



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

MARCELA ALVES DE SOUZA

**SISTEMAS FOTOVOLTAICOS APLICADOS EM REDES MÓVEIS
HETEROGÊNEAS**

DM: 25/2017

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

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

MARCELA ALVES DE SOUZA

**SISTEMAS FOTOVOLTAICOS APLICADOS EM REDES MÓVEIS
HETEROGÊNEAS**

UFPA/ITEC/PPGEE
Belém-Pará-Brasil
2017

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

MARCELA ALVES DE SOUZA

SISTEMAS FOTOVOLTAICOS APLICADOS EM REDES MÓVEIS HETEROGÊNEAS

Dissertação submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica na área de Computação Aplicada.

UFPA/ITEC/PPGEE
Belém-Pará-Brasil
2017

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

“SISTEMAS FOTOVOLTAICOS APLICADOS EM REDES MÓVEIS HETEROGÊNEAS”

AUTORA: MARCELA ALVES DE SOUZA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À AVALIAÇÃO DA BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE COMPUTAÇÃO APLICADA.

APROVADA EM ____/____/____

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Diego Lisboa Cardoso
(Orientador – PPGEE/UFPA)

Prof. Dr. João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa
(Co-Orientador – PPGEE/UFPA)

Prof. Dr. Marcos César da Rocha Seruffo
(Avaliador Externo – FCT/UFPA)

Prof. Dr. Fabrício de Souza Farias
(Avaliador Externo ao Programa – PPGEE/UFPA)

VISTO:

Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes

(Coordenador do PPGEE/UFPA)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus que todos os dias da minha vida me deu forças para nunca desistir, tornando meus objetivos possíveis.

Ao meu pai Francisco Ferreira de Souza que sempre me apoiou ao longo da minha carreira acadêmica e profissional. Sem seus conselhos e recomendações não sei como eu teria conseguido. Ao meu namorado Hugo Pereira Kuribayashi por toda compreensão, tolerância, benquerença, paciência e amor, tornando meus dias mais produtivos e melhores.

Ao admirado professor João Weyl e demais professores do PPGEE, por terem acreditado no meu potencial e proporcionado essa nova etapa em minha vida, assim como, para os colegas Dinter e Minter da Unifesspa.

Ao professor Diego Lisboa Cardoso, pelo estímulo e impulso nos primeiros momentos da minha pesquisa, mesmo observando que eu não sabia por onde começar teve plena paciência para me instruir pelo caminho certo a seguir.

Ao professor Fabrício de Souza Farias, pois sem ele minha pesquisa não teria sido realizada de forma tão gratificante para mim, servindo como contribuição para a comunidade científica. Agradeço-o imensamente pelo equilíbrio, paciência, tenacidade, sapiência, cooperação, amparo, assistência dada a mim, pelos diversos meios de comunicação e até mesmo pessoalmente.

A professora Fernanda Carla Lima Ferreira por ter acreditado em mim desde o início, me dando força, motivação suficiente para iniciar e continuar essa caminhada difícil e gratificante.

Aos amigos e colegas do Centro de Tecnologia da Informação e Comunicação, em especial a divisão de sistemas de informação, liderada pelo Vitor de Souza Castro, que teve sua grande parcela na minha jornada, contribuindo com sua complacência, tolerância, compreensão nos meus dias mais árduos de trabalho.

A todos que contribuíram direta e indiretamente para a realização deste trabalho.

*Aqueles que se sentem satisfeitos sentam-se e nada fazem. Os insatisfeitos são os
únicos benfeitores do mundo”*

Walter S. Landor

RESUMO

As operadoras de telecomunicações móveis enfrentam desafios contínuos de ampliação de capacidade e cobertura da rede, de forma a atender à demanda crescente por melhor qualidade de serviço e experiência dos usuários em aplicações móveis de alta velocidade. Estas frequentes melhorias têm sido seguidas pelo aumento sem precedentes do consumo de energia elétrica, que ocorre devido a densificação de redes móveis heterogêneas (HetNet – *Heterogenous Network*) através de *small cells* e consequente acréscimo do número de dispositivos no *backhaul* móvel. Ainda que seja considerada uma estratégia eficientemente energética, as *small cells* aumentam consideravelmente o consumo energético da HetNet, devido a expansão do *backhaul*, ameaçando seus benefícios e trazendo despesas relacionadas ao custeio com energia elétrica para as operadoras de rede móvel. Para esse problema, propõe-se a exploração de fontes de energia renováveis, em especial a fotovoltaica, que visa diversificar a matriz energética e mitigar o volume de emissões de CO₂ na atmosfera terrestre. Assim, esta pesquisa tem o objetivo de fazer uma avaliação técnico-econômica para a aquisição, implantação e operação de sistemas fotovoltaicos no contexto de HetNets, considerando conjuntamente o consumo energético das redes de rádio, *fronthaul* e *backhaul*. A partir dos resultados evidencia-se viabilidade financeira quanto a adoção de estruturas fotovoltaicas quando comparada a fontes convencionais de geração de energia bem como sustentabilidade ambiental através da redução considerável das emissões de CO₂. Além disso, uma análise de sensibilidade é conduzida mostrando que variáveis como preço do painel e custo do aluguel, pode impactar de maneira significativa o custo total de aquisição do sistema fotovoltaico.

