUSTOS DO OPEX PARA A ARQUITETURA PON.....	35
TABELA 8 - RESUMO DOS CUSTOS PARA ARQUITETURA PON.....	36
TABELA 9 - CUSTO DE EQUIPAMENTOS DO FI WI.....	36
TABELA 10 - RESUMO DOS CUSTOS DO CAPEX PARA ARQUITETURA FI-WI.....	37
TABELA 11 - RESUMO DOS CUSTOS PARA ARQUITETURA FI-WI.....	38
TABELA 12 - RESUMO DOS CUSTOS DAS ARQUITETURAS.....	39

## LISTA DE SIGLAS

AIR	Análise de Impacto Regulatório
ANEEL	Agencia Nacional de Energia Elétrica
AMI	Infraestrutura de medição avançada
BS	Estação base do inglês Base Station
CAPEX	Análise de custos de implantação do inglês Capital Expenditure
FI- WI	Rede sem fio de fibra do inglês Fiber wireless
OLT	Unidade óptica terminal, do inglês Optic Line Terminal
ONU	Unidade de rede óptica do inglês Optic Network Unit.
OPEX	Análise de custo de operação do inglês Operational Expenditure
PON	Rede óptica passiva do inglês Passive Óptica Network
TCO	Custo total de propriedade do inglês Total Cost Ownership
SS	Estação do consumidor do inglês subscriber station
WIMAX	Interoperabilidade Mundial para Acesso de Micro-Ondas do inglês Worldwide Interoperability for Microwave Access

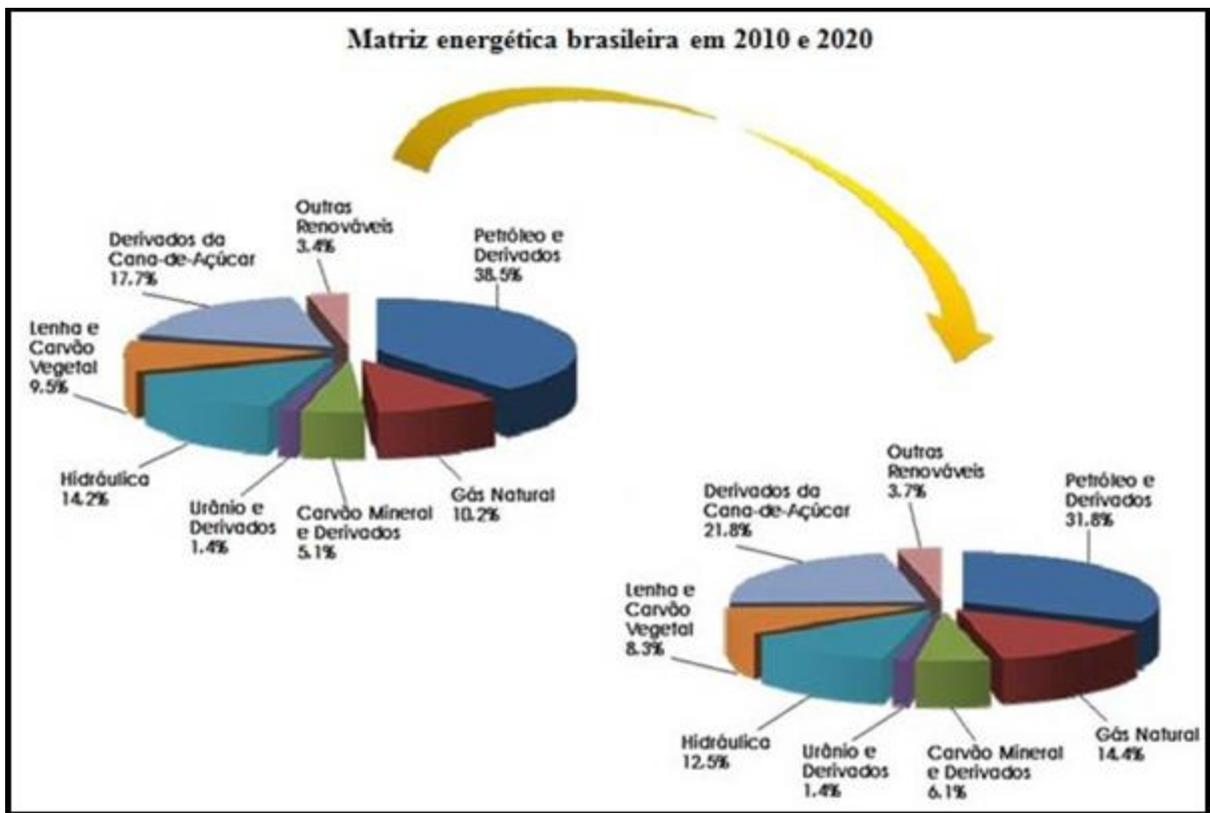
## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>10</b>
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	10
1.2 MOTIVAÇÕES DO TRABALHO.....	13
1.3 OBJETIVOS.....	14
1.3.1 Objetivo geral.....	14
1.3.2 Objetivos específicos.....	15
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	15
<b>2 SMART GRID.....</b>	<b>16</b>
<b>3 ARQUITETURAS DE REDE.....</b>	<b>19</b>
3.1 REDES ÓPTICAS PASSIVAS (PON).....	19
3.2 REDES SEM FIO.....	21
<b>4 ANÁLISE DE DESEMPENHO .....</b>	<b>23</b>
4.1 ANÁLISE DE CUSTO DE IMPLANTAÇÃO (CAPEX).....	23
4.1.1 Custo do Equipamento.....	23
4.1.2 Custo de Infraestrutura.....	23
4.1.3 Custo de instalação.....	24
4.1.4 Outros custos.....	24
4.2 ANÁLISE DE CUSTO DE OPERAÇÃO (OPEX).....	24
4.2.1 Custo de Operação, Administração e Manutenção (OAM).....	24
4.2.2 Custos contínuos.....	26
<b>5 RESULTADOS.....</b>	<b>27</b>
5.1 ANÁLISE DE CUSTO USANDO REDES ÓPTICAS PASSIVAS.....	28
5.2 ANÁLISE DE CUSTO USANDO REDES SEM FIO FI-WI.....	36
5.3 COMPARAÇÃO ENTRE AS ARQUITETURAS.....	38
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>44</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>46</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A matriz energética brasileira vem se modificando ao longo do tempo. De acordo com a empresa de pesquisa energética (EPE) em um estudo de 2011, aponta que num futuro próximo haverá uma redução do uso do petróleo e aumento dos derivados da cana de açúcar. Os resultados gerais do estudo estão apresentados na Figura 1.



**Figura 1: Projeção da matriz energética do Brasil**

Fonte: Empresa de pesquisa energética, 2011.

Na Figura 1, pode-se notar que as fontes energéticas ditas renováveis como os derivados da cana de açúcar espera-se um aumento significativo na composição da matriz energética até 2020. Além disso, na figura aparece a expectativa de aumento também outras renováveis como a solar e eólica.

Quando se trata de distribuição de energia elétrica, o principal problema são as perdas na transmissão e distribuição de energia elétrica que podem ocorrer,

ocasionando menor eficiência, cerca de 20% de toda energia elétrica gerada é perdida. Isto mostra que o sistema elétrico brasileiro pode ser aperfeiçoado a fim de aperfeiçoar o uso da energia elétrica diminuindo as perdas. Neste cenário o Smart Grid possui maior eficiência energética e assim, podem ser utilizadas para o melhor aproveitamento dessas energias (EPE,2013).

Mais recentemente as fontes de energia renováveis estão crescendo cada vez mais. Se compararmos a capacidade instalada em MW de 2008 a 2016 pode observar um aumento significativo como se pode ver na Tabela 1. Neste mesmo ponto, o instituto Greenpeace, em 2010 fez uma projeção de como será a matriz energética do Brasil em 2050, onde mostra o crescimento significativo das energias renováveis em ascensão como principalmente a solar e eólica. Esse cenário é apresentado na Figura 2. Considerando a Tabela 1 é esperável que este cenário se concretize.

Tabela 1- Comparação entre capacidade instalada de 2008 e 2016.

Fonte	Capacidade Instalada	Capacidade Instalada	Variação 2016/2008 (%)
	MW (2008)	MW (2016)	
Hidroelétrica	77.091	92.100	19
Termoelétrica	17.352	41.595	139
Eólica	247	10.000	2949
Solar	-	27	-
<b>Total</b>	<b>94.690</b>	<b>143.722</b>	<b>52</b>

Fonte: Adaptado de Ministério de Minas e Energia; Abeólica; Cogen, 2016

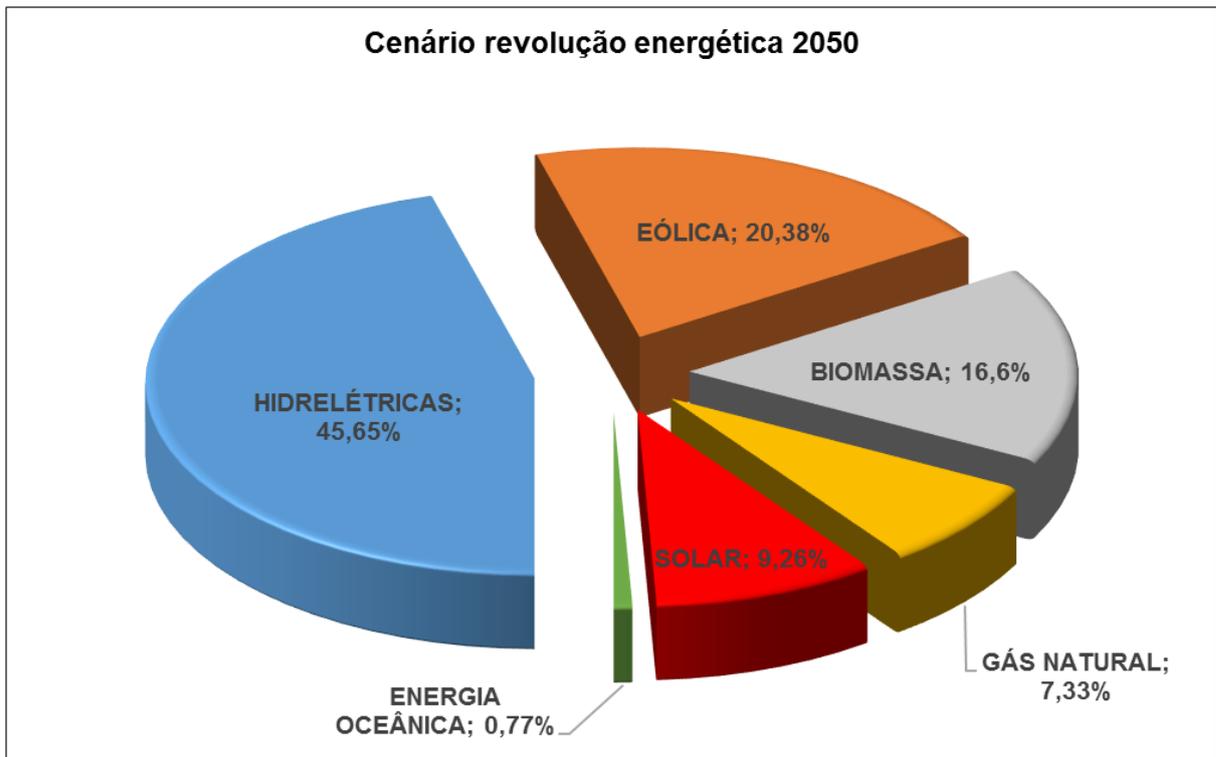


Figura 2 Cenário energético para 2050  
 Fonte: Greenpeace, 2010

Na Figura 2 está apresentando a expectativa para o futuro da geração de energia elétrica o Brasil, ainda será em sua maioria por hidroelétricas, porém com uma maior variação, tendo a eólica, biomassa em destaque, além da solar e também a energia oceânica.

Considerando tudo que foi apresentado, com o crescimento das energias como solar e eólica, se faz necessário uma melhora nas redes de geração e distribuição, e neste aspecto que o smart grid ganha espaço. Fontes de energia como a energia eólica e a energia solar são altamente variáveis, e por isso há necessidade de sistemas de controle mais sofisticados, para facilitar a interconexão com a rede esse processo tem que ser controlável. A tendência atual aponta para uma grande mudança a partir da topologia da rede centralizada para um que é distribuída, com a energia sendo ambos gerada e consumida próxima ao local de consumo (Smart Grid, 2003).

