

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

HENRIQUE TADEU DE PINA JAYME

**Análise tecno-econômica de redes de
telecomunicações aplicada ao acesso e
à escala doméstica**

São Carlos
2012

Henrique Tadeu de Pina Jayme

**Análise tecno-econômica de redes
de telecomunicações aplicada ao
acesso e à escala doméstica**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola de Engenharia de
São Carlos, da Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia de Computação
com ênfase em Telecomunicações

ORIENTADORA: Mônica de Lacerda Rocha

São Carlos
2012

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

JJ42a Jayme, Henrique Tadeu de Pina
Análise tecno-econômica de redes de
telecomunicações aplicada ao acesso e à escala
doméstica / Henrique Tadeu de Pina Jayme; orientadora
Mônica de Lacerda Rocha. São Carlos, 2012.

Monografia (Graduação em Engenharia de Computação)
-- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade
de São Paulo, 2012.

1. análise tecno-econômica. 2. rede doméstica. 3.
rede de acesso. 4. acesso híbrido óptico sem fio. 5.
conexões ópticas. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Henrique Tadeu de Pina Jayme

Título: “Análise tecno-econômica de redes de telecomunicações aplicada ao acesso e à escala doméstica”

Trabalho de Conclusão de Curso defendido em 29 / 11 / 2012

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Assistente Carlos Goldenberg
SEL/EESC/USP

APROVADO

Dr. Eduardo Martinelli Galvão de Queiroz
SEL/EESC/USP

APROVADO

Orientadora:

Profa. Dra. Mônica de Lacerda Rocha - SEL/EESC/USP

Coordenador pela EESC/USP do Curso de Engenharia de Computação:

Prof. Associado Evandro Luís Linhari Rodrigues

“I know I was born and I know that I’ll die. The in-between is mine.” –

“Eu sei que nasci e sei que irei morrer. O que está dentro disto é meu.”

(Eddie Vedder, cantor e compositor)

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, por todo o amor, por toda a educação e apoio dado aos estudos. À minha avó Dione, por todo o carinho. Aos meus irmãos, por serem tão especiais. À Dadá, por ter feito parte de toda minha infância e adolescência. Aos amigos de Goiás, que sempre me alegraram nas voltas para casa. À Camomila, por ter me apoiado e por ter suportado tantos anos de distância. Aos meus colegas de faculdade, por todos os momentos, em especial: Renato Lopes, pela sua simplicidade de mineiro; Davi Nóbrega, pela amizade; Alzira, por todos os “arrastas” e Rodrigo Silva, que apesar de ser paulista, se tornou um irmão para mim. A todos os professores que contribuíram para a minha formação. E à cidade de Pirenópolis-Go, por sua cultura, tradição, natureza e pessoas, por minhas raízes.

AGRADECIMENTOS

À Professora Mônica, pelo auxílio dado. E à minha irmã Sejana, que tanto colaborou para a qualidade deste trabalho.

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Objetivo e Metodologia.....	4
1.2	Organização do trabalho	4
2	AS TECNOLOGIAS DE TRANSMISSÃO E O PROJETO OMEGA.....	5
2.1	<i>Infrared (IR)</i>	5
2.2	<i>Visible Light Communication (VLC)</i>	7
2.3	<i>Power Line Communication (PLC)</i>	8
2.4	<i>Plastic Optical Fiber (POF)</i>	10
2.5	<i>Fiber-to-the-x (FTTx)</i>	12
2.6	<i>Free Space Optical (FSO)</i>	13
2.7	Projeto OMEGA	14
3	AVALIAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE DADOS NO AMBIENTE DOMÉSTICO ..	16
3.1	<i>Analytical Hierarchy Process (AHP)</i>	16
3.2	Pesquisa 1	19
3.3	Pesquisa 2 e Pesquisa 3.....	23
3.4	Análise estatística dos resultados	27
4	ANÁLISE ECONÔMICA DAS REDES DE ACESSO.....	32
5	CONCLUSÃO.....	37

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Instalação de cabos de fibra óptica.....	1
Figura 2 - Cenários alternativos para rede óptica doméstica [1].....	3
Figura 3 - Cenário 5 para rede óptica doméstica.	3
Figura 4 - Comunicação por VLC em uma aeronave	8
Figura 5 - Perda da potência com o aumento da distância[8].....	9
Figura 6 - Relação entre o sinal de entrada, o de saída e o ruído[9].	10
Figura 7 - Perda de potência com utilização simultânea [8].	10
Figura 8 - diferentes fibras e suas dimensões[10].	11
Figura 9 - LED emitindo luz em uma POF.....	11
Figura 10 - Diferentes estruturas com fibras ópticas[12].	12
Figura 11 - <i>link</i> óptico.....	13
Figura 12 - Modelo hierárquico para avaliação de tecnologias[1].....	17
Figura 13 - Curva de demanda.	22
Figura 14 - Classificação dos cenários para cada critério no ambiente residencial.	24
Figura 15 - Classificação dos cenários para cada critério no ambiente de escritório...	25
Figura 16 - Classificação dos cenários.	26
Figura 17 - Gráfico de comparação entre PLC e POF.....	27
Figura 18 - Variação do critério de maior significância (Critério 4).	28
Figura 19 - Variação das relevâncias dos fatores mais importantes de cada critério (Residência).	29
Figura 20 - Variação das relevâncias dos fatores mais importantes de cada critério (Escritório).	29
Figura 21 - Variação em igual proporção de todos os fatores de maior peso de cada critério (F_{13} , F_{22} , F_{32} e F_{44}).	30
Figura 22 - Variação em igual proporção do critério 4 e de todos os fatores mais importantes de cada critério (F_{13} , F_{22} , F_{32} e F_{44}).	30
Figura 23 - Distribuição dos diferentes cenários após perturbação normal.	31
Figura 24 - Avaliação econômica para FTTC[2].	33
Figura 25 - Sensibilidade do NPV para áreas densamente urbanizadas[2].	35
Figura 26 - Retorno financeiro em função da cobertura por FSO[2].	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Espectros de frequência	6
Tabela 2 - Peso dos fatores para cada tecnologia	18
Tabela 3 - P ₁ : Critérios, fatores e seus respectivos pesos	21
Tabela 4 - Resultado da Pesquisa P2.....	24
Tabela 5 - Resultado da pesquisa P3	25
Tabela 6 - Características da área.....	32
Tabela 7 - Potencial de mercado	33
Tabela 8 - Comparação dos NPV de diversos cenários[2]	34

RESUMO

Devido à grande demanda de conexões por dados, este trabalho visa fazer uma análise tecno-econômica de cenários para redes de telecomunicações de alta velocidade tanto na escala doméstica, quanto de rede de acesso. Para o primeiro caso, foi tomado como base o trabalho de Dede *et al.*[1], que expõe diferentes alternativas de redes a partir de conexões por tecnologias ópticas de espaço livre, fibra óptica de plástico e cabos de energia elétrica. Os dados apresentados no seu trabalho foram validados a partir de perturbações estocásticas e análises estatísticas. Para a avaliação da rede de acesso, foi estudado o trabalho de Rokkas *et al.*[2], que expõe os possíveis retornos financeiros ao se investir em fibra óptica e em tecnologias de transmissão via espaço livre. Seus resultados foram apresentados e comentados. Com estes estudos se tem uma visão geral de uma análise tecno-econômica aplicada a redes de telecomunicações visando avaliar tecnologias que produzem um melhor cenário.

Palavras-chaves

Análise tecno-econômica, rede doméstica, rede de acesso, acesso híbrido óptico sem fio, conexões ópticas.

ABSTRACT

Due to the great demand for data transmissions rates, this monograph presents a techno-economic analysis for high speed telecommunications networks in both access and domestic scale. For the home networking, the paper written by Dede *et al.*[1] has been taken as a basis for analyzing three alternative networks: optical wireless (OW), plastic optical fiber (POF) and power line communication (PLC). The data presented were validated from stochastic perturbations and statistical analyzes. To evaluate the access network, the paper written by Rokkas *et al.*[2] was studied. It exposes the possible financial returns by investing in fiber and free space optical (FSO). Their results were presented and discussed. With these studies it is possible to have an overview of a telecommunication network and it is feasible to evaluate the best scenario.

Keywords

Techno-economic analysis, home networking, access network, hybrid optical wireless access, optical connection.

1 Introdução

A demanda por dados no ambiente doméstico tem aumentado muito nos últimos anos. Isto se deve ao maior número de dispositivos com acesso à rede e também à maior necessidade de grandes taxas de transmissão para as mais variadas aplicações: televisão em alta definição (HDTV), *Web 2.0*, compartilhamento de conteúdo, jogos *online*, etc[1]. Por isso, é preciso pensar em soluções mais eficazes. Uma boa opção seria a tecnologia de transmissão de dados via fibra óptica, pois ela provê alta taxa de transmissão devido às suas características ópticas e também à sua baixa atenuação. Porém, como este trabalho foca na implantação de tecnologias tendo como base o cenário europeu, são necessárias obras para a instalação de tais fibras, como pode ser visto na Figura 1, o que causa aumento no custo e transtorno aos usuários.



Figura 1 - Instalação de cabos de fibra óptica

Sendo assim, este trabalho fará uma revisão do estudo realizado por Dede *et al.*[1] para algumas redes de dados no ambiente doméstico, tendo em vista aceitação social, análise econômica e análise técnica das soluções abordadas. Também será revisto o estudo realizado por Rokkas *et al.*[2], que considera a rede de acesso nas imediações da rede doméstica em cenários onde, devido à inviabilidade de se implantar uma rede de acesso fixo, a tecnologia *Free Space Optical* (FSO), também conhecida como *Optical Wireless* (OW), é analisada.

No ambiente doméstico, a OW é alternativa que oferece alta transmissão de dados sem a necessidade de instalação de novos cabos, ou seja, comunicação via espaço livre. Duas formas de transmissão que compõem a OW têm atraído enorme

interesse de pesquisadores: a transmissão por raios infravermelhos (IR - *Infrared*) e a transmissão por luz visível (VLC – *Visible Light Communication*).

As vantagens da OW se dão pela larga banda espectral, pela falta de interferência em sistemas de comunicação na faixa de radiofrequência e pela incapacidade destas ondas eletromagnéticas atravessarem objetos opacos, como paredes. Isto faz com que haja total segurança, já que estes dados não poderão ser interceptados por usuários fora do ambiente de comunicação. Adicionalmente, temos a questão da saúde: enquanto ondas eletromagnéticas de rádio ainda são uma incógnita no que se refere a danos à saúde, as tecnologias de OW possuem dados mais concretos sobre o assunto: há um limite de potência para transmissão que depende do comprimento de onda utilizado pela fonte[3].

É possível a transmissão com IR de até 1,25Gbps e com VLC de 100Mbps[4]. Estas duas soluções ainda não são comercializáveis. Entretanto, há um grande número de pesquisas acerca deste tema e há possibilidade de, em breve, estarem no mercado. Com ambas trabalhando em conjunto será possível haver transmissão de dados em uma taxa de 1Gbps e com custo acessível. Porém, a rede de acesso, estrutura por trás da comunicação óptica sem fio, deve também prover tal velocidade. E este trabalho analisa, portanto, a presença de comunicação via cabos de energia elétrica (PLC – *Power Line Communication*) e também de fibra óptica de plástico (POF – *Plastic Optical Fiber*).

Dentre as tecnologias citadas, qual seria a mais viável: IR, VLC ou as duas em conjunto? É melhor a utilização de PLC ou de POF? Não é simples obter as respostas, pois a implementação de um método envolve critérios técnicos, econômicos e aceitação social. Sendo assim, para esta análise, Dede *et al.*[1] utilizou uma ferramenta chamada *Analytical Hierarchy Process* (AHP), que permitirá uma comparação entre as tecnologias a partir de pesquisas feitas com integrantes do Projeto OMEGA (*Home Gigabit Access*).