Palavras-chave: Redes Móveis Heterogêneas, Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede, Custo Total de Aquisição (TCO), Energia Renovável.

ABSTRACT

Mobile telecommunications operators are facing continuous challenges in increasing the capacity and coverage of the network in a way that can meet the growing demand from the users for better quality of service and experience in high-speed mobile applications. These frequent improvements have been followed by an unprecedented rise in the consumption of electric energy caused by the densification of heterogeneous mobile networks (HetNet – *Heterogenous Network*) through *small cells*. As a result, there has been an increase in the number of devices in *backhaul* mobile technologies which are needed to connect all the base stations by means of the access layer in the network core. Although they can be regarded as an efficient energy strategy, the *small cells* lead to a considerable increase in the energy consumption of HetNet, owing to the expansion of *backhaul* and this threatens to undermine its benefits and incurs extra energy costs for the mobile network operators. It is proposed that this problem can be overcome by exploiting renewable energy sources, in particular the photovoltaic system. This is expected to diversify the energy matrix and reduce the volume of CO₂ emissions, as well as being more viable in technical and economic terms than conventional sources of energy supply. Thus the aim of this research study is to make a techno-economic assessment of the feasibility of acquiring, installing, and operating photovoltaic systems in the context of heterogeneous mobile networks while taking account of the energy consumption of both the *fronthaul* and *backhaul* radio networks. On the basis of the results, evidence was found of the financial viability of adopting photovoltaic frameworks, as well as the environmental sustainability that can be achieved through a considerable reduction of CO₂ emissions in the atmosphere.

Keywords: Heterogeneous Mobile Networks, Grid-connected Photovoltaic Systems, (TCO), Renewable Energy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1: Projeção do tráfego de dados no período 2016-2021. Fonte: (CISCO, 2017).....	20
Figura 1.2: Projeção de dispositivos móveis no período de 2016-2021. Fonte: (CISCO, 2017)..	21
Figura 1.3: Evolução da tarifa de energia elétrica no Brasil. Fonte: (DIEESE, 2015).	23
Figura 1.4: Volume de energia armazenada no Brasil. Fonte: (ONS, 2017).	25
Figura 1.5: Evolução Anual da instalação de Sistemas Fotovoltaicos. Fonte: (IEA, 2016a).	26
Figura 2.1: Arquitetura de uma rede PON. Fonte: (HUAWEI, 2014).	41
Figura 2.2: Exemplo de aplicação de Bonding DSL. Fonte: Adaptado de (Genesis, 2017).	43
Figura 2.3: Representação da arquitetura Macro+DRA-CF. Fonte: (Fiorani et al., 2016).	48
Figura 2.4: Representação da arquitetura Macro+DRA-BF. Fonte: (Fiorani et al., 2016).	49
Figura 2.5: Representação da arquitetura Macro+Femto-CB. Fonte: (Fiorani et al., 2016).	51
Figura 2.6: Representação da arquitetura Macro+Femto-BB. Fonte: (Fiorani et al., 2016).	52
Figura 2.7: Elementos da radiação solar. Fonte: (Pinho et al., 2008)	54
Figura 2.8: Dispersão dos raios solares em diferentes superfícies. Fonte: (Stine e Geyer, 2001).	55
Figura 2.9: Efeito da inclinação dos raios solares na radiação recebida. Fonte: (Floor, KNMI. e Bilt), 2004).	55
Figura 2.10: Mapa de Irradiação solar média anual. Fonte: (SODA, 2016).	56
Figura 2.11: Mapa de irradiação solar média anual do Brasil e da Europa. Fonte: (Pereira et al., 2006) e (IET, 2012).	57
Figura 2.12: Dias com diferentes valores de HSP, em conformidade com os perfis de radiação solar diária. Fonte: (Pinho et al., 2008).	58
Figura 2.13: Insolação diária média anual. Fonte: (Tiba, 2000).	58
Figura 2.14: Taxas anuais de crescimento da capacidade de energia renovável 2010-2015. Fonte: (Fu et al., 2016).	60
Figura 2.15: Categorias de Sistemas Fotovoltaicos. Fonte: (Urbanetz Junior, 2010).	61
Figura 2.16: Esquema de Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede. Fonte: (Pinho e Galdino, 2014).	62
Figura 2.17: Camadas de um módulo fotovoltaico. Fonte: (Tolmasquim, 2016).	66
Figura 2.18: Exemplo de estruturas fotovoltaica: (a) aplicadas em fachadas (Wikiwand, 2017). (b) Coberturas de edificações (Stockergy, 2017).	67
Figura 3.1: Metodologia de avaliação para o custo total de aquisição do sistema fotovoltaico. Fonte: Elaborada pela autora.	70
Figura 3.2: Dados de irradiação solar no município brasileiro de São Francisco (MG). Fonte: (CRESESB, 2006).	72
Figura 3.3: Exemplo de sistema de baterias estacionárias utilizadas em Sistemas Fotovoltaicos. Fonte: (MTVSOLAR, 2017).	73
Figura 3.4: Caracterização do Custo Total de Aquisição do Sistema Fotovoltaico. Fonte: Elaborada pela autora.	77
Figura 3.5: Cálculo do número de manutenções realizadas nos equipamentos do SF. Fonte: Elaborada pela autora.	79
Figura 4.1 Representação dos prédios do estudo de caso. Fonte: Adaptado de (Farias, 2016). ..	82
Figura 4.2: Cenário de aplicação horizontal do sistema fotovoltaico. Fonte: Elaborada pela autora.	83
Figura 4.3: Projeção de consumo energético das arquiteturas apresentadas em (Fiorani et al., 2016).	84