Neste aspecto, as redes inteligentes (*smart grid*) que consiste de uma junção de técnicas de eletrônica e de telecomunicações voltadas para a automação e melhorias dos serviços de energia elétrica, têm ganhado espaço em função de

seus aspectos técnicos e características como qualidade, segurança, flexibilidade e também por ser considerada sustentável. O *smart grid* desempenha um papel importante, principalmente na área de distribuição da energia elétrica possibilitando uma interação maior com os consumidores, pois se torna mais acessível às informações da rede, isso também possibilita uma maior eficiência energética. Esta tecnologia possibilita minimizar problemas vivenciados no Brasil, como furtos de energia e erros de medição (CPFL, 2015).

O maior desafio, atualmente, para a implantação desse Smart Grid é o seu custo de implementação (CAPEX) e o custo de operação (OPEX). Dentro do custo de implementação, está contido principalmente, o custo dos equipamentos, custo de infraestrutura e o custo de instalação. Já no o custo de operação (OPEX), esta dividida em custo de operação, administração e manutenção (OAM) e outros custos contínuos.

Com os avanços tecnológicos, o *Smart Grid* poderá ser amplamente utilizado num futuro próximo no Brasil, tendo em vista que poderá usar tecnologias consideradas renováveis. No entanto, é necessário analisar os custos dessa tecnologia para que contribua de forma eficiente para facilitar a vida dos consumidores e tornar o sistema mais seguro, tanto quanto a roubos de energia como menores interrupções devido a falhas.

## 1.2 MOTIVAÇÕES DO TRABALHO

O desenvolvimento e a implantação do *Smart Grid* no Brasil ainda está restrita a projetos de inovação tecnológicas e de pesquisa e desenvolvimento (P&D). Algumas distribuidoras brasileiras já conduziram projetos de testes de cidades inteligentes para simular as condições dessa tecnologia. Pode-se citar como exemplo, a iniciativa realizada pela distribuidora Endesa, no Rio, que desde 2011 tem na cidade de Búzios implementado um sistema mais eficiente e sustentável na distribuição da energia (Ampla, 2015).

Em diversos órgãos de âmbito nacional, como o Congresso Nacional Brasileiro e no Senado, há projetos relacionamos a possibilidade de implementação de redes inteligentes. Nesse mesmo aspecto, a ANEEL (Agência Nacional de

Energia Elétrica) também expediu diversos regulamentos relacionados a redes inteligentes (LAMIN, 2013).

A maioria dos estudos anteriores relacionados a comunicações de redes inteligentes abordam os requisitos tecnológicos e os desafios para garantir desempenho e confiabilidade. O principal desafio atual é mais sobre questões econômicas do que tecnológicas, considerando a evolução das tecnologias relacionadas com *Smart Grid*. Sendo assim é necessário analisar o custo para que determinada infraestrutura de comunicações *Smart Grid* seja implantada, assim como analisar se há uma infraestrutura de comunicação mais eficiente que as demais. Neste sentido, é interessante investigar como implementar uma determinada infraestrutura, a fim de reduzir o seu custo total de propriedade (TCO do inglês Total Cost Ownership), que nada mais é que a junção de todos os custos envolvidos tanto na implantação (Capex) como na operação (Opex) do Smart Grid, para se obter um valor global do investimento (CHARNI; MAIER, 2014).

Tendo em vista essas iniciativas, ainda não há informações satisfatórias e precisas a respeito de avaliação de custos de implantação dessa tecnologia, assim como o custo de operação desses sistemas. Assim se faz necessário analisar a fundo essas características para tornar o custo do Smart Grid mais viáveis num futuro próximo.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é realizar uma análise do custo de implantação e de operação do *Smart Grid* considerando duas arquiteturas de rede de comunicação, a rede óptica passiva (PON) e redes híbridas de fibra óptica e sem fio (FI- WI), bem como realizar uma comparação entres as arquiteturas estudadas.

### 1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos podem ser divididos da seguinte forma:

- Estudo de arquiteturas de comunicação do *Smart Grid*, sendo elas as redes óptica passiva (PON) e redes híbridas de fibra óptica e sem fio (FI - WI);
- Análise de modelos matemáticos já existentes para levantamento do custo de implantação e operação das duas arquiteturas de comunicação do *Smart Grid*;
- Comparação dos resultados das arquiteturas de comunicação adotadas nesse trabalho;

## 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Após esta introdução, o Capítulo 2 trata os aspectos principais da teoria de Smart Grid. Na sequência, no Capítulo 3 serão apresentadas as arquiteturas de comunicação usadas nesse trabalho. Já o Capítulo 4 apresenta a análise de desempenho através de equacionamento matemático dos custos envolvidos no Smart Grid. Nos Capítulos 5 e 6 estão os resultados e as considerações finais, respectivamente.

## 2 SMART GRID

O tema de *Smart Grid* tem se tornado popular, no entanto é necessário ter uma abordagem profunda a respeito desse tema, ou seja, uma forma de entender de forma clara o que é uma rede inteligente e para o que é utilizada atualmente. Primeiramente, "a rede", refere-se à rede elétrica, uma rede de linhas de transmissão, subestações, transformadores e também outros dispositivos que entregam eletricidade da geração para as casas, empresas e indústrias

Embora a rede elétrica seja considerada um dos maiores inventos da engenharia, cada vez mais esta chegando ao limite de sua capacidade. Para avançar, é necessário um novo tipo de rede elétrica, que seja mais precisa e eficiente. Ainda, que seja capaz de lidar com a grande quantidade de equipamentos que são dependentes da tecnologia digital e essa tecnologia moderna pode automatizar e gerenciar a complexa demanda de eletricidade no século 21 (RIVERA,2013).

A tecnologia digital que permite a comunicação de duas vias entre a concessionária e os seus clientes, e a detecção ao longo das linhas de transmissão é o que faz a rede ser inteligente. Como a Internet, o *Smart Grid* é composto de controles, computadores, automação, novas tecnologias e equipamentos que trabalham em conjunto, mas, neste caso, estas tecnologias passarão a trabalhar com a rede elétrica para responder digitalmente para a rápida mudança de demanda elétrica (CPFL,2015).

O sistema *Smart Grid* visa melhorar a geração, transmissão, distribuição e consumo por meio de contribuição e colaboração de diferentes acionistas como o setor de serviço público, prestadores de serviços e consumidores. Em todos os sistemas e aplicações que seguem a arquitetura procura-resposta, como a infraestrutura de medição avançada (*Advanced Metering Infrastructure, AMI*) usado em um sistema de rede inteligente. Neste caso, os medidores inteligentes são usados para coletar periodicamente os dados de medição ao vivo de usuários finais, por exemplo, redes de área local. Esta informação é então transmitida para o utilitário através AMI para ser utilizado para fins de faturamento. Além disso, esta informação é utilizada pelo prestador do serviço como uma referência para planejar de forma eficiente prestação de serviços (NICANFAR; TALEBIFARD; ALASAAD, 2013).

O *Smart Grid* representa uma oportunidade sem precedentes para mover a indústria de energia em uma nova era de confiabilidade, disponibilidade e eficiência que contribuirá para a melhora da economia. Durante o período de transição, será fundamental para realizar testes, melhorias tecnológicas, a educação do consumidor, desenvolvimento de normas e regulamentos, e compartilhamento de informações entre os projetos para garantir que os benefícios provenientes das redes inteligentes se tornem uma realidade. Os benefícios associados às redes inteligentes incluem: transmissão mais eficiente da eletricidade, restabelecimento mais rápido de energia elétrica após distúrbios, redução de gerenciamento de operações e custos de serviços públicos, para assim reduzir os custos de energia para os consumidores, redução da demanda de pico, o que também ajudará as tarifas de eletricidade mais baixa, o reforço da integração dos sistemas de energia renovável em grande escala, uma melhor integração dos sistemas de geração de energia do cliente-proprietário, incluindo sistemas de energia renovável e por fim uma maior segurança (PENG; SONG; ZIXUE, 2013 ).

Atualmente, uma interrupção de energia elétrica, tais como um blecaute pode ter um efeito dominó, uma série de falhas que podem afetar bancos, comunicações, tráfego e segurança. Uma rede mais inteligente irá adicionar resistência ao sistema de energia elétrica e torná-lo mais bem preparado para enfrentar situações de emergência, tais como, por exemplo, tempestades severas. Devido à sua capacidade interativa de mão dupla, as redes inteligentes vão permitir o reencaminhamento automático quando o equipamento falhar ou interrupções ocorrer. Isso irá minimizar as interrupções e minimizar os efeitos quando eles acontecerem. Quando ocorre uma falha de energia, tecnologias das redes inteligentes irão detectar e isolar as falhas, contendo-as antes que se tornem apagões em grande escala.

O *Smart Grid* darão as informações e ferramentas que o usuário precisa para fazer escolhas sobre o seu uso de energia. Atualmente é comum gerenciar as atividades tais como serviços bancários em computadores pessoais, o mesmo é imaginar o gerenciamento da eletricidade de uma forma similar. Uma rede mais inteligente permitirá um nível sem precedentes de participação dos consumidores.

"Medidores inteligentes" e outros mecanismos permitiram que se visse a quantidade de eletricidade usada, quando for usá-la, e seu custo. Combinado com

preços em tempo real, isso permitirá uma economia de dinheiro e usando menos energia quando a eletricidade estiver mais cara. Embora os potenciais benefícios das redes inteligentes geralmente são discutidos em termos de economia, a segurança nacional, e metas de energia renovável, das redes inteligentes tem o potencial para ajudar a poupar dinheiro, ajudando a gerenciar o uso de eletricidade e escolher os melhores momentos para comprar eletricidade (US DEPARTMENT OF ENERGY, 2015).

O *Smart Grid* será composto de milhões de partes, como computadores, linhas de energia e novas tecnologias e equipamentos. Vai levar algum tempo para todas as tecnologias serem aperfeiçoados, os equipamentos instalados e sistemas testados antes de entrar totalmente em utilização. Um exemplo de aplicação de redes inteligentes pode ser vista na Figura 3, onde é apresentada a implementação de comunicações sem fios e centros de dados ligados a rede inteligente, incluindo o fluxo de energia na rede. A eletricidade é transportada para os consumidores ao longo do sistema de transmissão e distribuição, além disso, o consumidor pode tornar-se geradores de energia e vender energia a rede de acordo para as novas práticas de geração distribuída de *Smart Grid*. Na figura, os dados recolhidos a partir dos sensores e medidores são alimentados na unidade sede e armazenados em centros de dados em nuvens( EROL-KANTARCI; MOUFTAH 2015).

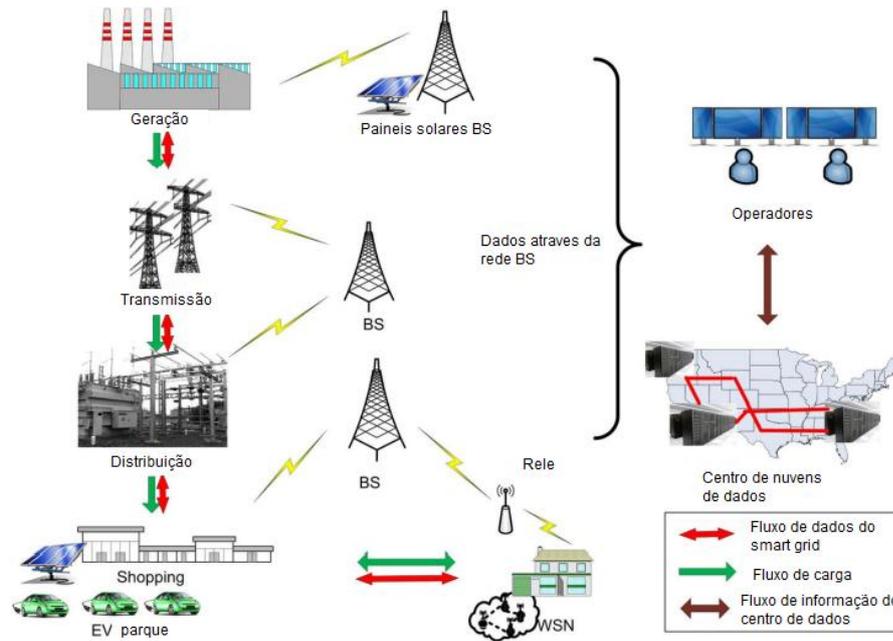


Figura 3: Smart grid, soluções sem fio da ampla área e centros de dados da Internet. Adaptado de Erol-Kantarci,2015.