Foram analisados cinco diferentes cenários. Em todos, a chegada até a porta de entrada se dá por fibra óptica (FTTH – *Fiber-to-the-Home*), já que o foco do estudo de Dede *et al.*[1] está no ponto final e não nas tecnologias de transmissão. Portanto, a utilização de outra tecnologia com alta capacidade de dados não altera os resultados obtidos. A Figura 2 mostra quatro dos cenários: no primeiro (A1), temos a utilização de PLC como meio de transporte e IR para subida e descida de dados; no segundo (A2), o IR é auxiliado por VLC para prover descida de dados (*downstream*); o terceiro cenário (A3) se diferencia do primeiro pela troca do PLC por POF; o quarto (A4) é

semelhante ao segundo, mas também com a utilização de POF. Por fim, o último cenário (A5), ilustrado na Figura 3, que corresponde a uma conexão feita exclusivamente por POF. Estes cenários foram ranqueados por *Pairwise Comparisons* (PWC) e os resultados foram analisados para a escolha das tecnologias mais apropriadas.

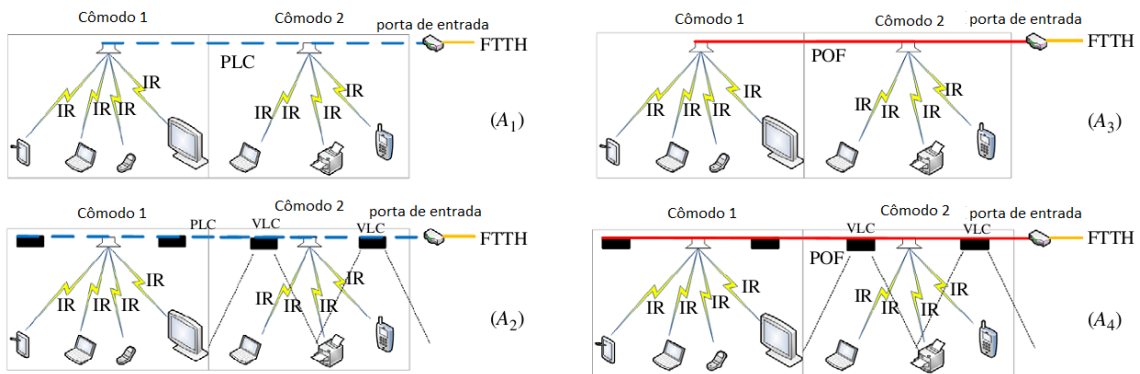


Figura 2 - Cenários alternativos para rede óptica doméstica [1].

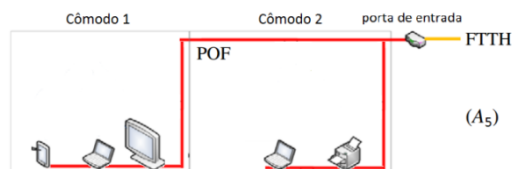


Figura 3 - Cenário 5 para rede óptica doméstica.

1.1 Objetivo e Metodologia

O objetivo deste trabalho é estudar a viabilidade de implantação de algumas tecnologias de conexão de dados para a escala doméstica, através de uma revisão bibliográfica do texto de Dede *et al.*[1], cuja ênfase são as tecnologias ópticas de transmissão de dados via espaço livre (OW). Os dados e o método apresentados serão validados a partir de análises estatísticas. Além disso, será feito um estudo da análise tecno-econômica desenvolvida por Rokkas *et al.*[2] para tecnologias ópticas de espaço livre de chegada ao usuário (*last-mile*).

1.2 Organização do trabalho

O presente trabalho está organizado em três partes. As duas primeiras são voltadas ao estudo de Dede *et al.*[1], onde o capítulo 2 expõe as tecnologias: IR, VLC, PLC, POF, FTTx, incluindo uma explanação sobre o Projeto OMEGA, e o capítulo 3 mostra a metodologia proposta por Dede *et al.*[1] e a implementação dos seus dados com respectivas análises. O capítulo 4 aborda a análise de Rokkas *et al.*[2].

2 As tecnologias de transmissão e o projeto OMEGA

2.1 Infrared (IR)

Além do uso em comunicação via fibra óptica, a utilização de raios infravermelhos já possui as mais diversas aplicações. Podemos citar, de início, o controle remoto, os vídeos cassetes e os tocadores de CD. Mas esta tecnologia é também utilizada na indústria, em pesquisas científicas e na medicina. Como exemplos temos: visão noturna, que permite que humanos ou animais sejam observados sem que estes notem o observador; na astronomia, os raios infravermelhos permitem a observação de objetos obscuros; na medicina, pode ser usado para verificar a mudança na pulsação sanguínea.

A tecnologia de comunicação no espectro de frequência do infravermelho faz parte do chamado *Optical Wireless* (OW), juntamente com a comunicação VLC. A Tabela 1 mostra as faixas de comprimento de onda e de frequência para Luz visível, IR e radiofrequência. A fonte de infravermelho pode ser um LED (*light emitting diode*) ou um LASER, sendo o primeiro com um feixe aberto e o segundo, com um feixe mais diretivo, provendo maior transmissão de dados, mas com baixa mobilidade[5]. Portanto, para este tipo de comunicação, a utilização de LED é mais usual.

O infravermelho possui algumas vantagens significativas frente à comunicação por radiofrequência, que é a comunicação tradicional das redes *WiFi* (IEEE802.11). Primeiramente, feixes ópticos não atravessam paredes e, assim, os dados ficam confinados apenas ao ambiente em que são direcionados, fazendo com que não seja possível interceptação por usuários externos ao cômodo onde é feita a conexão. Isto não acontece com a banda de rádio, pois atravessam obstáculos e podem ser facilmente interceptados por usuários com más intenções[6]. Este fato também é atraente do ponto de vista de interferência, pois, como a comunicação fica confinada em um cômodo da casa, não há colisão com outros dados de outros lugares. Mas este tipo de comunicação também sofre com ruído, já que luz solar, lâmpadas incandescentes e iluminação fluorescente são interferências inerentes desta tecnologia. Portanto, um dos desafios é a obtenção de uma boa relação sinal/ruído (SNR)[5].

Outra vantagem a se destacar é a nocividade à saúde do homem. Ainda hoje, há estudos acerca dos danos que ondas eletromagnéticas podem causar ao corpo humano, mas ainda não há um consenso, sendo este um tema obscuro. Quando falamos em Infravermelho, é notório que a potência deve ser limitada para que nossos olhos não sofram lesões e para isso existem padrões de emissão (IEC e ANSI)[5]. Se utilizarmos uma potência que não agrida os olhos, então ela também não será nociva à pele, já que esta é mais resistente. Pode-se perguntar se a exposição por longos períodos, mesmo que em baixa potência, não causaria danos à saúde humana. Porém, isso é refutado, visto que por milhares de anos estamos expostos a este tipo de radiação devido ao Sol.

Por fim, temos a principal vantagem da tecnologia IR, pelo ponto de vista de telecomunicações: a capacidade de prover mais velocidade que conexões em radiofrequência. Com o infravermelho, conexões de 1Gbps são possíveis[4], enquanto nas redes *wireless* tradicionais podemos alcançar velocidades não muito maiores que 100Mbps. Outro ponto de destaque é a menor complexidade para processamento do sinal no espectro do infravermelho[5]. Sendo assim, o IR é uma tecnologia excelente no âmbito de chegada dos dados aos dispositivos, ou seja, no ambiente doméstico.

A sua região espectral é muito maior que a de rádio, o que diminui também o risco de interferências entre diferentes fontes de infravermelho. Também não há uma regulamentação sobre seu espectro como existe para a radiofrequência[5], provendo assim mais facilidade e liberdade para a comunicação.

Tabela 1 - Espectros de frequência

	Comprimento de onda	Frequência
Visível	380 nm – 750 nm	405 THz – 790 THz
Infravermelho	750 nm – 1 mm	300 GHz – 405 THz
Radio	1 mm – 100 km	3 Hz – 300 GHz

2.2 *Visible Light Communication (VLC)*

A comunicação via luz visível pode ser vista como uma tecnologia nova, mas este tipo de comunicação existe há milhares de anos. Um exemplo é a utilização de fumaça em sociedades antigas e os faróis utilizados para guiar embarcações no oceano. Todavia, foi em 1880 que aconteceu o primeiro experimento em que se transferiram dados (áudio) por meio de luz visível. Este experimento foi realizado por Alexander Graham Bell e ficou conhecido como foto-fone. Nele foi utilizado um espelho que sofria interferência do som e acabava por transmitir esta interferência por meio da luz refletida[7].

O espectro de frequência da luz visível, como pode ser visto na Tabela 1, é 1000 vezes maior que o do rádio, fazendo com que haja uma banda ilimitada para utilização. Outro benefício, que também contempla o IR, é o fato de não existirem regulamentações em sua banda. A VLC possui os mesmos benefícios de segurança que o IR, já que a luz não atravessa obstáculos opacos.

A utilização de LED's foi adotada pela maioria dos pesquisadores para prover a comunicação por luz visível, já que o LED pode piscar em uma alta frequência sem danificar e sem que o olho humano perceba esta operação[7]. Os LED's têm tido cada vez mais utilização e estão, aos poucos, substituindo as lâmpadas incandescentes e fluorescentes. Com isso, a tecnologia já tem abertura para operar, visto que seu principal material já obteve aceitação na sociedade.

Esta tecnologia de comunicação é promissora, porém pouco estudada. Os RGB LED's são interessantes por não necessitarem de estimulação de fósforo, fazendo com que o processo de piscar fique mais rápido, propiciando uma taxa de transferência de 100Mbps. Tem-se estudado, atualmente, os RCLED's, que utilizam cavidades ressonantes para aumentar a potência e elevar a taxa de transmissão à ordem de 500Mbps[7].

Há alguns fatores que dificultam a utilização desse serviço, como a necessidade de transmissores e receptores estarem alinhados para haver perfeita comunicação. Outro ponto que pode causar problemas é a existência de outra fonte de luz mais forte do que a de transmissão de dados, já que ela interfere na comunicação e faz com que o receptor não detecte a mensagem.

Uma grande vantagem está na própria questão da interferência, já que uma WLAN (*Wireless Local Area Network*) não interfere em uma VLC, assim como nenhuma outra onda não pertencente ao espectro de luz visível. Outro ponto favorável é não prejudicar a saúde, pois não havendo excesso de potência, não há indícios de danos à saúde humana.

Há aplicações tidas como carro-chefe para a VLC: serviço de transporte e localização de cadeirantes em hospitais; captação de dados para análise de obras em museus; comunicação entre veículos, comunicação dentro de aeronaves (Figura 4) e, o que mais interessa a este trabalho, seu uso como complemento a outras formas de transmissão de dados, como PLC[7].



Figura 4 - Comunicação por VLC em uma aeronave

2.3 Power Line Communication (PLC)

A PLC aparenta ser um tanto exótica, partindo do princípio que cabos de energia foram projetados exclusivamente para a distribuição eficiente de energia elétrica. Porém, com o cenário atual, em que se busca a não instalação de novos cabos, esta tecnologia começou a ser estudada como uma alternativa para comunicação de dados.

Alguns estudos tentaram aumentar a banda de transmissão da PLC para 100MHz, porém, como veremos mais adiante, ainda não há regulamentação para frequências acima de 30MHz. Em laboratório, foi atingida uma velocidade de transmissão de dados de 1Gbps. Entretanto, esta taxa ainda não é viável na prática, visto que existe atenuação e, principalmente, interferência neste tipo de transmissão.

A utilização de transmissão via *Wireless* parece ser uma solução mais simples, pois também não necessita da instalação de novos cabos e já é uma tecnologia estudada e sedimentada no mercado. Todavia, como mostra a Figura 5, a perda em decorrência da distância é muito maior quando comparada à PLC. Na maior distância analisada, a velocidade provida por IEEE 802.11g foi de 22Kbps, enquanto que na PLC a velocidade estava em 14,8Mbps[8].

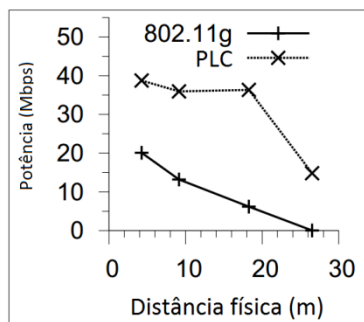


Figura 5 - Perda da potência com o aumento da distância[8].