Figura 4.4: TCO Fotovoltaico em função da intensidade de radiação solar. Fonte: Elaborada pela autora.	90
Figura 4.5: Custo do sistema fotovoltaico por usuário ao ano em função da intensidade de radiação solar. Fonte: Elaborada pela autora.	91
Figura 4.6: Economia gerada por usuário em função da intensidade de radiação solar. Fonte: Elaborada pela autora.	92
Figura 4.7: Volume de emissões de CO2 evitadas por usuário ao ano. Fonte: Elaborada pela autora.	93
Figura 4.8: Emissões de CO2 evitadas em função da densidade de usuários. Fonte: Elaborada pela autora.	93
Figura 4.9: Custo Total de Aquisição do Sistema Fotovoltaico em Função da densidade de usuários. Fonte: Elaborada pela autora.	94
Figura 4.10: Economia por usuário em função da densidade de usuário. Fonte: Elaborada pela autora.	95
Figura 4.11: Custo Total de Aquisição em função da variação de preço do painel fotovoltaico. Fonte: Elaborada pela autora.	96
Figura 4.12: Custo Total de Aquisição em função da variação de preço do aluguel. Fonte: Elaborada pela autora.	97
Figura 4.13: Custo Total de Aquisição em função da variação de preço do inversor. Fonte: Elaborada pela autora.	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Sumário de principais vantagens e desvantagens quanto ao uso de small cells.	36
Tabela 2.2: Tipo de estações base e suas principais características. Fonte: (FARIAS et al., 2013).	37
Tabela 2.3: Eficiências das células fotovoltaicas produzidas em laboratórios até 2015. Fonte: (GREEN et al., 2017).	65
Tabela 3.1: Exemplo de cálculo de consumo diário de energia (média semanal).	74
Tabela 4.1: Valores de referência para o custo associado ao consumo de energia a partir da concessionária.....	85
Tabela 4.2: Parâmetros complementares do Sistema Fotovoltaico.	87
Tabela 4.3: Parâmetros utilizados para reprodução dos resultados de (FIORANI et al., 2016) e (TOMBAZ et al., 2014).	88
Tabela 4.4: Quadro de potência e consumo estimado de energia dos equipamentos de HetNets.	89

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2G	<i>Second-Generation Wireless Telephone Technology</i>
3G	<i>Third-Generation Wireless Telephone Technology</i>
4096-QAM	<i>4096-Quadrature Amplitude Modulation</i>
4G	<i>Fourth-Generation Wireless Telephone Technology</i>
5G	<i>Fifth-Generation Wireless Telephone Technology</i>
ADSL	<i>Asymmetric Digital Subscriber Line</i>
AM	<i>Air Mass</i>
a-Si	<i>Amorphous Silicon</i>
a-Si:H	<i>Hydrogenated Amorphous Silicon</i>
BS	<i>Base Station</i>
BJT	<i>Bipolar junction transistor</i>
CA	<i>Corrente Alternada</i>
CAGR	<i>Compound Annual Growth Rate</i>
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i>
CC	<i>Corrente Contínua</i>
CdTe	<i>Cadmium Telluride</i>
CIGS	<i>Cooper Indium Gallium Selenide</i>
CO ₂	<i>Dióxido de Carbono</i>
COFINS	<i>Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social</i>
c-Si	<i>Crystalline silicon</i>
CSP	<i>Concentrated Solar Power</i>
CuIn _x GA _(1-x) Se ₂	<i>Cooper Indium Gallium Selenide</i>
DIEESE	<i>Departamento Intersindical de Estatística e Estudos Econômicos</i>
DRA	<i>Distributed Indoor Radio Architecture</i>
DSL	<i>Digital Subscriber Line</i>
DSLAM	<i>Digital Subscriber Line Access Multiplexer</i>
DSSC	<i>Dye Sensitized Solar Cells</i>
DU	<i>Digital Unit</i>
DWDM	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i>
EU	<i>Equipamento de Usuário</i>
EVA	<i>Ethylene Vinyl Acetate</i>
FDM	<i>Frequency Division Multiplexing</i>