### 3 ARQUITETURAS DE REDE

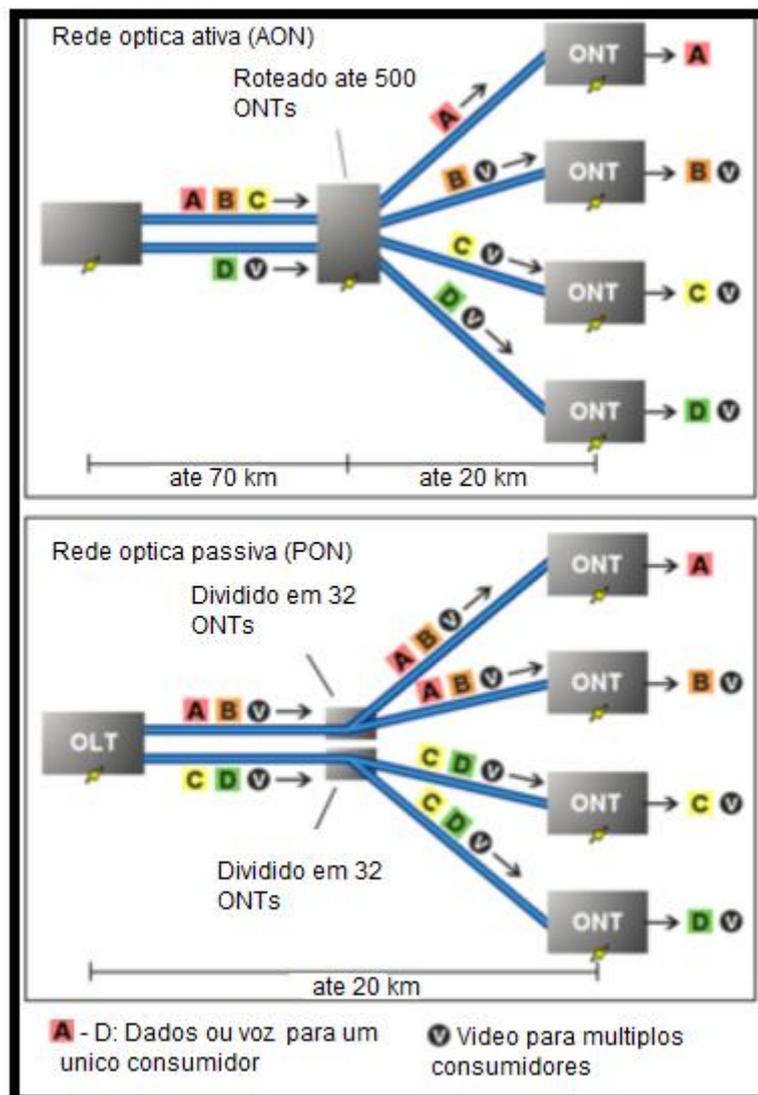
#### 3.1 REDES ÓPTICAS PASSIVAS (PON)

Uma rede óptica passiva (PON) é uma rede de telecomunicações que utiliza fibras ópticas na configuração de ponto-a-multiponto para os pontos finais em que os divisores ópticos, sem alimentação são usados para permitir que uma única fibra óptica sirva múltiplos pontos finais. A PON consiste de um terminal de linha óptica (*Optical Line Terminal, OLT*) na sede central do provedor de serviço e um número de unidades ópticas de rede (*Optical Network Unit, ONU*) ou terminais de rede óptica (*Optical Network Terminal, ONT*), perto dos usuários finais. A PON reduz a quantidade de fibra e equipamentos da sede central necessária em comparação com arquiteturas de ponto-a-ponto. Uma rede óptica passiva é uma forma de rede de acesso de fibra óptica com maior eficiência de CAPEX e OPEX comparada com outras redes ópticas (TELOS, 2015).

A PON emprega a multiplexação por divisão de comprimento de onda (*Wavelength Division Multiplexing, WDM*), usando um comprimento de onda para o tráfego entre OLT em direção das ONUs (*downstream*) e outro para tráfego das

ONUs em direção a OLT (*upstream*) sobre uma fibra monomodo (ITU-T G.652). As variações de tecnologia das PONs como BPON, EPON, GEAPON e GPON têm o mesmo padrão de utilização de comprimentos de onda, empregando o comprimento de onda de 1490 nm para o tráfego de *downstream* e comprimento de onda de 1310 nm para o tráfego de *upstream*. Também, a faixa de comprimentos de onda em 1550 nm são reservadas para os serviços de sobreposição opcionais, tipicamente RF vídeo, que é analógico.

Na Figura 4 pode-se observar uma comparação entre a tecnologia PON e rede ativa, nela também se podem notar as vantagens de se usar a PON, pois ela é mais versátil.



**Figura 4: Comparação entre rede óptica ativa e passiva**

Fonte: Adaptado de FANG et.al, 2015

Na comparação das duas redes apresentadas na Figura 4, pode-se notar que na PON é dividida em dois a ONT e com isso tem-se uma possibilidade maior de combinações para o usuário final, no entanto a desvantagem é que a distancia é reduzida (FANG et.al, 2015).

Até agora foram apresentado às características gerais das redes ópticas passivas, a seguir será apresentado o dimensionamento dessas redes.

Inicialmente é necessário o calculo do numero de OLT para atender a demanda do projeto, para isso é preciso calcular o numero de divisores (splitters) necessários. O numero de divisores ( $N_{spliter}$ ) é calculado pela divisão do numero de domicílios pela taxa de divisão. Posteriormente pode-se calcular o numero de OLT. Apresentado a seguir (Davim, Ziaie, Pinto, 2011).

$$N_{olt} = \frac{N_{spliter}}{N_{card} * N_{port}}, \quad (1)$$

Onde  $N_{card}$  e  $N_{port}$  são o numero de *cards* e portas, respectivamente.

Outro fator importante é o calculo da distancia  $L$  que a fibra óptica ira percorrer (Davim, Ziaie, Pinto, 2011).

$$L(\text{Km}) = (\beta * d) + N_{df} * (1 - \beta) * d, \quad (2)$$

Onde  $\beta$  é um parâmetro que representa a posição do divisor,  $N_{df}$  representa o número de fibras de distribuição e  $d$  é a distância média entre o OLT e as ONUs, que pode ser estimado por:.

$$d = \frac{2 * R}{3}, \quad (3)$$

Onde  $R$  é o raio médio de uma área de cobertura de uma OLT.

### 3.2 REDES SEM FIO

As topologias de rede de acesso sem fio podem ser divididos em três categorias principais: P2P, P2MP e malha de redes. As redes P2P são compostas por um ou mais ligações fixas empregando antenas direcionais em ambas as extremidades do link. Uma rede P2MP consiste de um número de estações de base (*Base Station*, BS), cada uma ligada a vários usuários. Em uma topologia de malha, os terminais de usuário final agem também como roteadores (CHARNI; MAIER, 2014).

Atualmente, as redes locais sem fio (Wireless Local Area Network, WLAN) são a tecnologia sem fio mais utilizada. Esta tecnologia consiste de um ponto de acesso e estações sem fio conectados a ele. Outra rede sem fio bem conhecido é a tecnologia WiMAX que é baseada no protocolo IEEE 802.16 para rede de área metropolitana sem fio (WMAN) padrão. O WiMAX geralmente tem uma topologia P2MP, onde um BS serve múltiplos postos assinantes (SSS). A rede de acesso de rádio móvel consiste de um controlador de rede de rádio (RNC) controlando vários BSs. A unidade terminal de acesso ao usuário é denominado estações consumidores.

O dimensionamento das redes de acesso sem fio inclui duas fases: dimensionamento de capacidade e cobertura. Na primeira fase, a meta é satisfazer as necessidades de todos os clientes, enquanto que na segunda fase, o objetivo é cobrir a maior área possível com a menor quantidade de material.

A Capacidade Dimensionamento tem como objetivo estimar o número necessário de BSs e setores para satisfazer as demandas de todos os assinantes na área. Inicialmente calcula-se o número máximo de assinantes a serem ligados a um único setor  $N$ , que sera apresentado a seguir (Smura, 2004):

$$N = \frac{T_{sec} * C}{T_{med}}, \quad (4)$$

Onde  $T_{sec}$ ,  $T_{med}$  e  $C$  são as capacidades de tráfego de um setor, media de capacidade por usuário, e o fator de concentração, respectivamente. Assim o numero de capacidade baseado no numero de BSs pode ser expressa como se segue (Smura, 2004):

$$N_{bs} = \frac{N_h}{(N * N_s)}, \quad (5)$$

Onde  $N_h$  é o numero de usuários e  $N_s$  denota o numero de setores por BS.

A Capacidade de Cobertura tem como objetivo assegurar que a capacidade de cada BS seja suficiente para atender todos os consumidores de uma determinada area de cobertura. Assim outra maneira de se calcular o numero de BSs pode ser obtida conforme (CHARNI; MAIER, 2014):

$$N_{bs} = \frac{1}{(2 * rangeBS)} * \sqrt{2} * L, \quad (6)$$

Onde  $rangeBS$  é a distancia em quilômetros (Km) que o BS pode alcançar, por exemplo para áreas urbanas para consumidores com antenas o valor do  $rangeBS$  será de 1,5 Km (Krizanovic, Zagar, Grgic, 2011).

## 4 ANÁLISE DE DESEMPENHO

Nesta seção serão apresentadas diferentes análises que visam à viabilidade da implantação de redes inteligentes. Primeiramente, será apresentada uma análise de custo de implantação (Capex) e em seguida uma análise de custo de operação (Opex).

### 4.1 ANÁLISE DE CUSTO DE IMPLANTAÇÃO (CAPEX)

Dentre as análises dos custos de implementação serão divididas em quatro tópicos, o custo dos equipamentos, custo de infraestrutura, custo de instalação e outros custos.

#### 4.1.1 Custo do equipamento

O custo do equipamento ( $Cost_{equip}$ ) é dado por:

$$Cost_{equip} = \sum_c dc . pc , \quad (7)$$

Onde  $c$  é o tipo de equipamento,  $dc$  e  $pc$  denotam a quantidade necessária deste tipo de equipamento e seu preço unitário, respectivamente (CHARNI; MAIER, 2014).

#### 4.1.2 Custo de Infraestrutura

Este componente do CAPEX inclui os custos de cabo ( $Cost_{ca}$ ), bem como obras de construção civil ( $Cost_{cw}$ ). Assim, pode-se calcular o custo de infraestrutura  $Cost_{Infra}$ , demonstrado a seguir (Davim,Ziaie,Pinto, 2011).

$$Cost_{Infra} = L(\text{Km}). (Cost_{ca} + Cost_{cw}) . \quad (8)$$

#### 4.1.3 Custo de instalação

É calculado multiplicando o tempo de instalação e salário técnico por hora ( $TS$ ). Por conseguinte, o custo de instalação  $Cost_{Insta}$  é apresentado a seguir (Chen et.al, 2010).

$$Cost_{Insta} = \sum_i (ITi + 2 . Ti) . TS . NTi, \quad (9)$$

Onde,  $ITi$ ,  $Ti$  e  $NTi$  indicam o tempo de instalação, o tempo de viagem a partir da central para o componente defeituoso, e o número de técnicos necessários, respectivamente.

#### 4.1.4 Outros custos

Os principais componentes além dos já apresentados é o custo relacionado a taxas de licenciamento, que normalmente depende da largura de banda do equipamento utilizado.

### 4.2 ANÁLISES DE CUSTO DE OPERAÇÃO (OPEX)

Dentre as análises dos custos de operação serão divididas em dois tópicos, o custo de Operação, Administração e Manutenção (OAM) e custo contínuo.

#### 4.2.1 Custo de Operação, Administração e Manutenção (OAM):

Recentes trabalhos preveem que os custos de OAM de uma rede de acesso sem fio deva ser 20% do CAPEX (Smura, 2004). No entanto, para redes ópticas de acesso os custos OAM que foram analisados são aqueles relacionados às falhas na rede. Ou seja, os custos de reparação de falha ( $FR$ ), e penalidades ( $P$ ), associadas com interrupção do serviço.  $FR$  depende do tempo de vida da rede, o número total de componentes de rede, e salário por hora do técnico ( $TS$ ). Para cada componente, também depende do número esperado de falhas por tempo ( $FIT$ ), número de pessoas necessárias para reparar uma falha ( $NTRf$ ), e tempo médio para reparo ( $MTTRf$ ). Assim,  $FR$ , é apresentado a seguir (Machuca Chen, Wosinka, 2012).

$$FR = TS \cdot \sum_f (MTTRf \cdot NTRf), \quad (10)$$

Por outro lado, a outra parcela desse custo pode ser expressa como o produto da conexão em tempo de interrupção e da unidade de pena de cada especial conexão de acordo com o acordo de nível de serviço dado ( $SLA$ ). Por conseguinte,  $P$  pode ser calculado por:

$$P = Pu \cdot \sum_f (MTTRf \cdot ICf), \quad (11)$$

Onde  $Pu$  e  $ICf$  denotam a pena para uma hora de interrupção de conexão e o número de conexões interrompidas associado com falha ( $f$ ), respectivamente. Para redes de acesso ópticas, o fator mais importante que afeta falhas de sistema são os cortes de fibra. Assim, é importante levar em conta um modelo probabilístico apropriado (Domingues, Rocha, Andre, 2011).