O desempenho da PLC é interessante em frequências de até 100MHz, depois disso o sinal recebido é bem menor do que o fornecido pela fonte. Outro ponto relevante é a faixa já regulamentada, que vai até 30MHz. Por isso, a maior parte dos sistemas atuais trabalham na vizinhança desta frequência. A Figura 6 mostra o sinal recebido e o ruído presente na faixa de frequência de 0 a 100MHz. A relação sinal-ruído (SNR) é igual à área entre o sinal recebido e o ruído[9].

Fazendo a análise da utilização simultânea da comunicação por dados e de aparelhos que utilizam a energia elétrica, vemos, a partir da Figura 7, que existe uma perda considerável na taxa de dados e que, com a utilização de diversos aparelhos elétricos, esta tecnologia pode se tornar inviável. Entretanto, é importante salientar que a PLC é uma tecnologia nova e existem muitos estudos sendo feitos para diminuir esta perda apresentada[8].

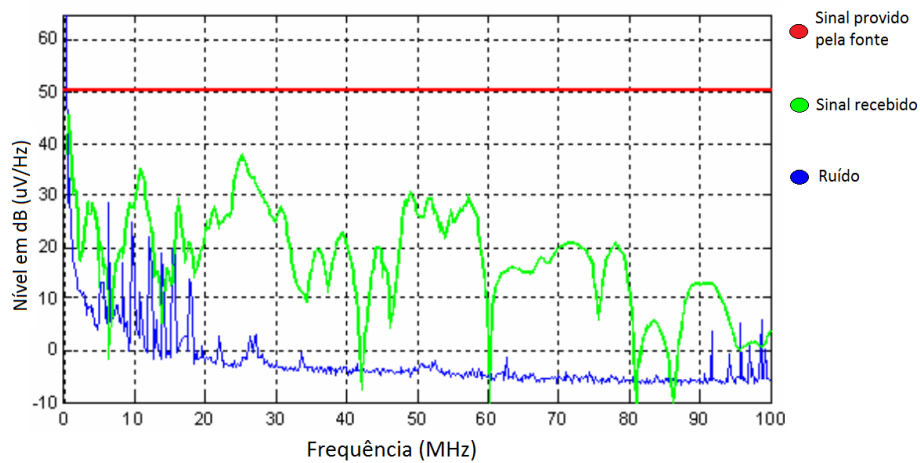


Figura 6 - Relação entre o sinal de entrada, o de saída e o ruído[9].

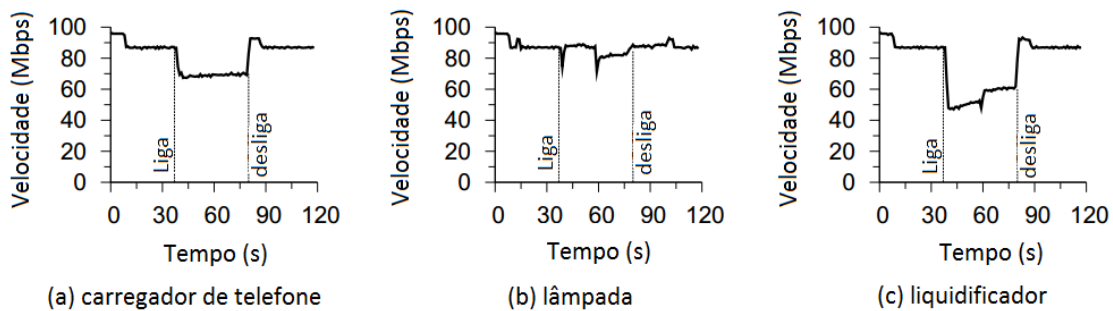


Figura 7 - Perda de potência com utilização simultânea [8].

2.4 *Plastic Optical Fiber (POF)*

A fibra óptica de plástico é um guia de onda e difere da tradicional fibra óptica de vidro pelo material de que é feito e pelas dimensões do núcleo e da casca. A POF é construída de um polímero altamente transparente: para pequenas distâncias, ideal para o ambiente doméstico, o material mais utilizado é o acrílico (polimetil-metacrilato). O seu diâmetro, como podemos ver na Figura 8, é cerca de oito vezes maior que da fibra tradicional. Seu núcleo é espesso e, ao contrário da fibra de vidro, sua casca é mais fina[10].

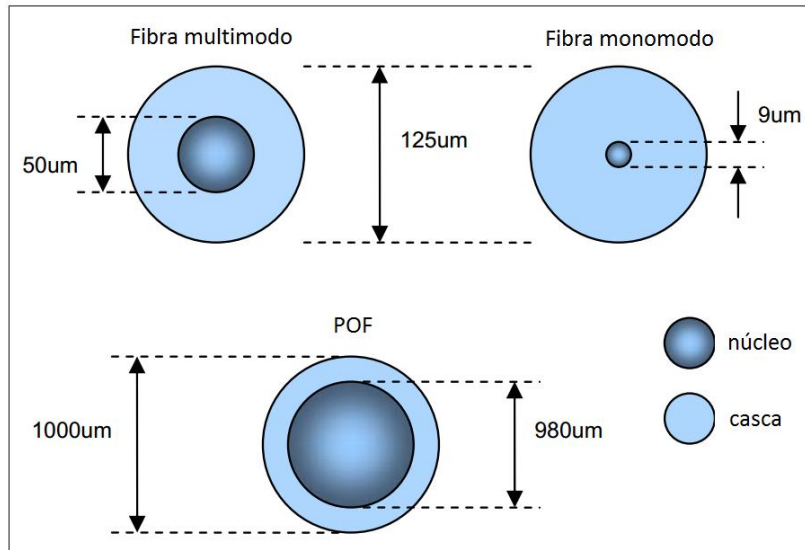


Figura 8 - diferentes fibras e suas dimensões[10].

A dimensão maior do núcleo facilita o alinhamento das fontes luminosas, que junto com o custo de produção são os maiores responsáveis pelo valor monetário da POF. A Figura 9 mostra um LED emitindo luz diretamente em uma fibra óptica de plástico. Como pode ser visto, esta fibra opera com luz visível e, graças ao aprimoramento das fontes (LED e *laser*), atinge velocidade de cerca de 10Gbps[11]. Ela possui as vantagens de ser leve, barata e simples de instalar, além da já citada capacidade de prover alta taxa de dados.

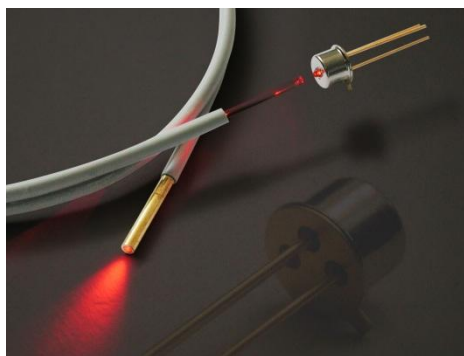


Figura 9 - LED emitindo luz em uma POF

O surgimento da POF precede ao da fibra de vidro. Ela foi criada como alternativa barata ao tradicional cabo de cobre. Uma importante qualidade é que ela não emite radiação e nem tampouco sofre interferência de ondas eletromagnéticas. Outro benefício interessante é a possibilidade de se fazer curvaturas fortes com o cabo, pois ele é mais resistente[10].

2.5 *Fiber-to-the-x (FTTx)*

A denominação FTTx é dada às arquiteturas em que cabos de fibra óptica alcançam as residências (FTTH - *Fiber-to-the-Home*), os escritórios (FTTO - *Fiber-to-the-Office*), os prédios dos usuários (FTTB - *Fiber-to-the-Building*) e as caixas de distribuição (FTTC - *Fiber-to-the-Cabinet* / FTTN - *Fiber-to-the-Node*). A Figura 10 ilustra todas elas: a FTTN corresponde à fibra terminando a mais de 300 metros do ambiente doméstico, na caixa de distribuição da rua, ou do bairro; FTTC é similar à FTTN, porém a caixa de distribuição é mais próxima do usuário (menos de 300 metros); FTTB especifica o caso em que a fibra chega aos limites do prédio; finalmente, a FTTH/O provê a chegada de fibra óptica ao ambiente do usuário.

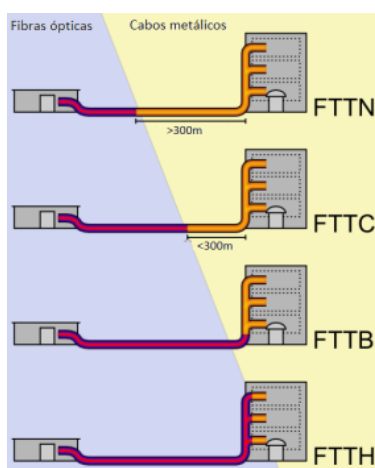


Figura 10 - Diferentes estruturas com fibras ópticas[12].

A capacidade de transmissão da fibra é praticamente ilimitada, tanto na descida quanto na subida de dados, sendo incomparavelmente superior aos cabos tradicionais feitos de cobre. Existem vários modelos financeiros que mostram pouca diferença no custo de implantação destas duas tecnologias (considerando a mesma capacidade de taxa de bits). Além do custo similar e da alta largura de banda, a fibra óptica possui maior potencial de aprimoramento, necessita de menos manutenção e o custo de operação é menor quando comparado aos cabos de cobre[13].

Por todas estas vantagens, é possível concluir que quanto mais próxima a fibra estiver do usuário, melhor conexão ele terá. Porém, são necessárias obras para a passagem das fibras e, considerando que já existem outras tecnologias via cabo implantadas, é possível que a relação entre custo e benefício não seja boa. Outra

tecnologia que concorre com as fibras são as de espaço livre, podendo ser ópticas ou mesmo na região de radiofrequência.

2.6 *Free Space Optical (FSO)*

A comunicação ótica pelo espaço livre é uma tecnologia de transmissão em que os dados são enviados com a utilização de um feixe ótico com grande diretividade. Ao contrário da transmissão via fibra ótica, a FSO não utiliza nenhum guia para se orientar. No entanto, os *links* devem estar alinhados para que a comunicação seja possível. Um *link* ótico é exemplificado na Figura 11.



Figura 11 - *link* ótico

Ela apareceu como alternativa à comunicação via radiofrequência, sendo uma tecnologia que provê maior velocidade, mas que não permite tanta mobilidade. Suas aplicações vão desde *links* curtos na transmissão de redes de acesso, até comunicação com satélites e sondas no espaço profundo.

A FSO apresenta um feixe de luz estreito, e é uma boa alternativa para substituir a fibra ótica em locais onde a instalação de dutos não é viável. É intuitivo chamar a FSO de *Light-to-the-x*, fazendo uma paráfrase com *Fiber-to-the-home*. Como seu feixe ótico é estreito, há boa segurança, possui seletividade espacial, ou seja, não há interferência com outros *links* óticos e, também, não é necessária licença, já que a banda utilizada está fora da área regulamentada.

Como toda tecnologia, ela também apresenta desvantagens. Qualquer efeito que torne o meio mais refringente irá causar perda de sinal óptico. Alguns exemplos são: chuva, neblina, neve, poluição, dentre outros. Por isso é interessante que *links* ópticos tenham ganho automático de potência, para em situação adversas continuarem com a operação uniforme.

2.7 Projeto OMEGA

A cada dia que passa, aumenta o número de itens que exigem transferência de dados em um ambiente doméstico. E, a cada momento, a busca por uma taxa de *bits* mais elevada tem se mostrado mais presente. Isto se dá pela grande quantidade de aplicações que necessitam de alta taxa de dados, pelo aumento do número de dispositivos e também pela maior comunicação entre eles.

Já existem tecnologias implantadas para prover grande quantidade de dados até chegar ao ambiente doméstico, como FTTH. Com isso, a preocupação com a velocidade tem sido transferida para o ambiente residencial, pois a comunicação via padrão IEEE802.11 não atinge a casa de 1Gbps, fazendo com que a transferência de dados no ponto final se torne o gargalo de toda a rede[14]. Portanto, o futuro das conexões de dados não está no espectro da radiofrequência, já que este também está saturado, possui grande quantidade de regulamentações e tem uma banda estreita, o que causa interferências e baixa possibilidade de múltiplos usos. Neste contexto a tendência é de um crescimento nas conexões por OW, com uma rede de transporte de PLC ou de POF.