FTTB	<i>Fiber to the Building</i>
FTTC	<i>Fiber to the Curb</i>
FTTCab	<i>Fiber to the Cabinet</i>
FTTF	<i>Fiber to the Frontage</i>
FTTH	<i>Fiber to the Home</i>
GaAs	<i>Gallium arsenide</i>
GEE	<i>Gases de Efeito Estufa</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GTO	<i>Gate Turn-Off Thyristor</i>
GW	<i>Gigawatt</i>
HDIF	<i>Diffuse Solar Irradiation</i>
HDIR	<i>Direct Solar Irradiation</i>
HetNet	<i>Heterogeneous Network</i>
HSP	<i>Horas de Sol Pleno</i>
ICMS	<i>Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços</i>
ICT	<i>Information Communication Technology</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
inGaAs	<i>Indium Gallium Arsenide</i>
InGaP	<i>Indium Gallium Phosphide</i>
InP	<i>Indium Phosphide</i>
IPCA	<i>Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo</i>
kV	<i>Quilovolt</i>
kW	<i>Quilowatt</i>
kWh	<i>Quilowatt-hora</i>
LOS	<i>Line-of-Sight</i>
LTE	<i>Long-Term Evolution</i>
M2M	<i>Machine-to-Machine</i>
MBS	<i>Macro Base Station</i>
MIMO	<i>Multiple-Input-Multiple-Output</i>
MOSFET	<i>Transistor de Efeito de Campo de Potência</i>
MWp	<i>Megawatt-pico</i>
nc-Si	<i>Nanocrystalline silicone</i>
NEA	<i>National Energy Agency</i>
NG-PON2	<i>Next-Generation Passive Optical Network 2</i>

ODN	<i>Optical Distribution Network</i>
OEO	<i>Optical-Electrical-Optical</i>
OLT	<i>Optical Line Terminal</i>
O&M	<i>Operação e Manutenção</i>
ONT	<i>Optical Network Terminal</i>
ONU	<i>Optical Network Unit</i>
OPEX	<i>Operational Expenditure</i>
PIS	<i>Programa de Integração Social</i>
PON	<i>Passive Optical Networks</i>
PTMP	<i>Point-to-Multi-Point</i>
PTP	<i>Point-to-Point</i>
PVPS	<i>Photovoltaic Power Systems Programme</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RoF	<i>Radio over Fiber</i>
RRU	<i>Remote Radio Unit</i>
SBS	<i>Small Base Station</i>
SCR	<i>Silicon Controlled Rectifier</i>
SF	<i>Sistema Fotovoltaico</i>
SFCR	<i>Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede</i>
SFD	<i>Sistema Fotovoltaico Domiciliar</i>
SFI	<i>Sistema Fotovoltaico Isolado</i>
SFIE	<i>Sistema Fotovoltaico Integrado à Edificações</i>
SFP	<i>Small Form-factor Pluggable</i>
SPPM	<i>Seguimento do Ponto de Potência Máxima</i>
STC	<i>Standard Test Conditions</i>
TCO	<i>Total Cost of ownership</i>
TDM	<i>Time Division Multiplexing</i>
TRIAC	<i>Triode for Alternating Current</i>
TWDM	<i>Time and Wavelength Division Multiplexing</i>
TWh	<i>Terawatt-hora</i>
UC	<i>Unidade Consumidora</i>
UTP	<i>Unshielded Twisted pair</i>
UV	<i>Ultravioleta</i>
VDSL	<i>Very-high-bit-rate Digital Subscriber Line</i>

Wp

Watt-pico

xDSL

Digital Subscriber Line

LISTA DE SÍMBOLOS

A_p	Área do painel fotovoltaico em m^2
C_{Inv}^{Unit}	Custo unitário do inversor
$CAPEX_{FV}$	Despesas de investimento e capital
C_{Kit}^{Unit}	Custo unitário do kit de instalação do painel fotovoltaico
C_M	Custo de manutenção da estrutura fotovoltaica
C_{Med}	Custo de instalação do medidor bidirecional
C_P^{Unit}	Custo unitário do painel fotovoltaico
C_{equip}	Custo inicial de aquisição dos equipamentos fotovoltaicos
$C_{m^2}^{rent}$	Custo do aluguel de telhados por m^2
Con_{Total}	Consumo energético das arquiteturas HetNet
Con_{Grid}^{Min}	Consumo mínimo da rede de energia elétrica por medidor
$C_{purchase}^{kWh}$	Custo de compra de 1 kWh a partir da concessionária
C_{sale}^{kWh}	Preço de venda de 1 kWh a partir da concessionária
E_{Inv}	Energia elétrica gerada por um (01) inversor.
E_{Min}	Volume de energia elétrica a ser gerado pelo sistema fotovoltaico
E_{gen}	Geração total de energia elétrica pelo sistema fotovoltaico
E_p	Energia elétrica gerada por um (01) painel fotovoltaico
E_{extra}	Volume de energia elétrica gerada de forma excedente
Fac_{CO_2}	Fator de emissão do CO_2
N_{Inv}	Número de inversores
N_{Inv}^P	Número máximo de painéis fotovoltaicos que podem ser instalados por inversor
N_{MI}	Número de manutenções realizadas por inversor
N_{MK}	Número de manutenções realizadas por kit de instalação
N_{MP}	Número de manutenções realizadas por painel fotovoltaico
N_{Med}	Número de medidores bidirecionais
N_p	Número de painéis fotovoltaicos
$OPEX_{FV}$	Despesas de manutenção e operação
p_{Inv}^{Input}	Potência nominal de entrada do inversor
TCO_{FV}	Custo Total de Aquisição do sistema fotovoltaico
t_x	Período de tempo entre o início do período de análise e o término da garantia
r_s	Intensidade de radiação solar
t_{solar}	Quantidade de horas de sol pleno