A distribuição de *Weibull* é amplamente utilizada na engenharia de confiabilidade porque ele fornece análises de falha precisas e risco de previsões com o mínimo de erros. O corte probabilidade de fibra,  $Pf(s,l)$  é expresso da maneira seguinte:

$$Pf(s,l) = 1 - e^{-\left(\frac{l}{l_0}\right) \cdot \left(\frac{s}{s_0}\right)^m}, \quad (12)$$

Onde,  $l$ ,  $l_0$ ,  $s$  e  $s_0$  denotam o comprimento da fibra, fator de normalização, stress, escala *Weibull*, e inclinação, respectivamente. O índice de *Weibull*,  $m$ , é uma medida da força de dispersão e indica como a taxa de falha desenvolve ao longo do tempo. A escala *Weibull*,  $s_0$ , dá indicações sobre os modos de falha predominantes.

Apesar da baixa probabilidade de falhas de fibra, o risco associado pode ser significativo, devido ao alto custo de reparação fibras e penalidades. Custos de cortes de fibra relacionados ( $FCC$ ) são dados por:

$$FCC = FR + P. \quad (13)$$

#### 4.2.2 Custos contínuos

Este componente do OPEX inclui locação de equipamentos e locais de antenas. O custo de alugar uma localização depende da sua altura, tamanho, e disponibilidade. Um dos principais custos contínuos de uma rede de acesso com ou sem fio é o consumo de energia. O consumo de energia por usuário pode ser calculado como segue:

$$P_{user} = \frac{\alpha \cdot P_{tu}}{N_{tu}} + \frac{\beta \cdot P_{rn}}{N_{rn}} + P_{cpe}, \quad (14)$$

Onde  $(\alpha, \beta)$  é normalmente definido como (2,1), pois dependem do tipo de equipamento, no caso a unidade terminal e o nó remoto, respectivamente. Estes dois fatores representam uma sobrecarga adicional tais como fontes de alimentação externas, perdas na distribuição de energia elétrica e os requisitos de resfriamento para uma unidade terminal ( $TU$ ) (por exemplo, OLT) e  $RN$  (por exemplo, BS), respectivamente. Em contraste, um efeito citopatogénico (por exemplo, a ONU, SS) é resfriado naturalmente pela ambiente circundante.  $P_{tu}$ ,  $P_{rn}$ , e  $P_{cpe}$  denotam a energia consumida pela  $TU$ ,  $RN$ , e  $CPE$ , respectivamente.  $E$  denotam o número de assinantes que compartilham um  $RN$  e  $TU$ , respectivamente (Baliga et.al, 2011).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção será apresentado um estudo de caso com intuito de investigar o custo das tecnologias apresentadas, bem como uma comparação entre ambas. Neste sentido, a cidade escolhida para o estudo de caso é Cornélio Procópio - PR, sendo alguns parâmetros necessários apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Dados de Cornélio Procópio – PR

<b>Área</b>	<b>635.1 km<sup>2</sup></b>
<b>População</b>	48.487 hab
<b>Densidade</b>	73.89 hab/km <sup>2</sup>
<b>Numero de domicílios</b>	15146

Fonte: IBGE 2010

A Figura 5 mostra um esquema das arquiteturas escolhidas para esse trabalho, sendo representada a esquerda (a) a arquitetura óptica passiva e a direita (b) a rede sem fio Fi-Wi. O primeiro passo para se analisar os custos de implantação e operação do Smart Grid é o dimensionamento dessas arquiteturas de rede, posteriormente a análise dos custos.

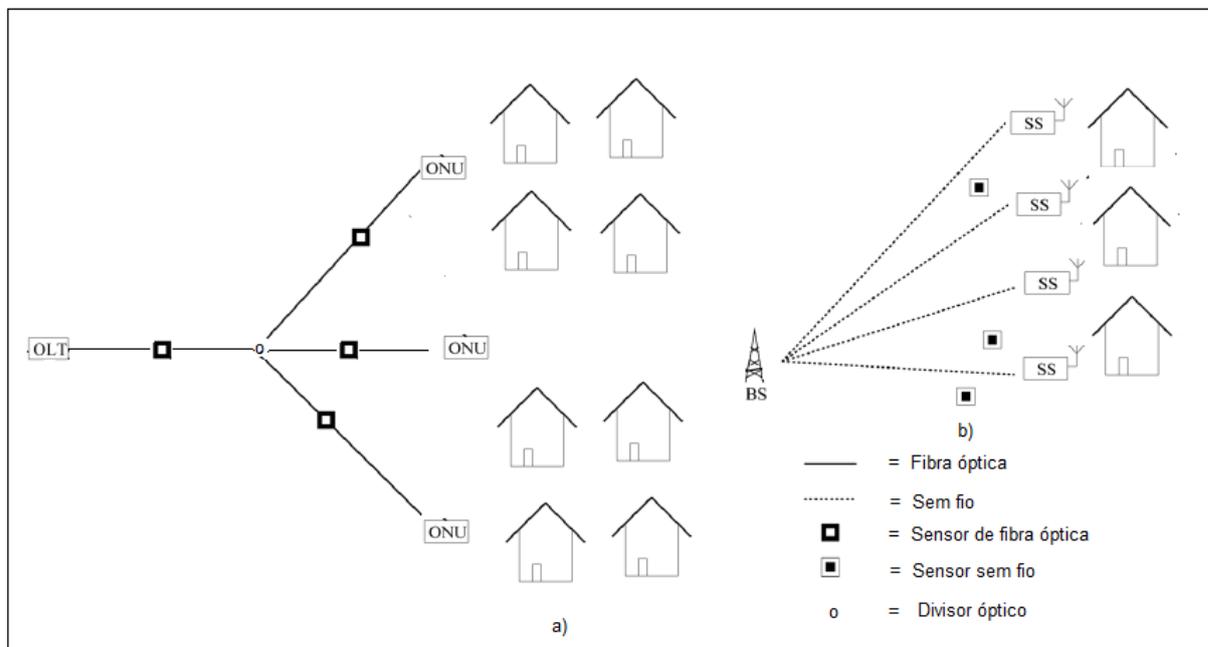
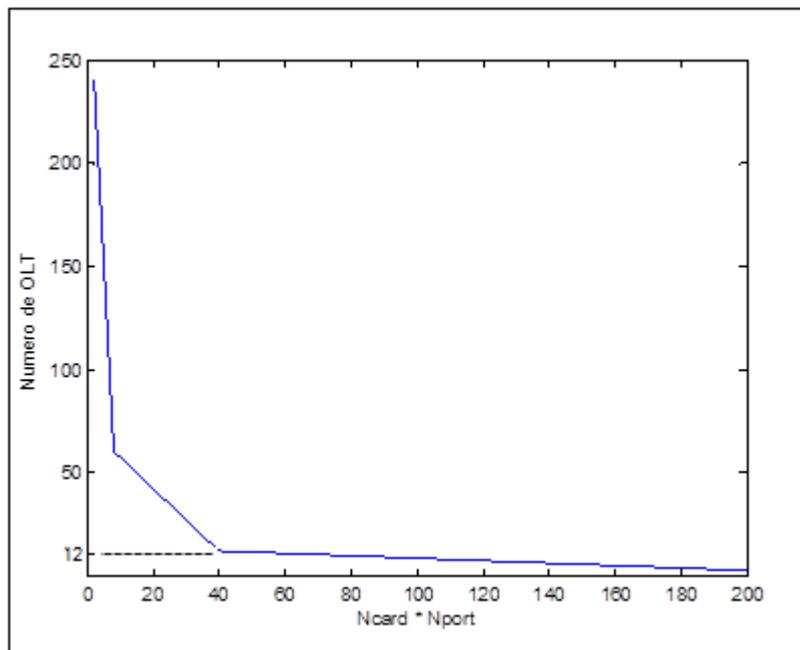


Figura 5: Esquema das arquiteturas de rede utilizadas no trabalho  
Fonte: Adaptado de MAIER; LEVESQUE; IVANESCU, 2012.

Essa seção será dividida em três partes, os custos envolvidos na arquitetura de rede PON, posteriormente na arquitetura sem fio Fi-Wi e por fim uma comparação entre elas.

### 5.1 ANÁLISE DE CUSTO USANDO REDES ÓPTICAS PASSIVAS

Inicialmente é necessário o cálculo do número de OLTs para atender a demanda do projeto, através da equação (1) foi gerada a Figura 6, onde foram variados os números de cartões e portas para se estabelecer a melhor configuração possível.

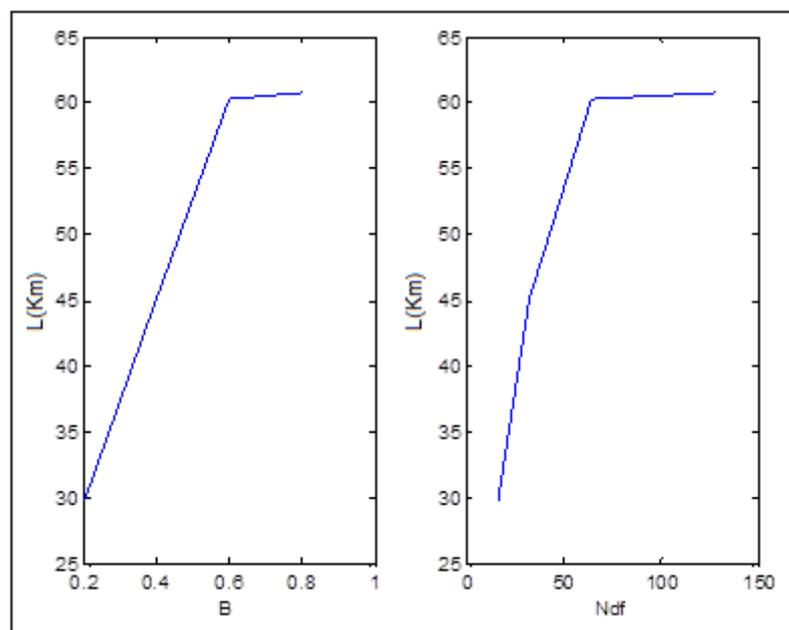


**Figura 6: Número de OLT variando o numero de cartões e portas**  
**Fonte: Autoria própria.**

Como se pode notar na Figura 6 quanto maior for o produto entre  $N_{card}$  e  $N_{port}$  menor será o número de OLT. Levando em conta essa característica foi escolhido cartões ópticos comerciais do modelo FK-OLT-20/2 do fabricante Furukawa, assim foi estabelecido que serão necessárias 10 cartões com 4 portas cada um, obtendo-se assim o valor de 12 OLTs.

Outro fator importante é o cálculo da distancia  $L(Km)$  que a fibra óptica vai percorrer. Cada OLT tem em média cobertura de  $37,5 \text{ km}^2$ , sendo um raio  $R$  de 3,45 km. O Valor de  $L$  pode ser calculada pela equação (2).

Na Figura 7 variou-se os valores do número de fibras de distribuição ( $N_{df}$ ) e o parâmetro  $B$ , que é um parâmetro que representa a posição do divisor. Note-se que o parâmetro indica a posição relativa do divisor no nó remoto, que por um lado se liga a OLT central através uma fibra alimentadora comum partilhada por todas as ONUs e na outra extremidade são ligados as fibras de distribuição ( $N_{df}$ ). Assim,  $B$  determina o respectivo comprimento da fibra de alimentação. Seu valor varia entre 0 e 1, assim quanto mais perto de 1 indicam fibras de alimentação mais compridas. A distância  $d$ , que é a distância média entre o OLT e ONU, foi calculada pela equação (3).



**Figura 7: Comparação de  $L(Km)$  variando o parâmetro  $B$  e o  $N_{df}$**   
**Fonte: Autoria própria.**

Observando a Figura 7, constata-se que tanto com aumento do parâmetro  $B$  como o  $N_{df}$  o valor da distancia  $L(Km)$  aumenta, também se pode observar que

$L(Km)$  se mantém aproximadamente constante após os valores de 0.6 e 60 para o parâmetro  $B$  e  $Ndf$  respectivamente. Portanto, foram escolhidos os valores dessas variáveis apresentadas na Figura 7 e com auxílio da equação (2) obteve-se o valor de  $L(Km) = 60,26$  Km.