Foi nesta conjuntura que surgiu o projeto OMEGA (*Home Gigabit Access*), o qual consiste na definição de um padrão mundial de alta banda para redes em áreas residenciais. Este projeto criou uma camada intermediária para o modelo OSI, conhecida como Camada *Inter-MAC* (ou Camada 2,5 do modelo OSI), que veio para esconder a heterogeneidade de conexões por cabo ou via ar, fazendo com que estas duas estruturas pudessem se comunicar sem problemas de compatibilidade[4].

Os estudos do OMEGA trabalham com basicamente três tecnologias: transmissão por cabos de energia elétrica (PLC - *Power Line Communication*),

comunicação por infravermelho (IR - *Infrared*) e comunicação por luz visível (VLC - *Visible Light Communication*). O uso destas tecnologias isoladas ou em conjunto pode trazer a taxa de transferência de dados para a casa dos *Gigabits*, possibilitando o contínuo aumento da demanda por dados no ambiente doméstico.

Outro ponto de estudo do OMEGA é a facilidade de instalação destas novas tecnologias, bem como o baixo custo, tornando a comunicação por dados mais um serviço para o ambiente doméstico, como a energia elétrica, o fornecimento de água e gás e, a rede de esgoto.

3 Avaliação das tecnologias de dados no ambiente doméstico

No trabalho de Dede *et al.*[1], foram selecionados onze participantes do projeto OMEGA, obtendo um número balanceado de pessoas dos meios acadêmico e industrial de várias partes da Europa. O tamanho deste grupo está dentro do aceitável para esta metodologia, segundo os autores. As pesquisas ocorreram em um período de três meses, de setembro a novembro de 2010, e foram feitos três diferentes levantamentos:

Pesquisa 1: Decisão dos critérios e fatores

Pesquisa 2: Classificação das alternativas para o cenário residencial

Pesquisa 3: Classificação das alternativas para o cenário comercial

Na Pesquisa 1, os especialistas decidiram critérios iguais tanto para o ambiente doméstico quanto para pequenos escritórios. Já nas pesquisas 2 e 3, eles tiveram que responder de acordo com cada cenário de rede. A projeção deveria ser feita no período de 2011 a 2015.

Esta seção do capítulo está organizada da seguinte forma: primeiramente há uma explicação do AHP (*Analytical Hierarchy Process*). Em seguida, serão apresentados os dados levantados pela pesquisa 1. A seção subsequente apresentará os resultados da pesquisa 2 e da pesquisa 3 para, na próxima parte, haver uma análise estatística dos resultados apresentados, com a perturbação dos dados a partir de cálculos estocásticos, assim validando o que foi originalmente obtido e publicado por Dede *et al.*[1].

3.1 Analytical Hierarchy Process (AHP)

O AHP é uma ferramenta criada em 1970, que ajuda na tomada de decisões complexas. Ele engloba tanto análise qualitativa quanto quantitativa e, a partir de matrizes, é feita a decisão do melhor caminho a seguir. Sua utilização se espalha

pelos mais diversos campos, dentre os quais podemos citar: governo, negócios, saúde e educação.

A AHP utiliza três níveis conceituais, como mostra a Figura 12. Considerando o problema atual, o objetivo é a avaliação das tecnologias ópticas para redes domésticas, ou seja, os cinco cenários levantados na Introdução serão agora classificados e as importâncias das questões social, econômica e de desempenho serão mais bem classificadas.

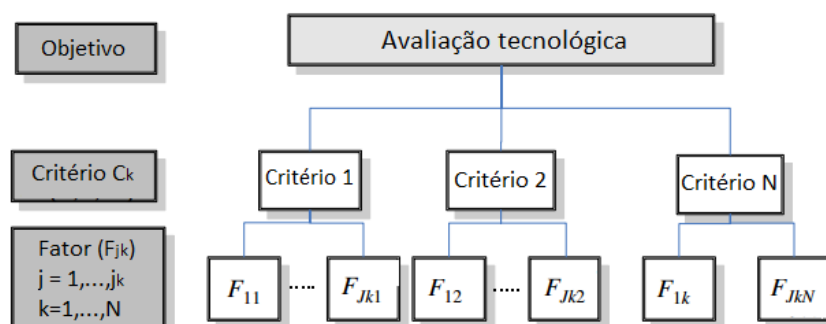


Figura 12 - Modelo hierárquico para avaliação de tecnologias[1].

No próximo nível são definidos os critérios em que a avaliação será baseada. Cada um representa um aspecto importante para a avaliação. Estes critérios serão depois representados pelos seus fatores, que estão no nível subsequente. Portanto um fator nada mais é do que uma característica do critério ao qual é subordinado. Por exemplo: custo do equipamento e custo de manutenção são dois fatores do critério econômico. Se considerarmos N como o número total de critérios escolhidos, então podemos chamar de C_k cada um deles, em que k é um inteiro entre 1 e N . Os fatores do critério C_k são denominados de F_{jk} , em que j varia entre os números de fatores do critério específico ($1 \leq j \leq J_k$).

Para a classificação das tecnologias, devem-se avaliar os pesos dos critérios (w_k) e o peso dos fatores (f_{jk}). Para tanto, é feita uma série de comparações par-a-par (PWC) e é montada uma matriz $N \times N$ (matriz **A**) para cada especialista entrevistado, apenas com os elementos acima da diagonal principal:

$$A = \begin{pmatrix} & A_{12} & A_{13} \\ & & A_{23} \\ & & & \dots \end{pmatrix}$$

No caso dos critérios, é feita a comparação de cada critério C_i com o critério C_j . Se o especialista entrevistado sugerir que $A_{12} = 60$, isso implica que de acordo com seu ponto de vista, C_1 possui 60% do peso dos critérios C_1 e C_2 juntos. Utilizando estes elementos da matriz \mathbf{A} , é montada a matriz \mathbf{P} , em que os elementos da diagonal principal ($i = j$) são iguais a: $P_{ij} = 1$; os elementos acima dela ($i < j$) são iguais a: $P_{ij} = A_{ij}/(100 - A_{ij})$; e os elementos abaixo ($i > j$): $P_{ij} = 1/P_{ji}$, ou seja:

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} 1 & A_{12}/(100 - A_{12}) & A_{13}/(100 - A_{13}) \\ (100 - A_{12})/A_{12} & 1 & A_{23}/(100 - A_{23}) \\ (100 - A_{13})/A_{13} & (100 - A_{23})/A_{23} & 1 \end{pmatrix}$$

Depois de montada a matriz, é necessário calcular o autovetor correspondente ao maior autovalor da matriz \mathbf{P} . Este vetor é depois normalizado para que a soma dos seus elementos seja igual a 1.

Todo esse procedimento é feito para os critérios e para os fatores, finalmente também são avaliadas cada uma das alternativas, que obterão uma pontuação S_{ijk} para cada fator F_{jk} . A prioridade final (T_i) de cada alternativa é calculada a partir da multiplicação da pontuação relativa S_{ijk} pelo peso global, dado por $f_{jk} \cdot w_k$, do fator correspondente:

$$T_i = \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^{J_k} S_{ijk} f_{jk} w_k \quad (1)$$

As matrizes \mathbf{P} de cada especialista devem possuir elementos da forma q_i/q_j , em que q_i e q_j são números reais positivos. Na pesquisa feita por Dede *et al.*[1], ainda foi utilizada uma medida de consistência chamada *Consistency Ratio* (CR), que também ficou dentro do aceitável.

Para exemplificar o uso da ferramenta AHP, iremos supor uma indecisão entre as tecnologias 'A' e 'B'. Existirá um único critério, o técnico, e este terá três fatores: *upstream*, *downstream* e *cobertura*. A Tabela 2 mostra a capacidade de cada tecnologia em prover cada um dos fatores.

Tabela 2 - Peso dos fatores para cada tecnologia

Tecnologia	Fatores		
	<i>Upstream</i> (F1)	<i>Downstream</i> (F2)	<i>Cobertura</i> (F3)
A	0,7	0,4	0,8
B	0,3	0,6	0,2

Dando início à comparação por pares, temos formada a matriz **A** e, posteriormente, a matriz **P**. Elas estão representadas abaixo, assim como o autovetor correspondente à matriz **P**.

$$A = \begin{pmatrix} & 33,3\% & 75\% \\ & & 80\% \end{pmatrix} \quad P = \begin{pmatrix} 1,000 & 0,500 & 3,000 \\ 2,000 & 1,000 & 4,000 \\ 0,333 & 0,250 & 1,000 \end{pmatrix}$$

$$\text{autovetor}(P) = \begin{pmatrix} 0,3196 \\ 0,5584 \\ 0,1220 \end{pmatrix}$$

Agora é feita a multiplicação do potencial de cada tecnologia por seu referente elemento do autovetor:

$$\text{Tecnologia 'A'} = (0,7 \times 0,3196) + (0,4 \times 0,5584) + (0,8 \times 0,1220) = 55\%$$

$$\text{Tecnologia 'B'} = (0,3 \times 0,3196) + (0,6 \times 0,5584) + (0,2 \times 0,1220) = 45\%$$

Com isso é possível concluir que para o caso mostrado, a tecnologia mais apropriada é a 'A', com 55% de preferência frente a 45% da tecnologia 'B'.

3.2 Pesquisa 1

A Tabela 3 mostra o resultado da Pesquisa 1, descrevendo cada um dos quatro critérios levantados e seus respectivos fatores, com o peso de cada um para a análise por hierarquia (AHP).

Os resultados apresentados por esta tabela mostram que o critério que mais deve ser levado em conta é a aceitação social (Critério 4), com 31,24%. Isso mostra que os usuários precisam ter certeza dos benefícios trazidos por tecnologias ópticas, que apesar de parecerem exóticas e futurísticas, já podem fazer parte do cotidiano, provendo conexões na casa de 1Gbps. Uma forma de ambientar as pessoas a este tipo de tecnologia é promover a divulgação dos seus benefícios, como a grande largura de banda, sua alta velocidade de conexão, a segurança contra ataque de *hackers* etc.

O segundo critério com mais importância é o econômico (Critério 3), vindo antes mesmo dos critérios técnicos de conexão. Isso mostra que não adianta oferecer um serviço com capacidades técnicas extraordinárias se o seu custo não for compatível com os das tecnologias já segmentadas no mercado. Os usuários já possuem equipamentos de radiofrequência que conseguem atingir 100Mbps, então eles precisam identificar o benefícios de uma nova tecnologia para aceitar a troca de seus equipamentos e, para ter um novo custo. Apenas um acréscimo na velocidade de conexão não garante que uma tecnologia entre no mercado. Ela precisa chegar com um preço acessível.

Os critérios de performance receberam os menores pesos, sendo a performance de chegada ao dispositivo (Critério 1), o mais importante. Tal resultado se deve ao já discutido fato de que o ponto final das redes em ambiente doméstico estar se tornando o gargalo do sistema e também pelo alto número de dispositivos, como impressora, videogame, smart TV, tablets, notebooks, etc.

No entanto, a rede de acesso (Critério 2) também deve ser levada em consideração e as formas de aprimoramento das diferentes conexões são muito importantes para evitar perda de velocidade. Apesar de o critério de aceitação social ter apresentado maior peso, todos os demais se mostraram igualmente relevantes, sugerindo a complexidade de se projetar uma rede inovadora.

Partindo para a análise dos fatores, verificamos quatro deles para o Critério 4 (aceitação social). O F_{44} (compatibilidade com sistemas antigos) é o mais influente, já que se não houver compatibilidade, todo o sistema já existente deverá ser trocado, o que aumenta, além de trabalho, custo. Isso mostra a preocupação dos especialistas em projetar sistemas sempre compatíveis com plataformas antigas. Em seguida vem o F_{43} (usabilidade), pois devemos ter tecnologias fáceis de operar e com funcionamento parecido com sistemas já existentes, para que o usuário não tenha problemas com seu uso.

A questão de saúde (F_{41}) também recebeu uma boa parcela de relevância, pois, a cada dia, a preocupação com possíveis danos causados por ondas eletromagnéticas tem aumentado. PLC e POF são tecnologias que impossibilitam contato, já que as ondas ficam confinadas em cabos, IR e VLC também possuem segurança à saúde, pois a frequência que utilizam não causa danos ao homem, que já está exposto a este tipo de radiação há milhares de anos. Este fator pode ter o seu peso elevado em relação aos outros quando se trata de ambientes hospitalares e clínicas de saúde.