tx_M	<i>Taxa que representa o valor da manutenção realizada em um dado equipamento</i>
$tx_{install}$	<i>Taxa de instalação dos equipamentos fotovoltaicos</i>
tx_{loss}	<i>Taxa de desempenho do painel fotovoltaico</i>
η_{Inv}	<i>Taxa de eficiência do inversor (%)</i>
η_p	<i>Taxa de eficiência do painel fotovoltaico (%)</i>
t	<i>Período de tempo no qual se analisa a implantação da estrutura fotovoltaica</i>
σ	<i>Parâmetro que representa a depreciação no preço de compra dos equipamentos fotovoltaicos</i>
ρ	<i>Densidade de Usuários da Rede Móvel</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	20
1.1 Contextualização	20
1.2 Justificativa	24
1.3 Objetivos	27
1.4 Trabalhos Correlatos.....	28
1.5 Organização do Trabalho.....	32
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	34
2.1 Redes Móveis Heterogêneas	34
2.1.1 Considerações Iniciais.....	34
2.1.2 Tipo de Estação Base.....	36
2.1.3 Tecnologias de Backhaul Móvel.....	37
2.1.4 Arquiteturas de Redes Móveis Heterogêneas	45
2.2 Sistemas Fotovoltaicos.....	53
2.2.1 Energia Solar.....	53
2.2.2 Formas de Aproveitamento da Energia Solar.....	59
2.2.3 Aplicações de Sistemas Fotovoltaicos	60
2.2.4 Componentes de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede.....	63
2.3 Conclusões do Capítulo	69
3. DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO	70
3.1 Considerações Iniciais.....	70
3.2 Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico.....	71
3.2.1 Fase 1: Levantamento do Recurso Solar	71
3.2.2 Fase 2: Escolha da Aplicação Fotovoltaica.....	72
3.2.3 Fase 3: Levantamento da Energia Requerida pelo <i>Backhaul</i>	74
3.2.4 Fase 4: Geração de Energia Fotovoltaica	74
3.2.5 Fase 5: Emissões de CO ₂ Evitadas.....	75
3.3 Fase 6: Custo Total de Aquisição	76
3.3.1 CAPEX: Custo dos Equipamentos e Instalação.....	77
3.3.2 OPEX: Custo de Operação e Manutenção.....	78
3.3.3 Economia Monetária do Usuário.....	80
3.4 Conclusões do Capítulo	80

4. ESTUDO DE CASO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	82
4.1 Considerações Iniciais.....	82
4.2 Estudo de Caso	82
4.3 Resultados Obtidos.....	90
4.4 Análise de Sensibilidade	95
4.5 Conclusões do Capítulo	98
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	100
5.1 Contribuições da Dissertação.....	101
5.2 Dificuldades Encontradas.....	102
5.3 Trabalhos Futuros	103
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Ao longo das últimas décadas, observa-se que a evolução das gerações de redes móveis tem sido influenciada em grande parte pelo volumoso crescimento do número de dispositivos móveis, assim como pela crescente demanda de tráfego móvel. Este expressivo aumento de demanda, tem sido acompanhado por requisitos cada vez maiores de ubiquidade, alta taxa de dados e cobertura, o que em geral representa uma melhor qualidade de serviço e experiência aos usuários finais. Porém sob a perspectiva da operadora de rede móvel, tal demanda de tráfego se traduz frequentemente em processos de planejamento e investimentos financeiros, que implicam na gradativa adoção de uma infraestrutura de comunicações com requisitos de escalabilidade, segurança e baixo custo financeiro e energético.

De acordo com (CISCO, 2017), em 2016 o tráfego global de dados móveis teve um crescimento de 63%, se comparado à 2015, e considerando as estimativas atuais, espera-se que este volume de tráfego cresça 49 Exabytes por mês até 2021, o que deverá representar uma taxa composta anual de crescimento (CAGR¹ - *Compound Annual Growth Rate*) de 47%, ao se considerar o período de 2016 à 2021, conforme ilustra a *Figura 1.1*.

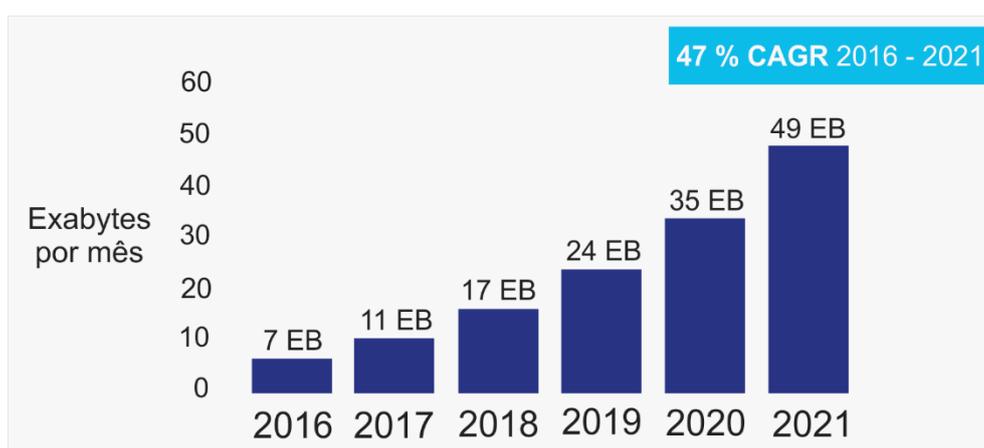


Figura 1.1: Projeção do tráfego de dados no período 2016-2021. Fonte: (CISCO, 2017).