Para esse trabalho foi adotado 480 divisores ópticos 1:32, classe P, tipo 1 da Tyco, sendo assim cada sinal que chega do OLT é dividido em 32 sinais que serão enviados aos 630 ONUs, que podem atender até 24 unidades terminais e conseqüentemente os consumidores, contemplando o número de domicílios.

Uma vez dimensionado a arquiteturas de rede PON, a análise dos custos de implementação (CAPEX) e operação (OPEX) podem ser realizados. A Tabela 3 mostra os custos dos equipamentos necessários para o CAPEX. Como pode ser observado nos valores indicados, os OLTs e ONUs são os componentes de maior peso no custo total dos equipamentos para o projeto das redes ópticas passivas.

Tabela 3 - Custos dos equipamentos do CAPEX das redes ópticas passivas

Item	Fabricante	Quantidade	Custo unitário	Total (\$)	%
<b>Cordões ópticos</b>	Furukawa	480	7,20	3.456,00	0.50
<b>Divisores ópticos passivos</b>	Tyco	480	260,00	124.800,00	17.89
<b>Caixas de emenda</b>	Tyco	480	111,25	53.400,00	7.65
<b>Terminal óptico do usuário</b>	Furukawa	15000	10,02	150.300,00	21.54
<b>OLT</b>	Furukawa	12	12.100,00	145.200,00	20.81
<b>ONU</b>	Furukawa	630	350,00	220.500,00	31.61
<b>Total</b>				697.656,00	100.00

Fonte: Próprio autor.

Na Tabela acima se pode notar que estão especificados os fabricante. Por outro lado as quantidades foram estipuladas pelo dimensionamento da arquitetura apresentada anteriormente, e o custo unitário foi extraído de trabalhos prévios com variações da ultima década (TAKEUTI, 2005; AHMED et.al, 2016 ).

A Tabela 4 apresenta os custos relativos à infraestrutura. Nota-se que o custo civil tem um peso muito maior que o custo dos cabos de fibra óptica. O custo unitário foi extraído de trabalhos anteriores (AHMED et.al, 2016).

Tabela 4 - Custos de infraestrutura do CAPEX das redes ópticas passivas

Item	Fabricante	quantidade	Custo unitário	Total	%
Cabos de fibra óptica	Furuawa	60000 m	0,45/m	27.000,00	30.0
Custo civil		630	100 p/ ONU	63.000,00	70.0
<b>Total</b>				<b>90.000,00</b>	<b>100</b>

Fonte: Próprio autor.

Com os dados obtidos na Tabela 3, juntamente com a equação (8), é possível o cálculo do custo de infraestrutura, que será de \$ 5.423.400,00.

Além desses custos há também o custo de instalação que depende das falhas que o sistema pode ter. A Figura 8 mostra simulações de parâmetros de custo de instalação segundo a equação (9). A hora salário de trabalho foi estipulada através de trabalhos anteriores chegando ao valor de 190 dólares por hora (TAKEUTI, 2005).

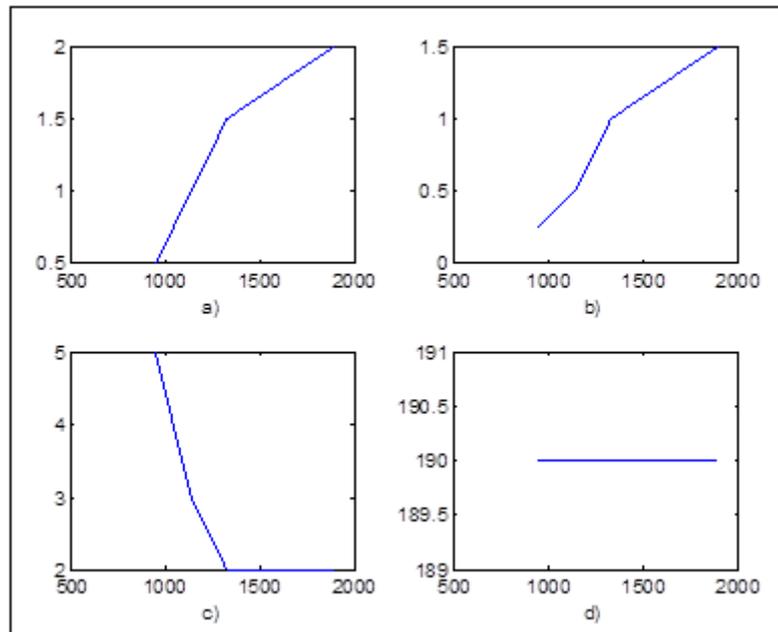
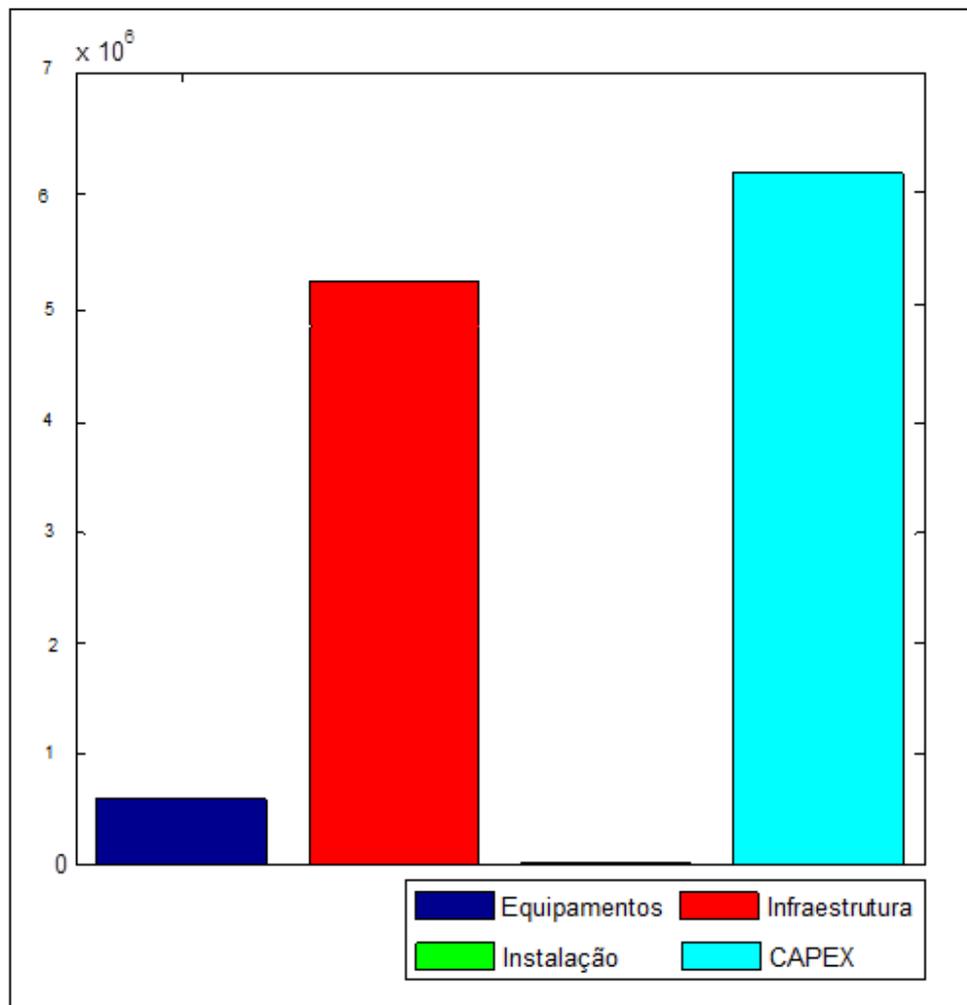


Figura 8: Variação de parâmetros para o cálculo do custo de instalação.  
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 8 está representada no eixo x a variação do custo de instalação para diferentes parâmetros e está dividida da seguinte forma: a) no eixo y é o tempo de instalação em horas; em b) no eixo y é o tempo de traslado até o local de falha

em horas; c) no eixo y é número de funcionários necessário para realização do trabalho ; e em d) no eixo y é o salário dos funcionários que foi mantido fixo em 190 dólares. Analisando as possibilidades, o custo de instalação será adotado o valor de \$1.710,00.

Após essa análise obtém-se o valor total do CAPEX para a arquitetura PON, que está representado na Figura 9 e na Tabela 5, nota-se que o principal fator do CAPEX é o custo de infraestrutura. O Valor final do CAPEX é \$2.823.300,00.



**Figura 9: Resumo dos custos do CAPEX para a arquitetura PON**  
Fonte: Autoria própria.

Tabela 5 - Resumo dos custos do CAPEX para arquitetura PON.

<b>Custos</b>	<b>Valor (\$)</b>	<b>Porcentagem (%)</b>
<b>Equipamentos</b>	697.656,00	11.39
<b>Infraestrutura</b>	5.423.400,00	88.58
<b>Instalação</b>	1.710,00	0.03
<b>Total CAPEX</b>	6.122.766,00	100

Fonte: Próprio autor.

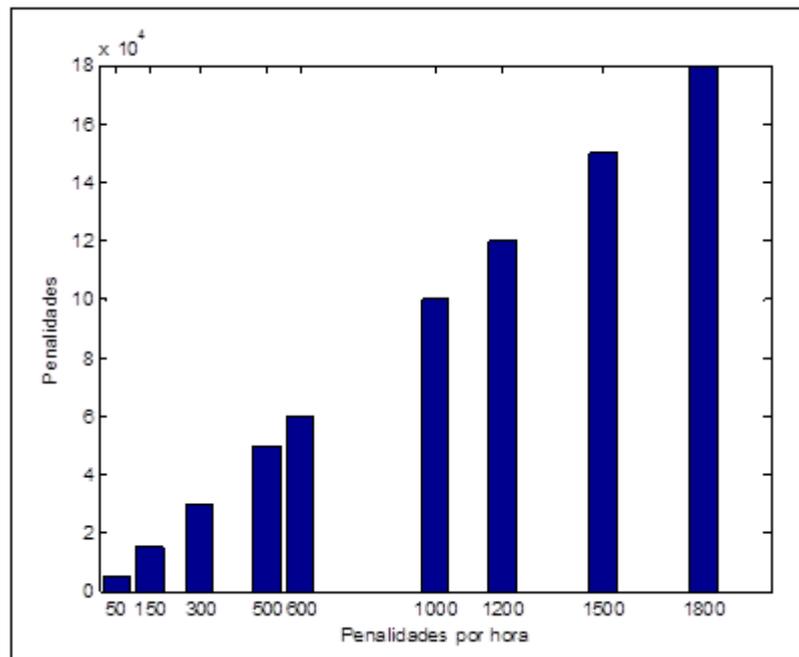
A seguir será apresentado os parâmetros do OPEX para a arquitetura de redes ópticas passivas, que são os custos de operação, administração e manutenção (OAM) e os custos contínuos.

Para o cálculo do OAM foram utilizados parâmetros extraídos de trabalhos anteriores (AHMED et.al, 2013). Estes valores podem ser vistos na Tabela 6. Com as equações (10) e (11) se pode calcular os valores do custo de reparo de falhas e as penalidades, respectivamente. O valor do salário por hora foi considerado \$190,00. Já as penalidades foram variadas e mostradas sua variação Na Figura 10. Com a equação (13) pode-se obter o valor total do OAM, a Figura 11 mostra a variação das penalidades resultando em diferentes valores do FCC. Assim o valor adotado para o OAM será de \$148.120,00.