Tabela 3 - P₁: Critérios, fatores e seus respectivos pesos

Fatores	Descrição	Importância (fik)
Critério 1 - Performance na chegada ao dispositivo (w₁ = 23,90%)		
F11 - Alcance	Máxima distância que permite máxima eficiência de <i>downstream</i>	21,6%
F12 - Cobertura	A área de um cômodo típico que pode ser coberta por um sistema simples	27,1%
F13 - Eficiência de <i>downstream</i>	Máxima eficiência que pode ser provida em <i>downstream</i>	31,1%
F14 - Eficiência de <i>upstream</i>	Máxima eficiência que pode ser provida em <i>upstream</i>	20,2%
Critério 2 - Performance da rede de acesso (w₂ = 20,38%)		
F21 - Alcance	Máximo comprimento de cabo que permite máxima eficiência de <i>downstream</i>	36,2%
F22 - Eficiência de <i>downstream</i>	Máxima eficiência que pode ser provida em <i>downstream</i> nas conexões da rede de acesso	38,7%
F23 - Eficiência de <i>upstream</i>	Máxima eficiência que pode ser provida em <i>upstream</i> nas conexões da rede de acesso	25,1%
Critério 3 - Análise econômica (w₃ = 24,48%)		
F31 - Custo de instalação (mão-de-obra)	Mão-de-obra para instalação do equipamento em ambiente típico (2cômodos, banheiro + sala de espera) incluindo rede de transporte	27,8%
F32 - Custo do equipamento	Custo do equipamento para ser instalado num ambiente típico (2cômodos, banheiro + sala de espera)	39,9%
F33 - Custo de manutenção	Custo anual para manutenção do equipamento, incluindo rede de transporte e contas mensais	32,3%
Critério 4 - Aceitação social (w₄ = 31,24%)		
F41 - Questões de saúde	Questões de saúde são importantes? (padrões de exposição a radiação, segurança dos olhos e da pele)	24,3%
F42 - <i>Design</i> com tecnologia sem cabo	É necessária instalação de novos cabos? Como fica a combinação da decoração com eles?	20,1%
F43 - Usabilidade	Qual a dificuldade de operar o novo sistema do ponto de vista de um usuário comum?	25,9%
F44 - Compatibilidade com sistemas antigos	A nova rede é compatível com redes e aplicações já existentes?	29,7%

O fator de tecnologia sem cabo (F₄₂) mostrou ser menos relevante, não por ser desnecessário, mas pelo alto peso dos outros fatores. Contudo, é bom notar que um usuário doméstico está menos disposto a instalar novos cabos em sua residência do que um usuário comercial estaria em instalar novos cabos em seu escritório. Levando isto em consideração, é fácil prever que novas tecnologias vão se intrometer o menos possível nos ambientes e a comunicação via luz visível é a mais adequada para isso. É importante notar que por este critério, mesmo as fibras ópticas possuindo maior banda e cobertura para novos prédios, *wireless* e PLC são mais bem vindas em

construções antigas, em que a instalação de novos cabos causa transtornos ao usuário.

Analisando os fatores referentes ao Critério 3 (econômico), vemos que o mais relevante é o custo do equipamento, seguido do custo de manutenção e de instalação, que também são importantes para sua composição. Estes resultados já eram esperados, já que a questão econômica é sempre determinante nos mais diferentes ramos da sociedade. Para as tecnologias sem fio estudadas será necessária a instalação de diversos equipamentos, como roteadores no teto dos cômodos e novas lâmpadas, o que aumenta a importância do custo. É sempre bom lembrar que, em se tratando de mercado, o preço ideal flutua com as curvas de demanda e oferta[15]. Quando a demanda por um novo serviço aumenta, há um deslocamento no ponto de equilíbrio, assim como mostra a Figura 13, diminuindo o custo do produto.

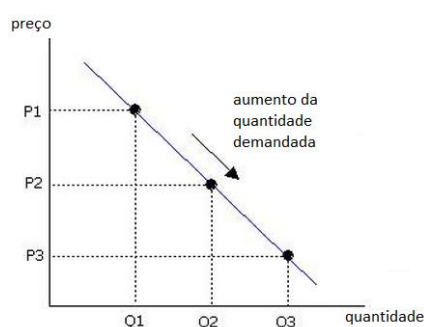


Figura 13 - Curva de demanda.

Focando na performance de chegada aos dispositivos (Critério 1) temos a eficiência de *downstream* (F_{13}) como fator preponderante, já que muitos dispositivos são assimétricos, ou seja, necessitam mais de descida de dados do que de subida, *i.e.* HDTV, internet. Mas a eficiência de *upstream* (F_{14}) também tem sua importância, considerando que vídeo conferência e jogos *online* têm sido cada vez mais frequentes. O fator cobertura (F_{12}) foi classificado em segundo lugar e, para a tecnologia estudada, é um fator muito importante. Sistemas OW precisam ser *line-of-sight* (LOS), ou seja, é necessário que o dispositivo de envio de dados esteja alinhado com o receptor para haver melhor transferência de potência. Por isso, é esperado que a tecnologia híbrida, que envolve IR e VLC, seja mais bem qualificada neste fator, pois VLC possui melhor cobertura.

A análise do Critério 2 é similar à feita para o Critério 1, porém com mais peso ao fator alcance, visto que quanto mais perto uma fibra óptica chega ao usuário, melhor é a banda provida. Os fatores de *Downstream* e *Upstream* apresentaram 38,7% e 25,1%, respectivamente, por causa da maior demanda por aplicações de *down*.

3.3 Pesquisa 2 e Pesquisa 3

Após a montagem da Tabela 3, foram feitas comparações par-a-par (PWC) que resultaram na Tabela 4, para o ambiente residencial, e na Tabela 5, para o ambiente de escritório. Para facilitar a visualização e a análise de cada alternativa, foram feitas as Figuras 14 e 15, que mostram os diferentes pesos dos cenários para cada critério estudado.

No âmbito residencial, vemos que, para os critérios 1 e 2, o maior peso fica por conta das tecnologias ligadas à comunicação via rede elétrica. Já para análise em escritório, o cenário de maior peso é o todo com POF. Focando no fator de cobertura (F_{12}), vemos uma diferença significativa das redes híbridas (IR e VLC) sobre as redes apenas com IR. Isso acontece porque na conexão por infravermelho é necessário que os dispositivos estejam mais alinhados, o que diminui a área de cobertura. No alcance (F_{11} e F_{21}) é possível notar, no ambiente comercial, melhor desempenho por parte da rede toda montada com POF, já que o sinal fica sempre confinado na fibra e a perda é muito pequena, podendo chegar a maiores distâncias. Porém, no ambiente doméstico estes fatores ficam com características aleatórias, sem uma tendência definida. Quanto à eficiência de descida (F_{13} e F_{22}) e subida (F_{23} e F_{14}) de dados, as redes que utilizam PLC se mostram superiores às que utilizam POF.

Trazendo o foco para a análise econômica (Critério 3), notamos uma preferência pela rede toda em POF em detrimento às outras. Isso acontece por causa do baixo custo desta tecnologia e da menor mão de obra, já que para as outras redes é necessária a instalação de diversas lâmpadas para cobertura de toda a área, o que aumenta o custo de instalação (F_{31}). A despesa referente à manutenção (F_{33}) também é menor para esta tecnologia, visto que é utilizado um menor número de equipamentos, o que reduz o risco de quebra. É importante salientar que, mesmo as tecnologias ópticas utilizando LED, elas são mais propensas à quebra do que tecnologias que passam por cabos. Quando feita a comparação entre comunicação

apenas com IR e a conexão híbrida (IR e VLC), vemos que é preferível, economicamente falando, optar pelas redes híbridas, já que a comunicação de *downstream* seria feita em grande parte por VLC, que é uma tecnologia mais barata.

Tabela 4 - Resultado da Pesquisa P2

	Residência				
	PLC/IR LOS	PLC híbrido	POF/IR LOS	POF híbrido	Todo POF
C1	25,9	23,5	16,8	16,3	17,5
f11	25	19	17	17	23
f12	23	27	16	21	13
f13	27	24	18	14	16
f14	29	23	16	13	20
C2	19,7	24,3	19,0	18,3	19,0
f21	16	26	20	20	19
f22	23	23	18	17	19
f23	20	24	19	18	19
C3	20,0	23,5	14,9	14,6	27,0
f31	20	22	15	15	28
f32	20	29	14	14	23
f33	20	18	16	15	31
C4	21,9	20,4	19,0	19,0	19,7
f41	18	18	19	20	25
f42	28	27	15	18	12
f43	22	19	22	20	17
f44	21	19	19	18	23

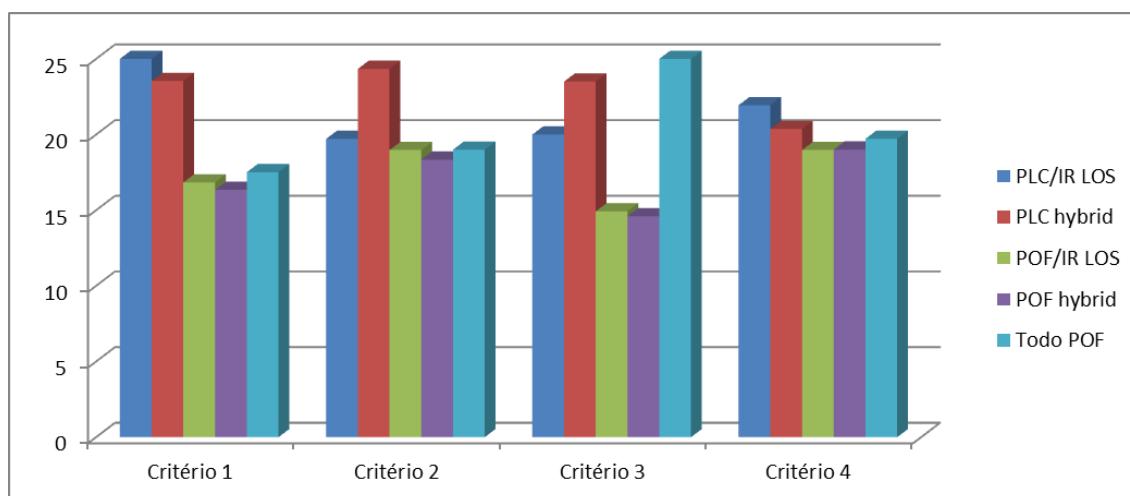


Figura 14 - Classificação dos cenários para cada critério no ambiente residencial.

Tabela 5 - Resultado da pesquisa P3

	Escritório				
	PLC/IR LOS	PLC híbrido	POF/IR LOS	POF híbrido	Todo POF
C1	21,0	25,3	16,7	17,2	20,0
f11	18	20	16	17	28
f12	20	30	16	22	13
f13	22	27	17	14	20
f14	24	22	18	16	21
C2	19,7	20,7	18,0	18,1	22,9
f21	18	21	19	19	23
f22	21	21	17	18	22
f23	20	20	18	17	24
C3	19,2	22,5	16,8	18,3	23,2
f31	17	20	15	19	28
f32	21	23	18	18	20
f33	19	24	17	18	23
C4	24,8	21,6	19,8	17,3	16,6
f41	20	19	21	19	21
f42	34	26	18	12	10
f43	23	20	21	19	17
f44	24	22	19	18	17

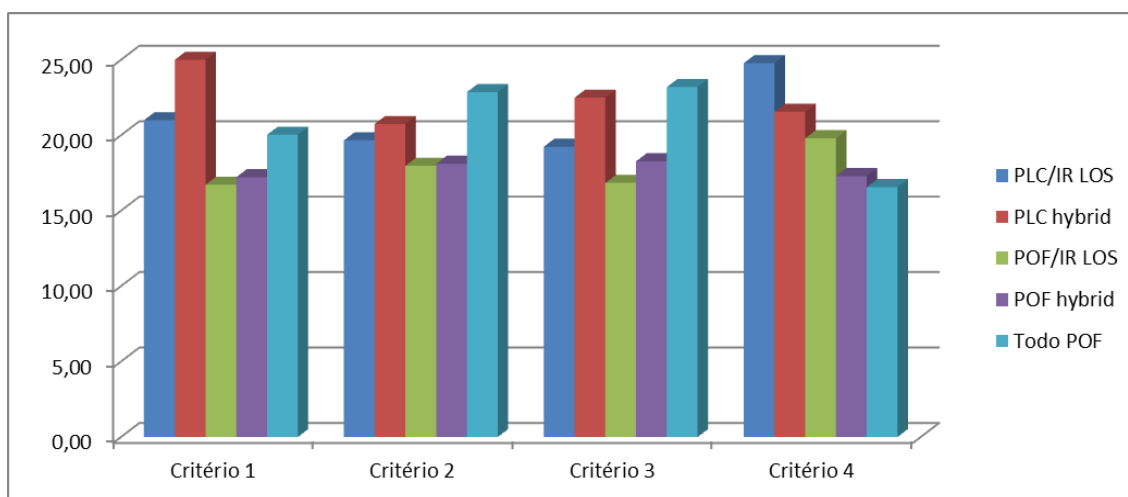


Figura 15 - Classificação dos cenários para cada critério no ambiente de escritório.