¹ CAGR – *Compound Annual Growth Rate*. Fonte: (Anson, Fabozzi e Jones, 2010).

Nesse âmbito, o número de dispositivos móveis e conexões com a Internet cresceu na ordem de 8,0 bilhões de unidades em 2016 (CISCO, 2017), com uma estimativa de crescimento de 11,6 bilhões até 2021, o que equivale a uma CAGR de 8%, considerando o período de 2016 à 2021, conforme apresentado pela *Figura 1.2*. Segundo as projeções, as redes de dados móveis globais em 2021 deverão atender à aproximadamente 8,3 bilhões de dispositivos móveis e cerca de 3,3 bilhões de conexões M2M – *Machine to Machine* (por exemplo, sistemas GPS em automóveis, sistemas de transporte, aplicações médicas, etc.).

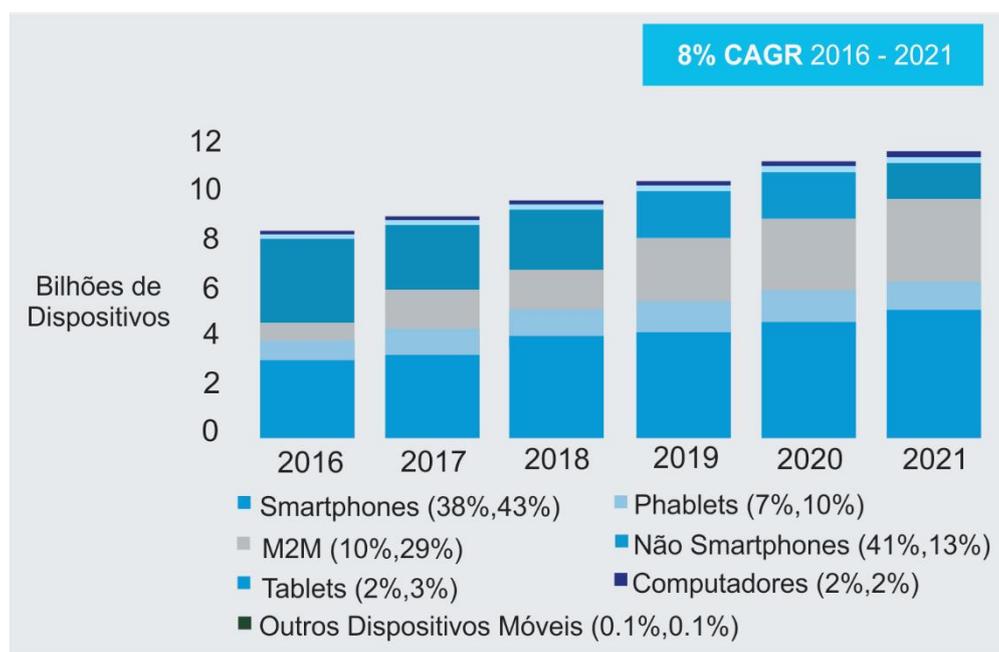


Figura 1.2: Projeção de dispositivos móveis no período de 2016-2021. Fonte: (CISCO, 2017).

Este aumento no volume de tráfego e dispositivos móveis tem levado as operadoras de rede móvel a lidar com níveis sem precedentes no consumo de energia elétrica, especialmente quando se consideram os processos de densificação da rede móvel por meio da instalação conjunta e massiça de *macro* e *small cells* (*micro*, *pico*, *femto*, etc). Tais *small cells* possuem potência e área de cobertura reduzidas, apresentando baixo consumo energético, quando comparada a uma *macro cell* (Tombaz *et al.*, 2011) (Ternon *et al.*, 2014).

Esta solução pode permitir a economia das despesas operacionais da rede (Bartoli *et al.*, 2014) e proporcionar melhorias significativas de desempenho na rede, como por exemplo, o aumento da taxa de dados. Além disso, devido suas características atrativas tem sido considerada pelos órgãos de normalização como uma tecnologia encorajadora para redes celulares de próxima geração, em função de questões como custo financeiro, consumo energético e facilidade de implantação (Kliks *et al.*, 2015).

Ainda assim, a adoção de redes móveis heterogêneas (HetNets - *Heterogeneous Networks*) embora apresente características de consumo eficiente, pode conduzir à um aumento considerável no consumo de energia elétrica, dada a frequente negligência do consumo energético das tecnologias que compõem o *backhaul* móvel da rede. De modo complementar, observa-se ainda que as redes de Tecnologia da Informação e Comunicação (ICT - *Information and Communication Technology*) já são responsáveis por cerca de 0,5% do consumo energético global, com expectativa que este consumo dobre nos próximos cinco anos (Monti *et al.*, 2012) (Dufkova *et al.*, 2010).