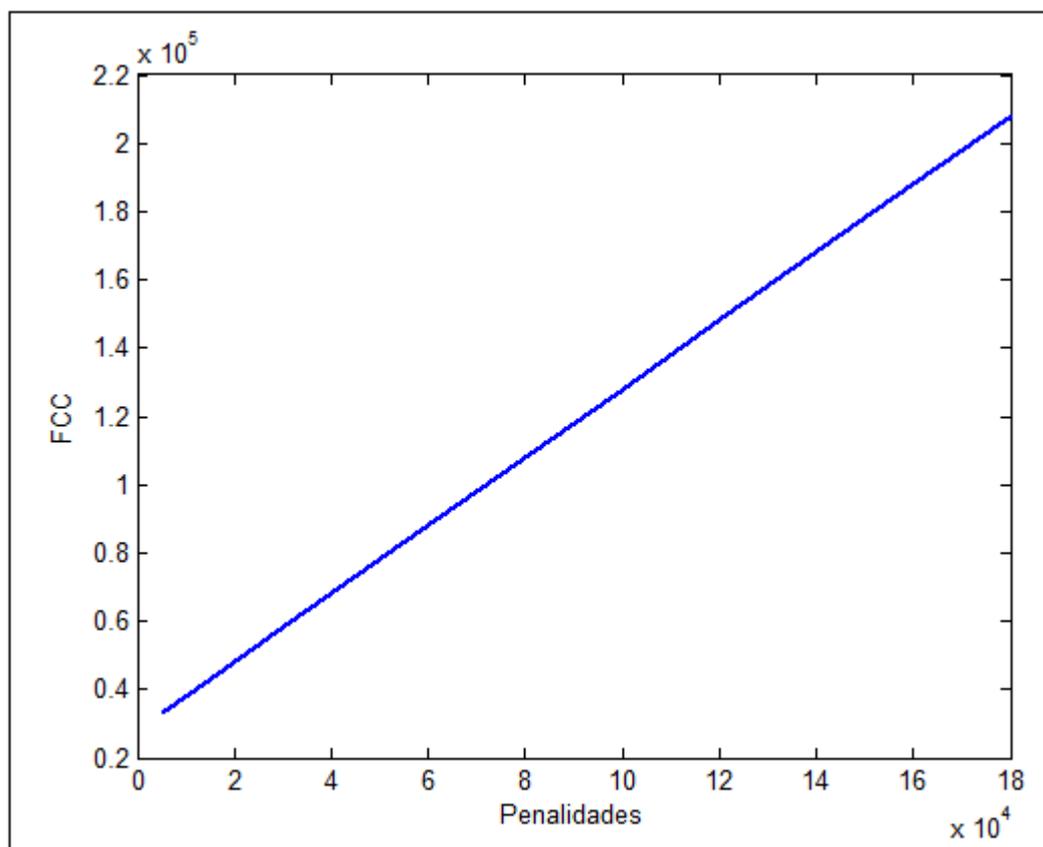
Tabela 6 - Valores necessários para o calculo do reparo de falhas e as penalidades

<b>Equipamento</b>	<b>MTTR</b>	<b>Numero de funcionários</b>	<b>Numero de conexões interrompidas</b>
<b>OLT</b>	4	1	1
<b>ONU</b>	24	1	1
<b>SWITCH</b>	24	1	1
<b>SPLITER</b>	24	1	1
<b>FIBRA</b>	24	3	1

Fonte: AHMED et.al, 2013.



**Figura 10: Variações de penalidades por hora**  
**Fonte: Autoria própria.**



**Figura 11: Variação do FCC para diferentes valores de penalidades**  
**Fonte: Autoria própria.**

A outra parcela do OPEX se trata de custos contínuos, que são considerados os valores de potência perdidos no processo. Com o auxílio da equação (14) obteve-se o valor de potência perdido, e multiplicado ao valor de custo relativo a essa potência obtém-se o valor dessa parcela do OPEX que será de \$ 40.130,00.

Após dessa análise obtemos o valor total do OPEX para a arquitetura PON, que está representado na Tabela 7. Nota-se que os custos contínuos são os maiores em relação ao total do OPEX. O Valor final do OPEX é \$188.250,00.

Tabela 7 - Resumo dos custos do OPEX para arquitetura PON.

Custos	Valor (\$)	Porcentagem (%)
OAM	148.120,00	78.68
Contínuos	40.130,00	21.32
<b>Total OPEX</b>	<b>188.250,00</b>	<b>100.00</b>

Fonte: Próprio autor.

A Figura 12 mostra o resumo final da análise de custo do Smart Grid para a arquitetura de rede PON. Destaca-se que o peso do CAPEX é muito maior do que o peso do OPEX na composição final. A Tabela 8 quantifica essa afirmação.

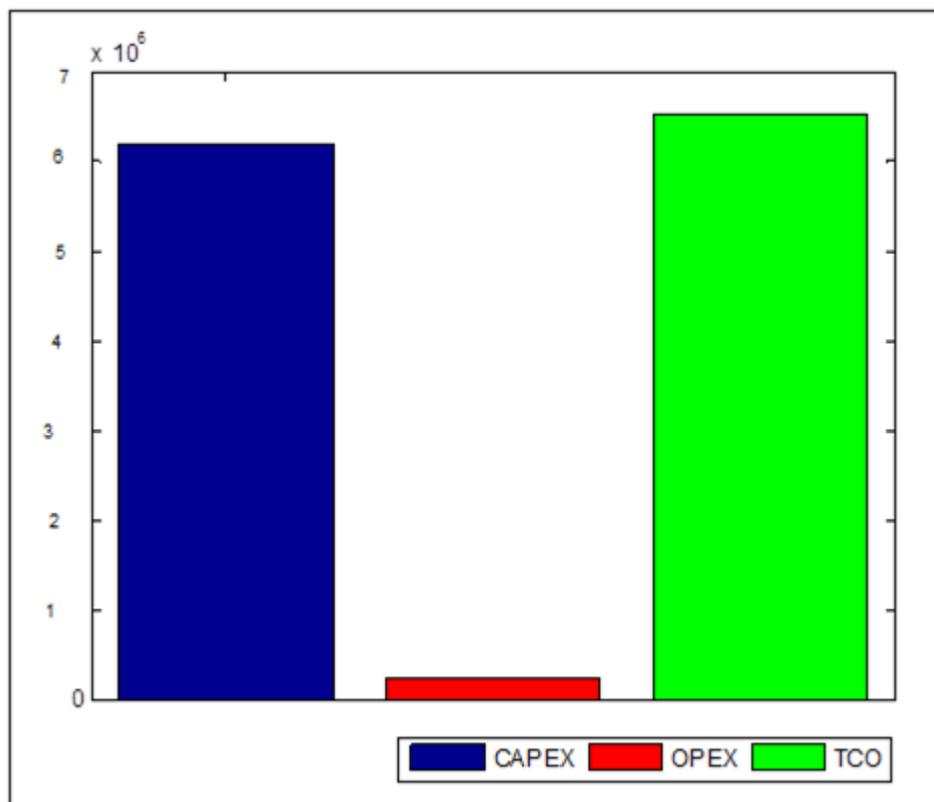


Figura 12: Comparação entre CAPEX e OPEX em relação ao TCO para o PON  
Fonte: Autoria própria.

Tabela 8 - Resumo dos custos para arquitetura PON.

<b>Custos</b>	<b>Valor (\$)</b>	<b>Porcentagem (%)</b>
<b>CAPEX</b>	6.122.766,00	97
<b>OPEX</b>	188.250,00	3
<b>Total (TCO)</b>	6.311.016,00	100

Fonte: Próprio autor.

## 5.2 ANÁLISE DE CUSTO USANDO REDES SEM FIO FI-WI

Em se tratando do dimensionamento das redes sem fio Fi-Wi, é necessário o cálculo do número de estações base (BS), que é equivalente ao cálculo das OLTs das redes ópticas passivas. Há duas formas de se calcular, usando as equações (4) e (5), determinando o dimensionamento de capacidade e cobertura, respectivamente. O Valor adotado de BS será o maior entre os valores calculados entre as duas equações porque é necessário garantir que tanto a capacidade como a cobertura seja suficiente para a demanda, assim escolhendo a maior entre elas garante que ambas as exigências sejam satisfeitas. Os valores base para essas equações foram tiradas de estudos prévios (Smura, 2004). Assim obteve-se o valor de 15 BSs.

A seguir será apresentada a análise de custos para a arquitetura de rede sem fio Fi-Wi, que também será dividida em CAPEX e OPEX. Inicialmente no CAPEX será dividida em três subdivisões, os custos dos equipamentos, custos de infraestrutura e custo de instalação. Por ser uma tecnologia sem fio, há a eliminação de custos relacionados com cabos, por exemplo. Nota-se, no entanto, estruturas semelhantes, ao invés dos OLTs há BSs e onde há ONU há SS (estações de consumidores do inglês subscriber station). Como pode ser visto na Figura 5. A tabela 9 mostra a relação de equipamentos necessários para o cálculo do custo dos equipamentos do CAPEX. O Preço unitário dos equipamentos foram obtidos em trabalhos anteriores (Smura, 2004).

Tabela 9 - Custo de equipamentos do Fi-Wi

Item	Quantidade	Preço unitário	Total	Porcentagem (%)
<b>BS</b>	15	5000	75.000	18.96
<b>SS</b>	630	350	220.500	55.76
<b>Sensor sem fio</b>	500	200	100.000	25.28
<b>Total</b>			395.500	100.0

Fonte: Próprio autor.

Para da segunda parcela do CAPEX, o custo de infraestrutura, foi considerado o custo civil. Tendo em vista que esse valor pode ser facilmente variado, foi determinado o valor de \$10.000,00, que são basicamente os gastos para a implantação de estações de base e antenas. Utilizando a equação (8) chega-se no valor dessa parcela, que será de \$308.200,00.

Na ultima parcela, custo de instalação, do CAPEX das redes sem fio será muito parecida com a mesma parcela utilizando as redes ópticas passivas, uma vez que adotando a hipótese que as localidades de falha seriam as mesmas, portanto o tempo de traslado e tempo de falha seriam os mesmos. A hora de trabalho também foi considerada a mesma. A única mudança é o número de funcionários, que no caso do sem fio geralmente necessita de um numero reduzido, pois em sua maioria seriam problemas de programação ou algo similar, não necessitando de muitos funcionários. Para o cálculo foi escolhido que apenas um funcionário seria necessário. De acordo com a equação (9), obteve-se o valor de \$570,00.

Tabela 10 - Resumo dos custos do CAPEX para arquitetura Fi-Wi.

Custos	Valor (\$)	Porcentagem (%)
<b>Equipamentos</b>	395.500,00	56.16
<b>Infraestrutura</b>	308.200,00	43.76
<b>Instalação</b>	570,00	0.08
<b>Total CAPEX</b>	704.270,00	100

Fonte: Próprio autor.

A seguir serão apresentados os parâmetros do OPEX para a arquitetura de redes sem fio, que são os custos de operação, administração e manutenção (OAM) e os custos contínuos. De acordo com trabalhos anteriores o OAM para redes sem fio é geralmente 20% do CAPEX (Smura,2004). Portanto o valor dessa parcela será de \$140.854,00.

O outro componente do OPEX, os custos contínuos, que são considerados os valores de potência perdidos no processo. Com o auxílio da equação (14) obteve-se o valor de potência perdido, e multiplicado ao valor de custo relativo a essa potência obtém-se o valor dessa parcela do OPEX que será de \$ 40.130,00. Assim o total do OPEX será \$180.984,00. A Tabela 11 e a Figura 13 mostram a comparação entre CAPEX e OPEX para a arquitetura sem fio.

Tabela 11: Resumo dos custos para arquitetura Fi-Wi.

Custos	Valor (\$)	Porcentagem (%)
CAPEX	704.270,00	79.56
OPEX	180.984,00	20.44
<b>Total (TCO)</b>	<b>885.254,00</b>	<b>100</b>

Fonte: Próprio autor.

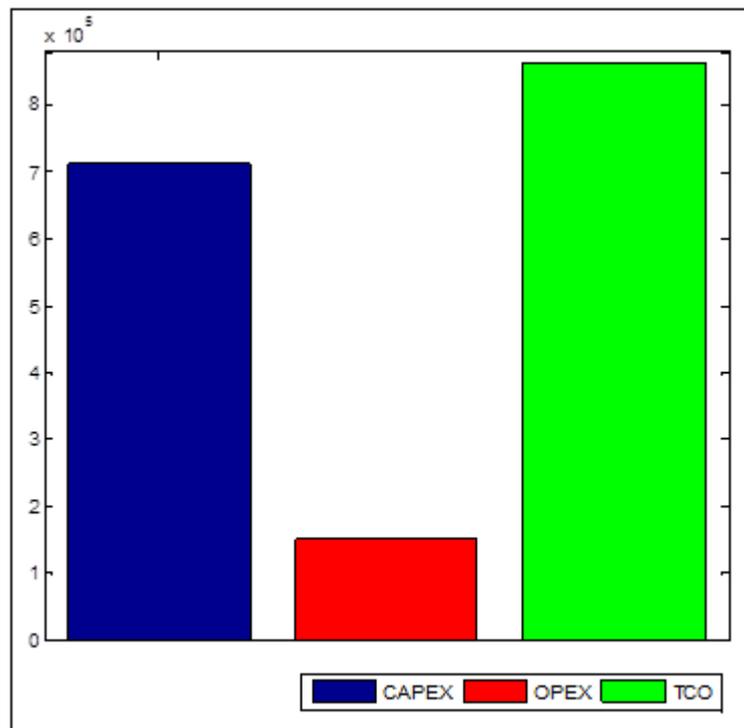


Figura 13: Comparação entre CAPEX e OPEX em relação ao TCO para Fi-Wi  
Fonte: Autoria própria.