A análise da aceitação social (Critério 4) não mostrou surpresas, mostrando vantagem ao cenário 1. Quanto às questões de saúde (F_{41}), a arquitetura toda montada por POF foi superior, já que a radiação fica o tempo todo confinada em cabos, não havendo exposição ao usuário. No fator *Design* com tecnologia sem cabo (F_{42}), as redes com PLC tiveram maior peso, pois não é necessária a instalação de novos cabos. Neste quesito, a rede toda montada com POF ficou em último, já que aumenta o número de cabos e também diminui a mobilidade dos usuários. Nos dados apresentados para usabilidade e compatibilidade com sistemas antigos, não pôde ser definida nenhuma liderança, já que todos os cenários apresentados são baseados em óptica eletrônica.

A partir da Eq. (1), é feito o cálculo do peso final de cada uma das alternativas, assim como mostra a Figura 16. Nela é possível notar que, tanto na residência quanto no escritório, a classificação das alternativas é similar. A arquitetura com rede de transporte de PLC e ponto de acesso híbrido (VLC e IR) foi a mais bem classificada, seguida da arquitetura de PLC com ponto de acesso por IR. Depois vem o cenário em que toda a rede é montada com POF e, com médias bem mais baixas, aparecem os cenários com apenas rede de acesso montada de POF. Neste último caso, a melhor porcentagem é dada ao cenário com acesso por IR, ao invés do acesso híbrido, ao contrário do caso das redes de PLC.

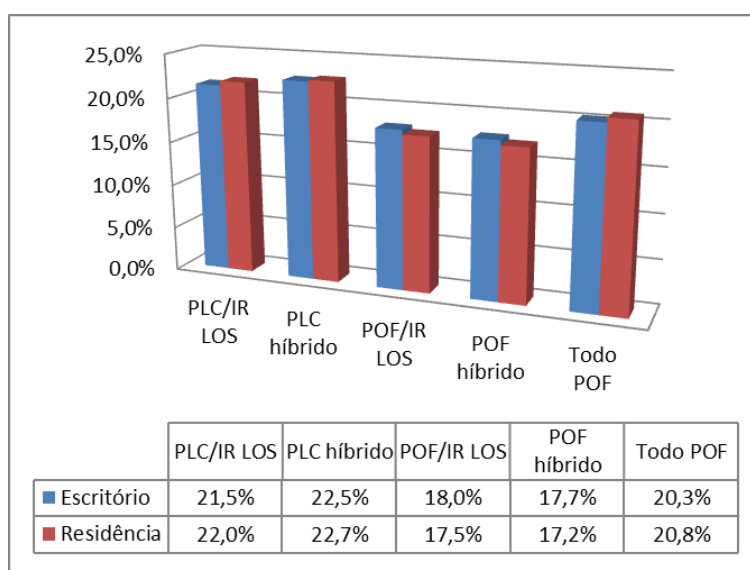


Figura 16 - Classificação dos cenários.

Os resultados mostraram que há algo incerto sobre os pontos de acesso, já que a utilização de OW com POF se mostrou aquém da utilização de POF puro e o conjunto de OW com PLC se mostrou superior aos demais. Portanto, assim como mostra a Figura 17, em que se comparam as redes de acesso feitas com POF e PLC, os cenários onde os dados são transmitidos por meio de cabos de energia elétrica são mais eficientes dos pontos de vista econômico, social e de desempenho, do que a transmissão de dados por POF.

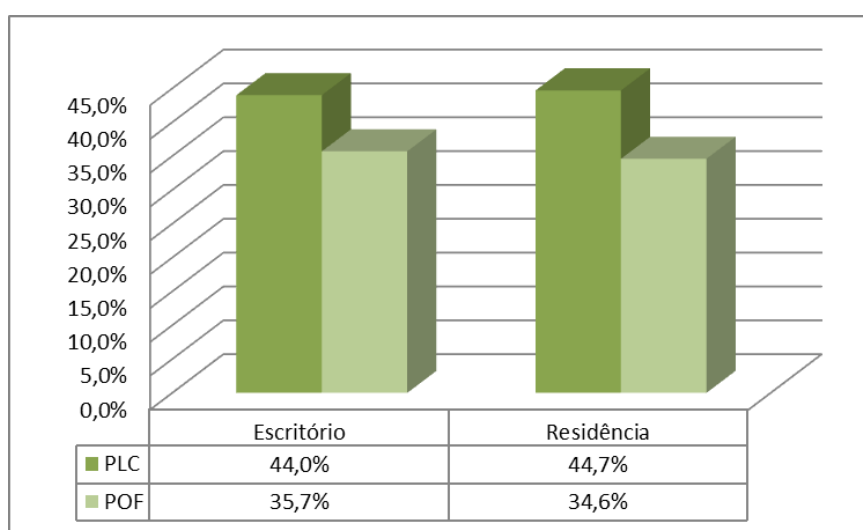


Figura 17 - Gráfico de comparação entre PLC e POF.

3.4 Análise estatística dos resultados

É importante notar que os dados resultantes do AHP poderiam ser diferentes caso fossem entrevistados diferentes especialistas. Com base nisso, esta seção tem a função de analisar os resultados, com o intuito de mostrar se, mesmo com grandes perturbações em critérios e fatores, a classificação dos cenários se mantém.

Primeiramente, vamos variar o critério de maior importância (Critério 4 – Aceitação Social). Os demais critérios sofrem variações proporcionais aos seus pesos, a fim de manter a normalidade dos resultados. Como podemos ver na Figura 18, a significância do Critério 4 sofreu uma variação de 75% para mais e para menos. No âmbito residencial, a ordem é mantida a mesma, com exceção do último ponto, quando a variação é de 75% para mais. Para o escritório, a troca de posições foi grande, e as Figuras 14 e 15 mostram que isso era esperado, já que no ambiente

comercial a variação entre as alternativas no Critério 4 é maior. Porém, quando a variação fica na janela de 25%, que faria com que o critério de aceitação social caísse de 31,24% para 23,43% de importância, não há troca na classificação das alternativas.

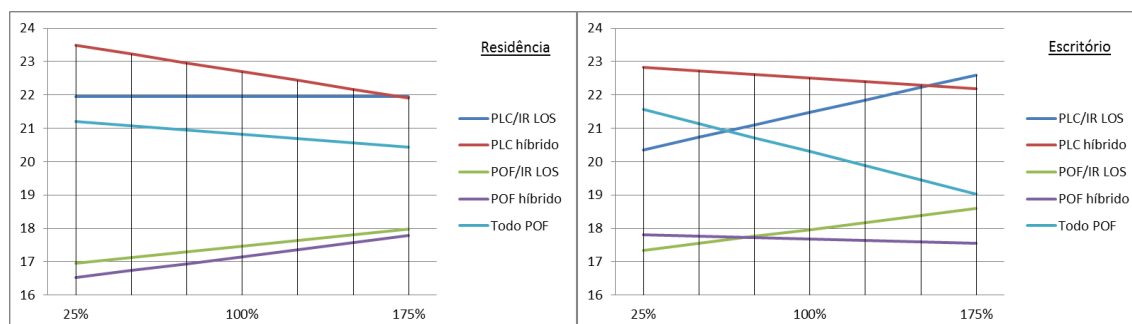


Figura 18 - Variação do critério de maior significância (Critério 4).

Perturbando o peso do fator de maior importância para cada critério, chega-se aos gráficos mostrados na Figura 19, para o âmbito residencial, e na Figura 20, para o âmbito comercial. Em ambos, mesmo com grande variação, não houve troca de posições, o que mostra a solidez dos dados apresentados por Dede *et al.*[1]. O fator que mais influenciou no comportamento das curvas foi o custo do equipamento (F_{32}). Quanto maior o seu peso, menos interessante é o cenário em que toda a rede é montada com POF. As Tabelas 3 e 4 explicam o motivo: A POF é preponderante nos outros fatores do critério econômico, então, quanto mais peso for dado ao fator F_{32} , menor serão os pesos dos outros dois fatores, o que diminui a vantagem deste cenário no quesito econômico.

A Figura 21 mostra o resultado para quando cada fator de maior importância de cada critério sofre uma variação simultânea de 25% a 175% do seu valor. No extremo de uma queda de 75%, há uma pequena inversão de posição entre tecnologias com rede de acesso de POF. Porém, no restante da janela, a classificação permanece a mesma.

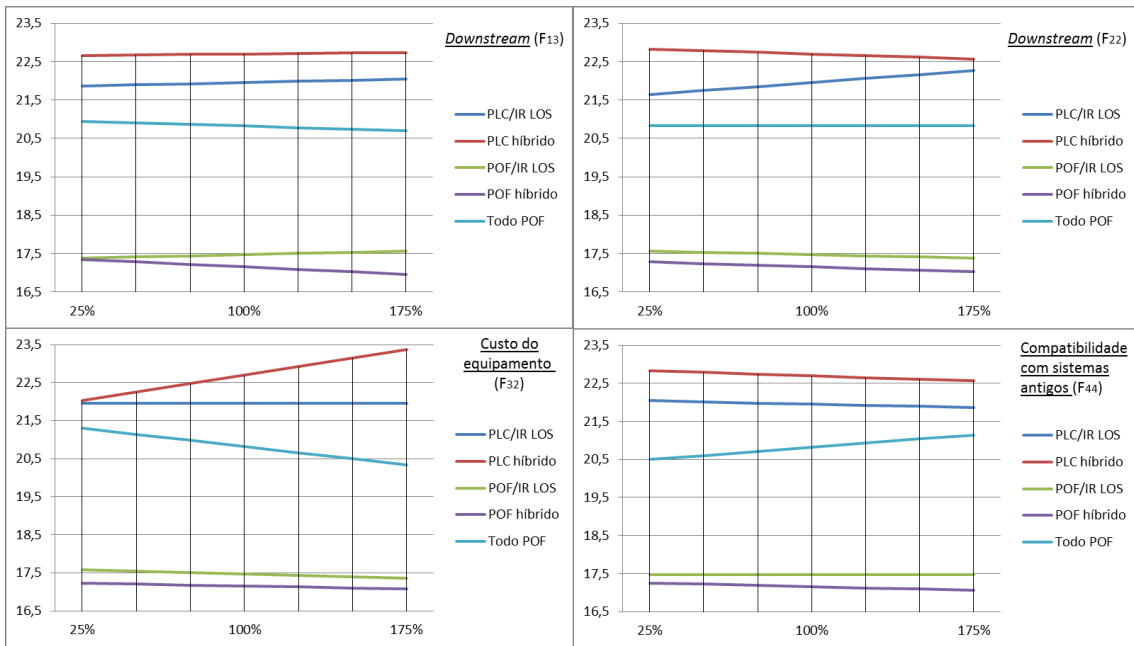


Figura 19 - Variação das relevâncias dos fatores mais importantes de cada critério (Residência).