Com exceção de seus aspectos positivos, a implantação de HetNets ainda enfrenta algumas questões instáveis e desafiadoras sob a perspectiva de eficiência energética, uma vez que a maioria das abordagens para aumentar a capacidade da rede e preencher lacunas de cobertura são seguidas por um acréscimo do consumo de energia, em razão do aumento do número de dispositivos no *backhaul*, como *switches*, multiplexadores de acesso, antenas de micro-ondas, entre outros, que irão produzir uma quantidade significativa de emissões de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera terrestre, especialmente quando a implantação do *backhaul* móvel é realizada sem se considerar como fator preponderante, o consumo de energia.

Este panorama torna as soluções habituais de fornecimento de energia elétrica por parte da concessionária insustentáveis, especialmente ao se considerar fatores ambientais ou mesmo econômico-financeiros, como o aumento da tarifa de energia elétrica e o volume de despesas operacionais necessárias para a operação da rede. Neste cenário, as operadoras de rede móvel estão cada vez mais preocupadas em melhorar a eficiência energética da rede com o propósito de manter sua rentabilidade, uma vez que em países industrializados, as contas de energia representam aproximadamente 15% do total de despesas operacionais da rede, podendo chegar até 50% em países em desenvolvimento com acesso limitado ou não seguro de energia da rede, tornando esse cenário ainda mais desafiador (NOKIA, 2016).

Adicionalmente, sob a perspectiva da operadora de rede móvel, o custeio financeiro do consumo de energia elétrica e possíveis aumentos na tarifa de energia podem representar ameaças quanto à viabilidade financeira na operação da rede móvel ou provocar o aumento dos valores pagos pelos usuários finais da rede, dado o cenário crescente do consumo de energia.

No contexto brasileiro, por exemplo, nos últimos anos tem-se observado diversos processos de realinhamentos tarifários, que consistiram de alterações em tributos (PIS², COFINS³, ICMS⁴, etc.), ou alteração das composições dos custos de encargos setoriais, transmissão e distribuição nas diversas regiões do país. Além disso, fatores climáticos, como a indisponibilidade de recursos hídricos observada nos últimos anos no Brasil, entre os anos de 2014 e 2015 (DIEESE,

² PIS – Programa de Integração Social

³ COFINS – Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social

⁴ ICMS – Imposto Sobre Circulação De Mercadorias e Serviços

2015), também contribuíram com o encarecimento das tarifas de energia elétrica, visto que a matriz energética brasileira é composta predominantemente de hidroelétrica.

A Figura 1.3 ilustra a evolução das tarifas de energia elétrica no últimos anos, conforme estudo realizado pelo Departamento Intersindical de Estatística e Estudos Econômicos (DIEESE) (DIEESE, 2015). Ao final de 2013, houve uma queda de 16,0% no preço da energia elétrica, porém em meados de Junho de 2015, observou-se um aumento acumulado de 42% no valor da tarifa de energia elétrica, enquanto que a variação da inflação obtida pelo IPCA⁵, teve variação de 14,14% no mesmo período (BC, 2015).

Assim, a partir do contexto brasileiro mesmo que utilizado apenas sob forma de exemplificação, pode-se concluir que a composição da matriz energética brasileira influenciou diretamente no valor final do custeio da energia elétrica, o que sob a perspectiva de uma operadora de rede móvel, pode implicar em sérios riscos financeiros para o funcionamento da rede, especialmente quando questões de eficiência energética ou de tecnologias utilizadas são negligenciadas.