### 5.3 COMPARAÇÃO ENTRE AS ARQUITETURAS

Até agora foram apresentadas análise das arquiteturas em separado, a partir de agora será apresentado uma comparação entre as arquiteturas PON e Fi-Wi. A Tabela 12 apresenta o resumo dos custos de ambas as arquiteturas.

Tabela 12: Resumo dos custos das arquiteturas

	CAPEX	OPEX	TOTAL
<b>PON</b>	6.122.766,00	188.250,00	6.311.016,00
<b>Fi- Wi</b>	704.270,00	180.984,00	885.254,00
<b>Diferença</b>	5.418.496,00	7.266,00	5.425.762,00

Fonte: Próprio autor.

Como se pode perceber pela Tabela 11, o custo total para arquitetura PON foi quase cinco vezes maior que o custo total da arquitetura Fi-Wi. A Figura 14 apresenta essa grande diferença.

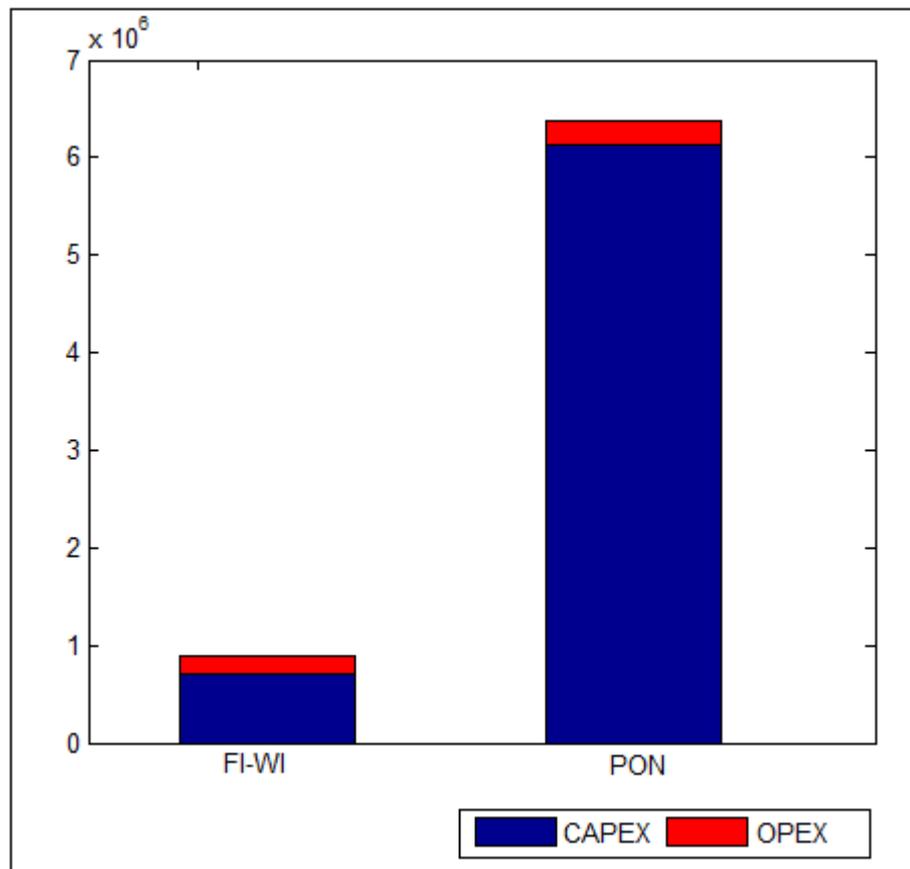
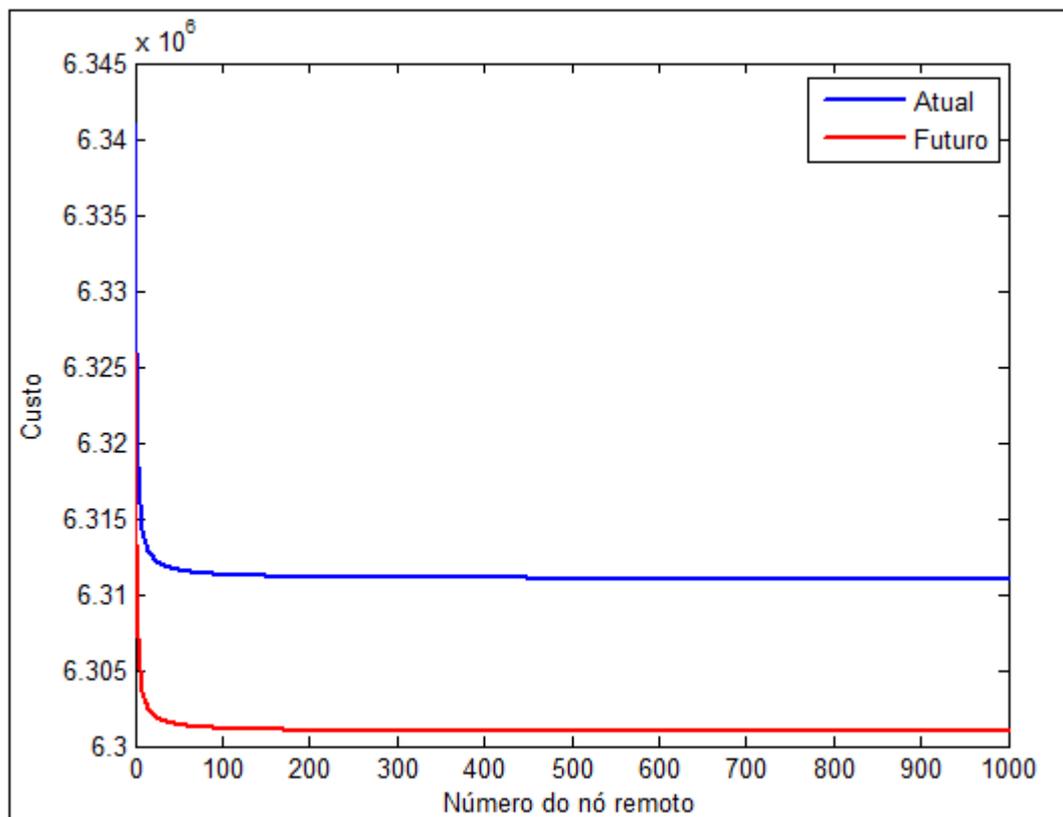


Figura 14: Comparação entre as arquiteturas de rede em relação ao custo.  
Fonte: Autoria própria.

A arquitetura de rede PON apresentou custo muito alto de implantação e operação em relação a arquitetura Fi-Wi. Tendo em vista isso é necessário o estudo de aperfeiçoamento desse algoritmo e também formas de redução efetiva de custo.

Após toda análise foi observado que uma forma de redução desses custos de implantação do Smart Grid é a redução das potências perdidas nas unidades terminais e nos nós remotos. Esses custos estão relacionados com os custos contínuos e conseqüentemente ao custo de operação (OPEX).

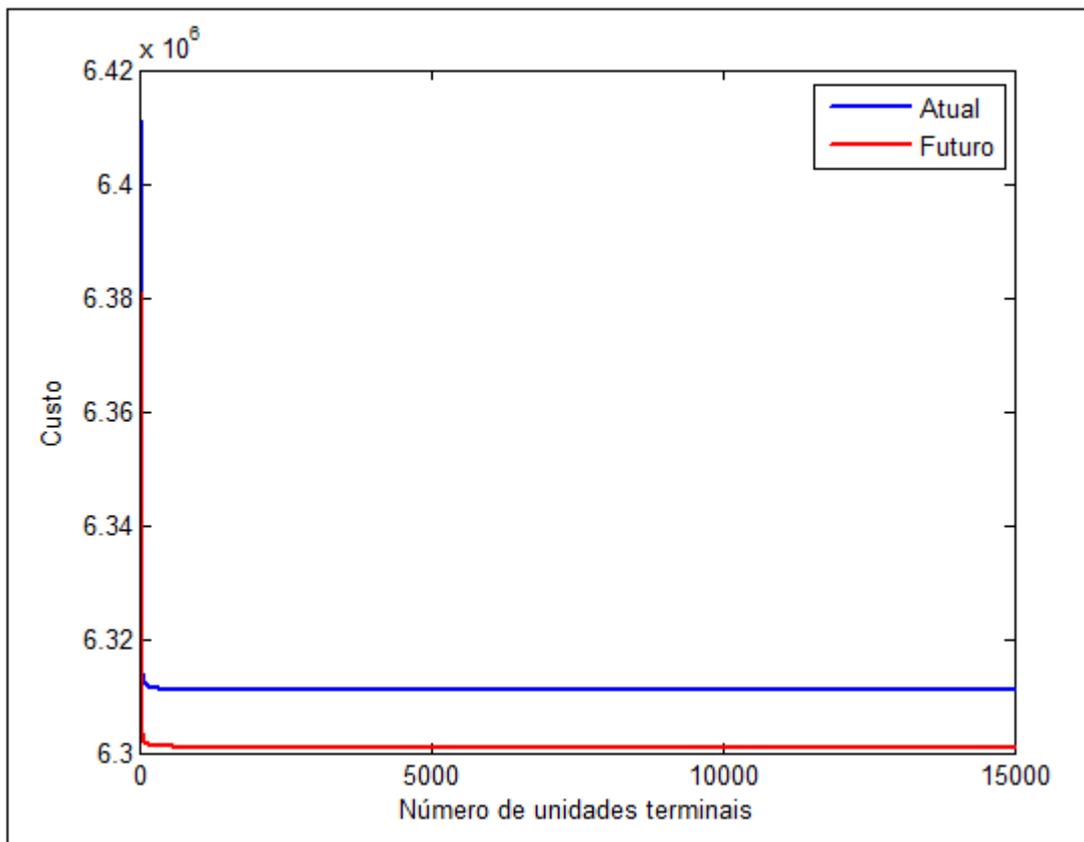
As Figuras 15 apresenta a variação de potências nos nós remotos para a arquitetura de redes ópticas passivas, foi considerado a perda de potência de 300 W inicialmente, e é considerado a redução para 250 W no futuro visando essa redução de custo.



**Figura 15: Comparação entre situação atual e futuro variando a potência na unidade terminal e o número de nó remoto para PON**

Fonte: Autoria própria.

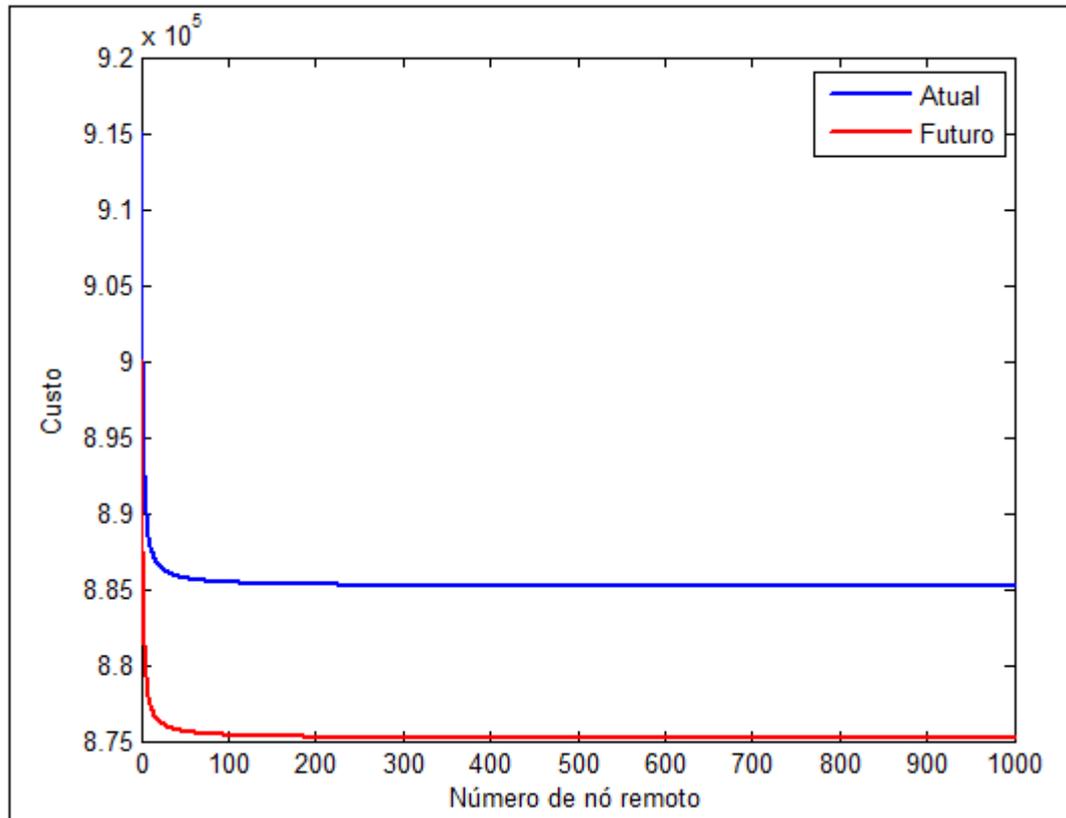
A Figura 15 mostra que num cenário futuro do PON com a redução da potência nós remotos há uma redução do custo total, apesar de não ser aparentemente significativo isso pode em longo prazo vantajoso. Nota-se também que a variação do número de nós remotos não interfere significativamente pois para se ter uma variação o número de nós deve ser extremamente baixo, o que na prática não acontece.