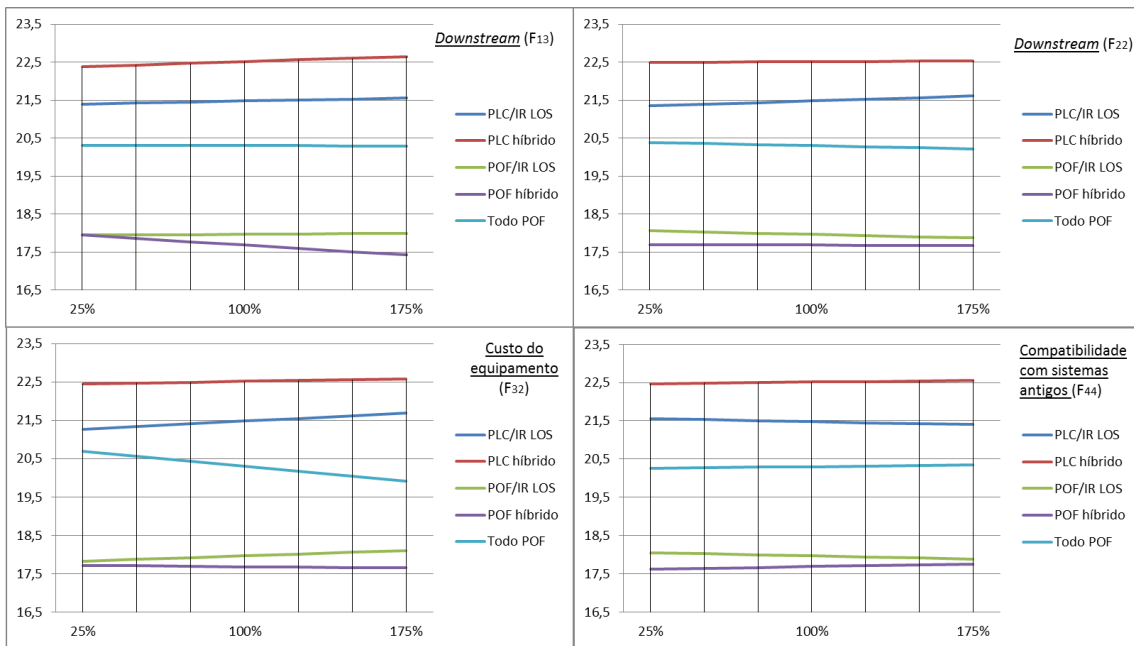


Figura 20 - Variação das relevâncias dos fatores mais importantes de cada critério (Escritório).

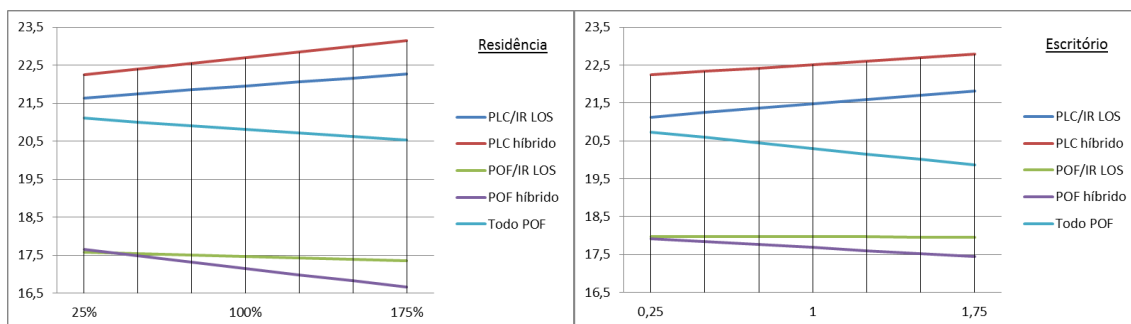


Figura 21 - Variação em igual proporção de todos os fatores de maior peso de cada critério (F₁₃, F₂₂, F₃₂ e F₄₄).

Quando realizada uma variação simultânea dos fatores já mencionados e também do Critério 4, notamos uma perturbação maior nas linhas dos gráficos. A Figura 22 mostra que, no ambiente residencial, só ocorre mudança em variações acima de 50%. Para redes direcionadas a escritórios, a indefinição é grande, com uma variação de mais de 25%. Porém só há mudança na primeira posição quando se varia mais de 50%.

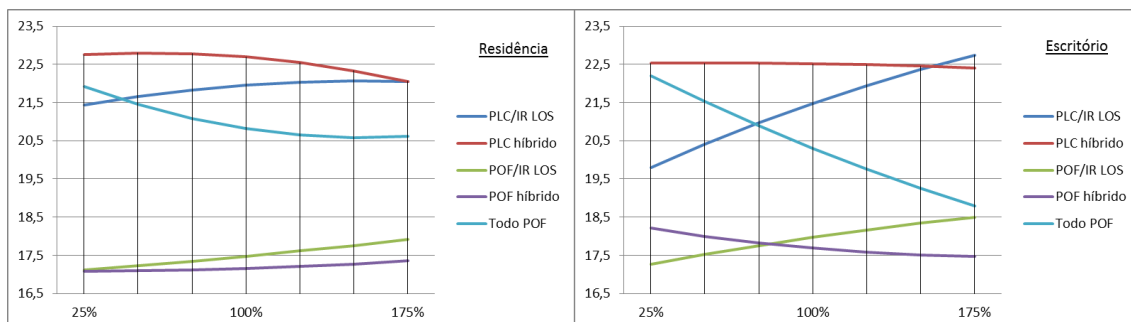


Figura 22 - Variação em igual proporção do critério 4 e de todos os fatores mais importantes de cada critério (F₁₃, F₂₂, F₃₂ e F₄₄).

Para terminar o processo a validação, todos os dados apresentados pelo AHP foram perturbados: pesos dos critérios, fatores e alternativas. Para isso, foi utilizada a geração de números aleatórios com distribuição normal: média 1 e desvio-padrão 0,1. Cada um dos dados da Tabela 3, Tabela 4 e Tabela 5 foram multiplicados por diferentes números aleatórios e, então, a classificação das tecnologias foi novamente calculada. Este processo estocástico foi feito por várias vezes, resultando em 10⁴ cenários diferentes. Depois disso foram calculados os percentis 5% e 95% de cada tecnologia, para que fossem considerados somente os dados dentro desta janela, ou

seja, com variância máxima de 16,5%. A partir disto, foram obtidos os gráficos mostrados na Figura 23. Eles expõem uma visão diferente dos resultados apresentados anteriormente, em que, no escritório, a variação era mais visível. Mas agora é possível notar que para ambos os casos, as tecnologias com rede de acesso de POF (POF/IR LOS e POF híbrido) são sobrepostas, o que leva à conclusão de possuírem a mesma importância.

Em ambos ambientes é de se notar a mesma classificação. Porém, no ambiente residencial há maior sobreposição. Então, é importante publicar que, para os dez mil cenários gerados e com um nível de confiança de 95% (percentil 5 e 95%), que no ambiente residencial, “Todo POF” é maior que “PLC/IR LOS” em 5,9% dos casos, e é maior que “PLC híbrido” em somente 0,4% dos casos. No escritório, a primeira comparação fica em 3,2% e, em nenhum cenário gerado, a tecnologia de POF ficou à frente da “PLC híbrido”. A comparação entre primeiro (PLC híbrido) e segundo (PLC/IR LOS) colocados fica mais próxima: a tecnologia apenas com IR fica, em 23% dos cenários, à frente da tecnologia híbrida no ambiente residencial, enquanto no ambiente de escritório, esta mudança no posicionamento aparece somente em 3,3% das vezes.

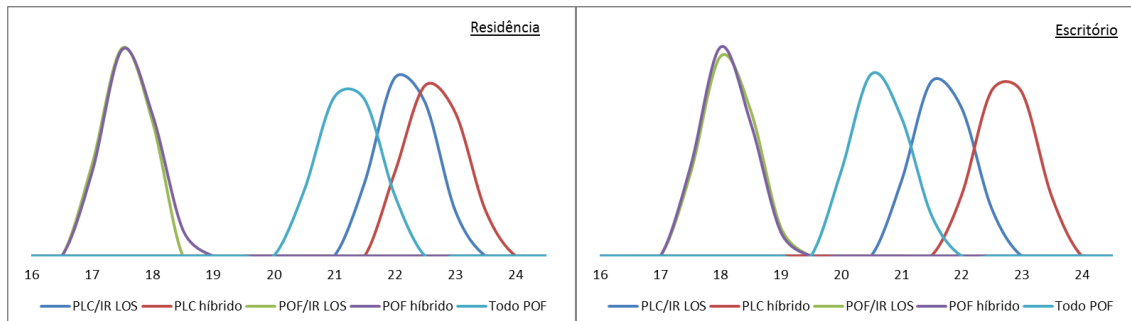


Figura 23 - Distribuição dos diferentes cenários após perturbação normal.

4 Análise econômica das redes de acesso

Depois de feita a análise do ambiente doméstico, o foco agora passa a ser as redes de acesso, que fazem os dados chegar às residências. Até o presente momento, este trabalho supôs que a chegada seria por fibra óptica (FTTH), que provê alta taxa de transmissão e pouco, ou quase nenhuma, interferência. Porém, é essencial analisar o fator econômico: é viável a implantação de fibras ópticas em todas as residências? Levando em consideração que a análise deste trabalho é feita sobre o cenário europeu, em que os cabos são todos instalados sob a terra, o maior problema se dá pelas obras civis necessárias para a implantação das fibras, o que causa, além de custo financeiro, transtorno à população local. É com base neste cenário que será exposto o trabalho de Rokkas *et al.*[2], o qual compara a implantação de fibras ópticas com a tecnologia de espaço livre (FSO).

A FSO surgiu como uma alternativa de comunicação de dados em alta velocidade. Todavia, a transmissão não é feita por cabos, mas sim pelo ar. A FSO sofre mais interferência do meio, mas esta não é grande, já que o feixe óptico é estreito. Além disso, possui alta taxa de dados, largo espectro de frequência e é de fácil instalação.

O trabalho de Rokkas *et al.* propõe tipos de áreas em que se quer instalar rede de dados. Estas áreas estão descritas na Tabela 6 e seus respectivos potenciais de mercado, na Tabela 6. Com o auxílio de uma ferramenta tecno-econômica, foram feitos cálculos de retorno financeiro para uma janela de oito anos (2006-2013), com o intuito de avaliar qual a tecnologia mais viável de se implantar: FTTx ou FSO. Apesar da janela de tempo considerada estar desatualizada, os dados continuam válidos, visto que a implementação dessas redes ainda não foi realizada e a relação de custos financeiros continua proporcional ao apresentado.

Tabela 6 - Características da área

Tipo de Área	distâncias entre		número de prédios	número de assinantes por prédio	densidade de assinantes (1/km ²)
	caixa de distribuição - prédio (km)	central local - caixa de distribuição (km)			
Densamente urbana	1,2	0,08	1024	64	5641
Urbana	2,0	0,13	2048	32	2048
Suburbana	3,2	0,20	16384	4	410

Tabela 7 - Potencial de mercado

	Densamente urbana	Urbana	Suburbana
Número de usuários	16384	16384	8192
Residenciais	90%	93%	94%
Comerciais	10%	7%	6%

As avaliações que serão mostradas a seguir possuem como variável o número de dutos de fibra óptica já implantados nas regiões estudadas. A ferramenta que auxilia no estudo da viabilidade econômica de implantação das tecnologias, calcula o valor presente de todo o retorno do período estudado (NPV – *Net Present Value*), ou seja, por meio de depreciação monetária é calculado o valor atual que corresponde ao ganho/gasto para o caso de um cenário europeu médio. A Figura 24 mostra qual seria o retorno no caso de uma instalação maciça tanto de FTTC, quanto de FTTH/O. No caso de FTTC, o acesso até o usuário é feito por cabos de cobre já instalados. Neste cenário, o retorno é positivo para as áreas urbana e densamente urbana, mesmo que ainda não tenha nenhum duto de fibra óptica instalado. Contudo, nas áreas suburbanas esta tecnologia não é viável. O cenário para FTTH/O é ainda mais desfavorável. Nem mesmo com 100% dos dutos disponíveis o retorno é positivo, excetuando-se as regiões densamente urbanizadas. Porém, mesmo estas, possuem fraco retorno financeiro, o que inviabiliza o investimento nesta tecnologia.

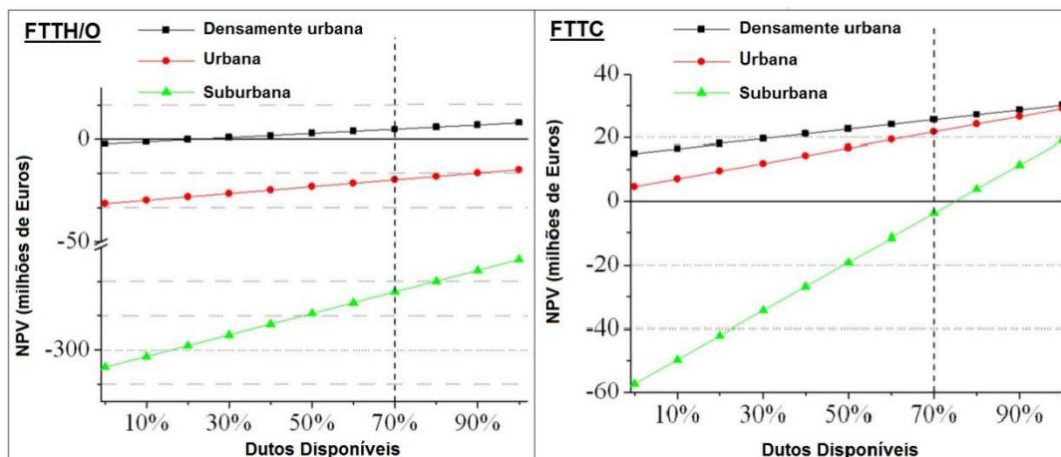


Figura 24 - Avaliação econômica para FTTC[2].

Como citado anteriormente, a FSO pode ser uma alternativa de menor custo sem que haja grande perda na velocidade de conexão. O trabalho de Rokkas *et al.*[2] propõe três diferentes cenários, sendo um como substituição ao FTTC, que faz a ligação entre central local e caixa de distribuição. Nele são utilizados *links* de longo alcance (LR – *Long Range*), com controle automático de ganho (AGC – *Automatic Gain Control*). Os outros dois cenários são substitutos do FTTH/O: o primeiro utiliza *links* LR e AGC, enquanto o segundo utiliza *links* de curto alcance (SR – *Short Range*) e não possui AGC. Em todos os casos, existe um ponto de acesso (AP – *Access Point*) que trata a distribuição do sinal recebido. Para a análise, é suposta a existência de comunicação óptica direta (LOS). O custo do *link* LR proposto no trabalho de Rokkas *et al.* é de €20.000,00, enquanto o do *link* SR, €9.000,00. Estes valores foram pesquisados no mercado no ano de 2006.

A Tabela 8 mostra a comparação dos retornos dos diferentes cenários quando analisados em áreas densamente urbanas. Na ligação entre a central local e a caixa de distribuição, a tecnologia FSO leva vantagem à FTTC quando ainda não existem dutos instalados. Porém se já houver 70% de instalação, o retorno monetário com FTTC é 25% maior. Isso também é visto na ligação entre central local e prédio, neste caso é provada a inviabilidade das redes FTTH/O quando não há dutos instalados e também da rede de FSO LR, pois ambas causariam prejuízo na janela de tempo analisada. Com isso, é preferível utilizar a FSO SR, mesmo que esta seja mais limitada tecnicamente. Se já houver 70% dos dutos instalados, a preferência deve ser dada às redes de fibra óptica.

Tabela 8 - Comparação dos NPV de diversos cenários[2]

Cenário	NPV (milhões de Euros)
FTTC (sem dutos iniciais)	15,08
FTTC (com 70% dos dutos)	25,00
FSO (central local - caixa de distribuição)	19,95
FTTH/O (sem dutos iniciais)	-8,86
FTTH/O (com 70% dos dutos)	4,97
FSO LR (central local - prédio)	-3,67
FSO SR (central local - prédio)	1,14

O maior custo, tanto da rede com fibra óptica quanto da rede FSO, é o preço inicial de instalação e de compra de equipamentos. Neste ponto é importante salientar que é possível conseguir desconto na compra de um grande número de equipamentos

ópticos, o que diminui consideravelmente o custo de instalação das redes FSO. Já as redes de fibra óptica, necessitam de obras civis e este custo não é passível de descontos. Com base nisto, a Figura 25 apresenta um gráfico em que se considera uma variação no preço inicial dos equipamentos em 50% para mais e para menos, para implantação de redes em áreas densamente urbanizadas. Quando a instalação de dutos ainda tem que ser feita, a FSO leva vantagem em relação ao seu concorrente FTTC mesmo com 40% de acréscimo no preço dos equipamentos, o que é improvável que aconteça. E com 50% de desconto, a FSO produz um retorno financeiro 67% maior que a tecnologia FTTC. Neste gráfico também é possível analisar a FTTH/O comparada às concorrentes FSO LR e FSO SR. Ambas levam vantagem com o preço abaixo de 130% do preço pesquisado no mercado, porém a FSO LR só dá retorno positivo com um desconto de 20%, mas ainda assim o ganho é pequeno. Portanto a FSO SR leva vantagem nesta análise.

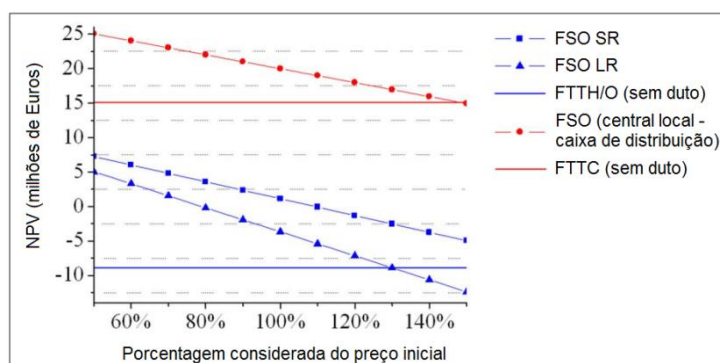


Figura 25 - Sensibilidade do NPV para áreas densamente urbanizadas[2].

No seu trabalho, Rokkas *et al.* também analisou o trabalho em conjunto de fibra óptica com FSO, em que, nas localidades onde não é viável a chegada dos cabos, se implanta a tecnologia ótica de espaço livre. É possível notar, na Figura 26, que quanto mais se utiliza a FSO, melhor é o NPV. Na comunicação da caixa de distribuição com o prédio do usuário, o NPV fica negativo, a não ser com a implantação de 90% da rede em FSO SR. Portanto, este cenário ainda pode ser melhor aproveitado, do ponto de vista financeiro, por opções que oferecem menor taxa de dados, como ondas de rádio e cabos de cobre. A FSO surge como uma boa alternativa, do ponto de vista econômico, às redes FTTx e pode ser aproveitada como complemento de redes de fibra óptica já implantadas.

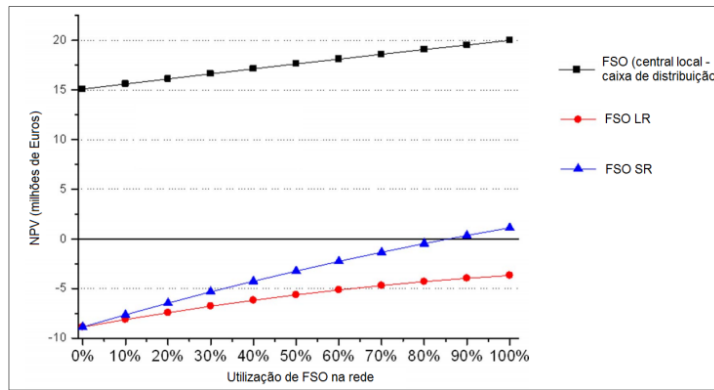


Figura 26 - Retorno financeiro em função da cobertura por FSO[2].

5 Conclusão

O presente trabalho apresentou diversas tecnologias de telecomunicações com alta capacidade de transmissão e, a partir de dois artigos: Dede *et al.*[1] e de Rokkas *et al.*[2], analisou diferentes cenários para a implantação de redes de transmissão de dados em escalas doméstica e de acesso. Cada um destes autores apresentou um conjunto de alternativas diferentes, que foram avaliadas de acordo com os dados obtidos em seus respectivos textos.

O primeiro autor focou na implantação de redes no ambiente doméstico. Para a análise, foi utilizada uma ferramenta de auxílio na tomada de decisão, a AHP, que produziu uma série de resultados. Nesta monografia, esses dados foram analisados estatisticamente, através de perturbações feitas de maneira estocástica, para a validação dos mesmos. A partir do exposto, tecnologias híbridas de espaço livre, envolvendo infravermelho e luz visível, apresentaram melhores resultados do ponto de vista técnico, social e econômico.

O segundo autor apresentou uma abordagem econômica para avaliar a possibilidade de implantação de tecnologias de telecomunicações nas redes de acesso considerando o cenário europeu, em que se preza pela não poluição visual, ou seja, a utilização de dutos subterrâneos para a implantação de cabos. É importante salientar que em países onde a infraestrutura ainda está pouco desenvolvida, como o Brasil, os cabos são passados em postes. Isto aumenta a poluição visual, mas diminui consideravelmente os custos. As opções de fibra óptica e tecnologias ópticas de espaço livre foram analisadas e os resultados obtidos apresentaram vantagem econômica para a tecnologia via ar, já que com esta opção não é necessária a instalação de novos cabos, o que aumenta consideravelmente o custo com obras civis.

Com estas duas abordagens, foi possível fazer uma análise de toda uma rede de acesso, desde a central local, até a chegada direta ao usuário. Os estudos mostraram que, apesar de novas tecnologias fornecerem melhores taxas de dados, existem outras variáveis para que sejam incorporadas ao mercado: aceitação social e viabilidade econômica. A partir disso, foi possível notar melhores resultados tecno-econômicos das tecnologias ópticas via ar, mostrando que este tipo de transmissão apresenta enorme potencial de crescimento, em um mundo cada vez mais obcecado por altas taxas de transmissão de dados.

Referências Bibliográficas

- [1] G.Dede, T. Kamalakis, D. Varoutas, “*Evaluation of optical wireless technologies in home networking: an analytical hierarchy process approach*,” *J. Opt. Netw.*, vol 3, pp. 850-59, 2011.
- [2] T. Rokkas, T. Kamalakis, D. Katsianis, D. Varoutas, and T. Sphicopoulos, “*Business prospects of wide-scale deployment of free space optical technology as a last-mile solution: A techno-economic evaluation*,” *J. Opt. Netw.*, vol. 6, pp. 860–87, 2007.
- [3] Y. Tanaka, “*A study on optical wireless communication systems and their applications*,” *PhD thesis, Keio University*, pp. 17-29, 2002.
- [4] <http://www.ict-omega.eu/>, acessado em 02/12/2012
- [5] J. M. Kahn, A. R. Barry, “*Wireless infrared communication*,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 85, no. 2, pp. 265-98, 1997.
- [6] J. B. Carruthers, “*Wireless infrared communication*,” *Enciclopedia de telecomunicações Wiley*, 2002.
- [7] C. Pohlmann, “*Visible light communication*,” *Seminar Kommunikationsstandards in der Medizintechnik*.
- [8] R. Murty, J. Padhye, R. Chandra, A. R. Chowdhury, M. Welsh, “*Characterizing the end-to-end performance of indoor powerline networks*”, Universidade de Harvard.
- [9] A. Schwager, L. Stadelmeier, M. Zumkeller, “*Potential of broadband power line home networking*”, IEEE, 2005.
- [10] M. Jones, “*Ethernet over plastic optical fibre*”.
- [11] P. Polishuk, “*Plastic optical fibers branch out*”, *IEEE Communication Magazine*, 2006.

[12] I. G. Lattanzi, L. A. Graf, “Redes FTTx: *Conceptos y Aplicaciones*”, IEEE Argentina.

[13] <http://www.ftthcouncil.eu/>, acessado em 02/12/2012

[14] R. Gaudino, D. Cárdenas: Politécnica de Torino; M. Bellec, B. Charbonnier, P. Gignard, S. Meyer, A. Pizzinat: França Telecom; I. Möllers, D. Jäger: Universidade de Duisburg-Essen; “*Perspective in next-generation home networks: toward optical solutions?*,” IEEE *Communication Magazine*, 02/2010.

[15] N. G. Mankiw, “Introdução à economia”, 5ª edição.