**Figura 16: Comparação entre situação atual e futuro variando a potência e o número da unidade terminal para PON.**

Fonte: Autoria própria.

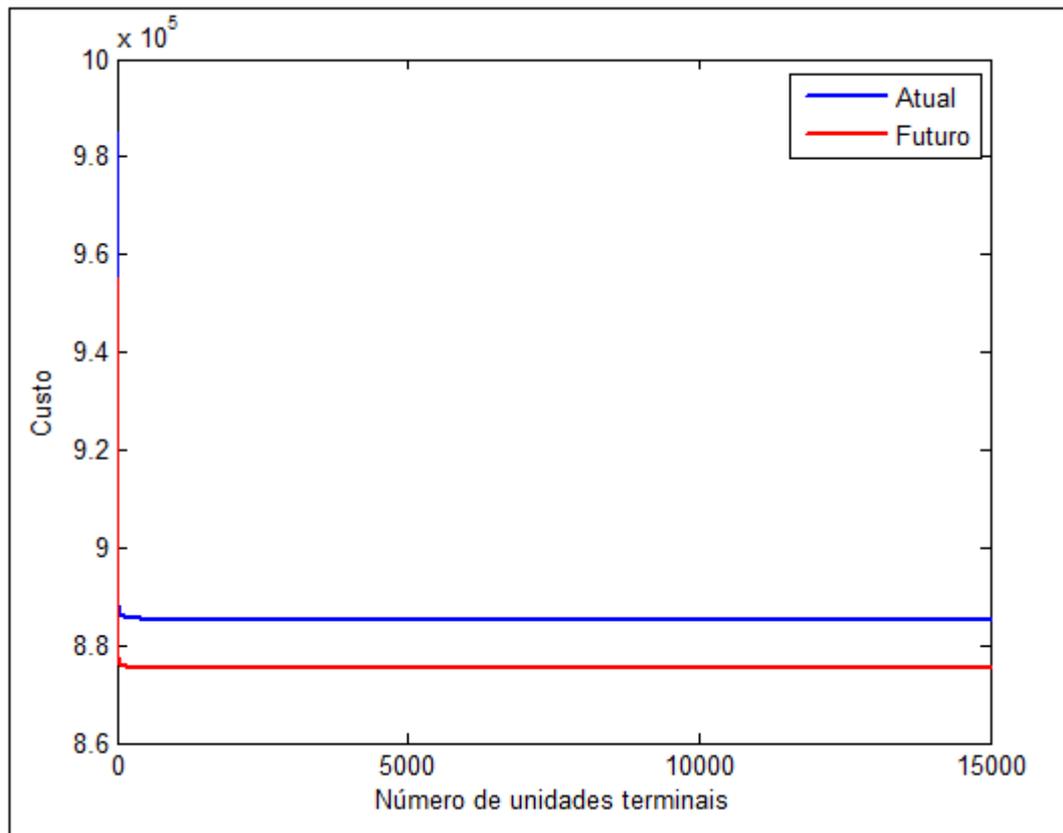
Na Figura 16 foi reduzido as potências perdidas de 500 W para 400 W nas unidades terminais e também se observa que há uma redução do custo total quando se considera variável número de unidades terminais. Essa redução é menor se comparada com o resultado obtido quando se variou o número de nós remotos.



**Figura 17: Comparação entre situação atual e futuro variando a potência na unidade terminal e o número de nó remoto para Fi- Wi.**

Fonte: Autoria própria.

Considerando as Figuras 17 e 18 observa-se resultados para Fi-Wi que são similares aos apresentados anteriormente para o PON. Nota-se que também houve uma redução em ambos, com destaque mais uma vez para quando se variou o número de nós remotos.



**Figura 18: Comparação entre situação atual e futuro variando a potência e o número da unidade terminal para Fi- Wi.**

Fonte: Autoria própria.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise de custos do Smart Grid é significativamente complexa e depende de muitos parâmetros variáveis e muitas vezes não lineares, o que faz essa análise ser consideravelmente subjetiva. Neste trabalho foram analisadas duas arquiteturas diferentes de rede visando uma comparação dos custos envolvidos de ambas as arquiteturas.

O mesmo algoritmo simplificado do CAPEX e OPEX foi utilizado para ambas as arquiteturas de rede, no entanto naturalmente houve grande diferença dos valores utilizados principalmente nos custos dos equipamentos, uma vez que, cada tecnologia há topologias e necessidades diferentes. Os resultados obtidos foram satisfatórios e foi possível perceber que em ambos os custos de implantação (CAPEX) tem maior influencia nos custos totais para implantação do *Smart Grid*.

Após a análise completa dos custos envolvidos na implantação e operação do Smart Grid se pode perceber que o custo total ainda é considerado elevado tanto para a arquitetura PON como para Fi-Wi, no entanto observou-se que para a arquitetura óptica passiva os valores são muito superiores do que na arquitetura sem fio. Isso se deve principalmente nos custos envolvidos com infraestrutura que ainda estão muito elevados muito em função tanto do alto custo das fibras ópticas como do custo para abrir tubulações para se instalar essas fibras.

Deve-se considerar que há muitas outras topologias possíveis a serem feitas e assim a critério de análise desse trabalho, a arquitetura Fi-Wi foi considerada mais apropriada para a utilização nas redes inteligentes. Em linhas gerais constatou-se que o custo total da arquitetura sem fio Fi-Wi é consideravelmente inferior à arquitetura PON, o que a torna mais indicada.

Mesmo considerando apenas essas duas arquiteturas de rede, percebe-se que é possível a redução dos custos totais, portanto ainda há muito espaço para técnicas de otimização para aprimorar esse algoritmo e reduzir tanto o custo de implementação como o de operação. Uma das formas de redução foi apresentada nesse trabalho através da redução de potências nas unidades terminais, assim foi possível verificar sutil, mas significativa, alteração. Ainda há um longo caminho a ser

percorrido para que o *Smart Grid* seja totalmente viável, no entanto com as inúmeras pesquisas esse cenário esta cada vez mais propícia à instalação do *Smart Grid*.

## REFERÊNCIAS

AHMED, M.A.; YANG, W.H.; KIM, Y.C. **Performance Evaluation of EPON-Based Communication Network Architectures for Large-Scale Offshore Wind Power Farms**. 3rd International Conference on Smart Grids, Green Communications and IT Energy-aware Technologies, Lisboa, Portugal, 24–29 Março 2013; pp. 15–20.

AL-ABDULLAH, ABDUL-MAJEED ALI **WiFi Communication System**. Eletricomagnetic research Project report 2008/2009.

AMPLA. **Cidade inteligente Búzios**. Retirado de <ampla.com> Acesso em 21 oct.2015.

BALIGA J., AYRE R. W. A., HINTON K., AND. TUCKER R. S, **Energy consumption in wired and wireless access networks**, *IEEE Common. Mag.*, vol. 49, no. 6, pp. 70–77, 2011.

CHARNI, R.; MAIER, M., **Total Cost of Ownership and Risk Analysis of Collaborative Implementation Models for Integrated Fiber-Wireless Smart Grid Communications Infrastructures**, em *Smart Grid, IEEE Transactions on* , vol.5, no.5, pp.2264-2272, 2014

CHEN J., WOSINSKA L., MACHUCA C. M., JAEGER M. **Cost vs. Reliability performance study of fiber access network architectures**, *IEEE Common. Mag.*, vol. 48, no. 2, pp. 56–65, 2010.

CPFL. **O que é smart grid**. Retirado de < <http://www.cpfl.com.br/energias-sustentaveis/sites-tematicos/smart-grid/Paginas/default.aspx> > Acesso em 16 oct.2015.

DAVIM J. P., ZIAIE S., AND. PINTO A. N. **CAPEX model for PON technology using single and cascaded splitter schemes**, em *Proc., IEEE Int. Conf. Compute. as Tool (EUROCON)*, Lisboa, Portugal, pp.1–4,2011,.

DOMINGUES F., ROCHA A. M., AND ANDRE P. S., **Failure probability of optical fiber under high optical power and small bend diameters** in *Proc. SBMO/IEEE MTT-S Int. Conf. Microwave Optoelectron. Conf. (IMOC)*, pp. 1–4, 2011.

EPE. **Balanco Energético**. 2013 Disponível em < <http://www.epe.gov.br/Estudos/Paginas/default.aspx?CategoriaID=345> > Acesso em 03 oct 2016.

EROL-KANTARCI, M.; MOUFTAH, H.T., **Energy-Efficient Information and Communication Infrastructures in the Smart Grid: A Survey on Interactions and Open Issues**, em *Communications Surveys & Tutorials, IEEE* , vol.17, no.1, pp.179-197, 2015

FANG REN; JUHAO LI; TAO HU; RUIZHI TANG; JINYI YU; QI MO; YONGQI HE; ZHANGYUAN CHEN; ZHENGBIN LI, **Cascaded Mode-Division-Multiplexing and Time-Division-Multiplexing Passive Optical Network Based on Low Mode-Crosstalk FMF and Mode MUX/DEMUX** in *Photonics Journal, IEEE*, vol.7, no. 5, pp.1-9, Oct. 2015

KRIZANOVIC, V. ; ZAGAR, D.; GRGIC, K. **Techno-economic analyses of wireline and wireless broadband access networks deployment in croatian rural áreas.** Em *Proc., Int. Conf. Telecommun. (ConTEL)*, Graz, Austria, Jun. 2011, pp. 265–272.

LAMIN, H. **Análise regulatória da implantação de redes inteligentes no Brasil.** Tese de doutorado submetida ao departamento de engenharia elétrica da faculdade de tecnologia da Universidade de Brasília, 2013

MAIER, M.; LÉVESQUE, M.; IVANESCU, L. **NG-PONs 1&2 and beyond: The dawn of the Über-FiWi network**, *IEEE Network*, vol. 26, no. 2, pp. 15–21, Mar./Apr. 2012.

NICANFAR, H.; TALEBIFARD, P.; ALASAAD, A.; LEUNG, V.C.M., **Enhanced Network Coding to Maintain Privacy in Smart Grid Communication**, em *Emerging Topics in Computing, IEEE Transactions on* , vol.1, no.2, pp.286-296, 2013

PENG LI; SONG GUO; ZIXUE CHENG, **Joint Optimization of Electricity and Communication Cost for Meter Data Collection in Smart Grid**, em *Emerging Topics in Computing, IEEE Transactions on* , vol.1, no.2, pp.297-306, 2013

RIVERA, R SICILIANO, A E , TEIXEIRA, I **Redes elétricas inteligentes (smart grid): oportunidade para adensamento produtivo e tecnológico local** Revista do BNDES 40 p 43-84, 2013

SHEA, D. P., MITCHELL, J. E., **A 10 Gb/s 1024-WAP Split 100-km Long Reach Optical Access Network**, *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology* , vol. 25, no. 3, Mar. 2007

SMART GRID WORKING GROUP. **Challenge and Opportunity: Charting a New Energy Future**, Appendix A: Working Group Reports Energy Future Coalition., 2003.

SMURA, T. **Techno-economic analysis of IEEE 802.16a-based fixed wireless access networks Master's**, Helsinki, Finlândia, 2004.

TAKEUTI, P. **Projeto e dimensionamento de redes passivas(PONs)**. Dissertacao de mestrado da universidade de São Paulo, 2005

TELOS. **Secure Passive Optical Network Solutions from Telos Corporation.**

Retirado de < <http://www.telos.com/secure-networks/optical-lan/secure-pon/>> Acesso em 22 oct 2015

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ. Sistema de Bibliotecas. **Normas para elaboração de trabalhos acadêmicos**. Curitiba: UTFPR, 2009.

US DEPARTMENT OF ENERGY, **What is the Smart Grid?** Disponível em < [https://www.smartgrid.gov/the\\_smart\\_grid/smart\\_grid.html](https://www.smartgrid.gov/the_smart_grid/smart_grid.html)> Acesso em 15 oct 2015