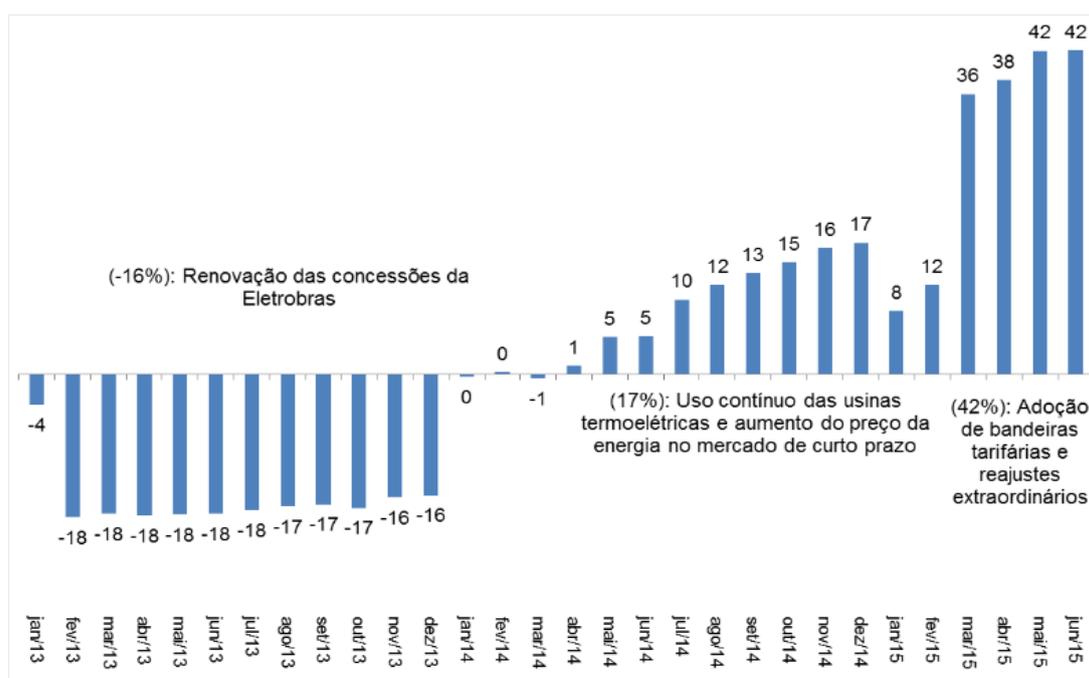


Figura 1.3: Evolução da tarifa de energia elétrica no Brasil. Fonte: (DIEESE, 2015).

Para alimentar tais redes heterogêneas sem a dependência da variação do custo da energia temos como alternativa promissora para redução de custos a utilização de fontes de energia renovável, em especial, a energia solar fotovoltaica, via geração distribuída, em que o próprio consumidor produz toda ou parte da energia que ele mesmo consome, por meio de painéis

⁵ IPCA – Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo

fotovoltaicos. A possibilidade de gerar energia elétrica a partir de painéis fotovoltaicos é uma solução viável e encorajadora, visto que contribui com a redução dos problemas intrínsecos das formas convencionais de geração de energia elétrica.

Além disso, uma abordagem baseada em geração fotovoltaica possui reduzido impacto ambiental e produz energia usando fonte renovável, de modo silencioso, além de apresentar como principal vantagem neste contexto, a possibilidade de aplicá-lo em qualquer meio habitacional (urbano ou rural), neste caso instalado em edifícios residenciais, utilizando sua própria cobertura ou fachada, desde que harmonicamente combinados, permitindo inclusive reduzir as perdas de energia elétrica inerentes aos processos de transmissão e distribuição sob a perspectiva tradicional de geração de energia.

1.2 Justificativa

A irradiação solar é uma energia totalmente disponível e deve ser explorada de todas as maneiras prováveis. Entre as diversas técnicas de aproveitamento da radiação solar, uma das mais promissoras é a geração de energia elétrica por meio de painéis fotovoltaicos, que possui inúmeros benefícios, tais como, baixo impacto ambiental, alta confiabilidade, baixa manutenção, além de ser uma forma de geração distribuída e silenciosa (Tolmasquim, 2016). Além disso, esta tecnologia possui diversos mecanismos e programas de incentivos para sua adoção ao redor do mundo, e apresenta vida média útil acima de 25 anos, a partir da sua implantação (Rüther, 2004). Ainda assim, apesar de apresentar numerosos benefícios, ainda existem aspectos limitantes quanto ao uso desta tecnologia, sendo eles:

- Dependência Climática: Fatores climáticos e ambientais adversos podem influenciar na produtividade dos painéis fotovoltaicos, como nebulosidade, variações extremas de temperatura, chuvas torrenciais, tempestades de granizo, etc.;
- Disponibilidade de Radiação Solar: Além dos painéis fotovoltaicos não operarem em períodos noturnos, a radiação solar possui uma intensidade variável nas diversas regiões do globo, que frequentemente variam de acordo com as estações do ano e coordenadas geográficas;
- Incentivos Financeiros – Por ser uma tecnologia relativamente nova e ainda em processo de evolução tecnológica, observa-se uma reduzida (no entanto crescente) escala mundial de fabricação dos painéis fotovoltaicos, que tornam um sistema fotovoltaico (SF) potencialmente dispendioso financeiramente;

- Popularização – Apesar de haver um processo de adoção cada vez maior de fontes de energias renováveis ao redor do mundo, a utilização de energia fotovoltaica ainda apresenta um baixo nível de utilização na matriz energética mundial.

A maioria destes aspectos limitantes tornar-se-ão não muito importantes, ao passo que cresça a aplicação de sistemas fotovoltaicos, fomentando cada vez mais a capacidade de produção dos painéis, com preços reduzidos, maior eficiência e com menor *payback* de investimento, ou seja, menor tempo de retorno financeiro associado ao investimento destas estruturas fotovoltaicas. Porém, um dos objetivos do estudo aplicado ao contexto de redes móveis heterogêneas é expandir as formas de utilização de tecnologias fotovoltaicas, visando acelerar a diminuição de suas limitações. Assim, o discernimento de qual, como e onde aplicá-los, excedendo as limitações atuais, é uma maneira de contribuir nesse processo de disseminação do conhecimento.

Considerando-se mais uma vez o cenário brasileiro por motivos de exemplificação, observa-se que desde o final de 2012, o setor elétrico brasileiro se insere em um contexto de condições hidrológicas desfavoráveis, com uma diminuição da energia armazenada ano após ano, conforme se observa na *Figura 1.4*, na qual são exibidos os níveis de energia armazenada nos reservatórios do subsistema Sudeste (SE)/Centro-Oeste (CO).

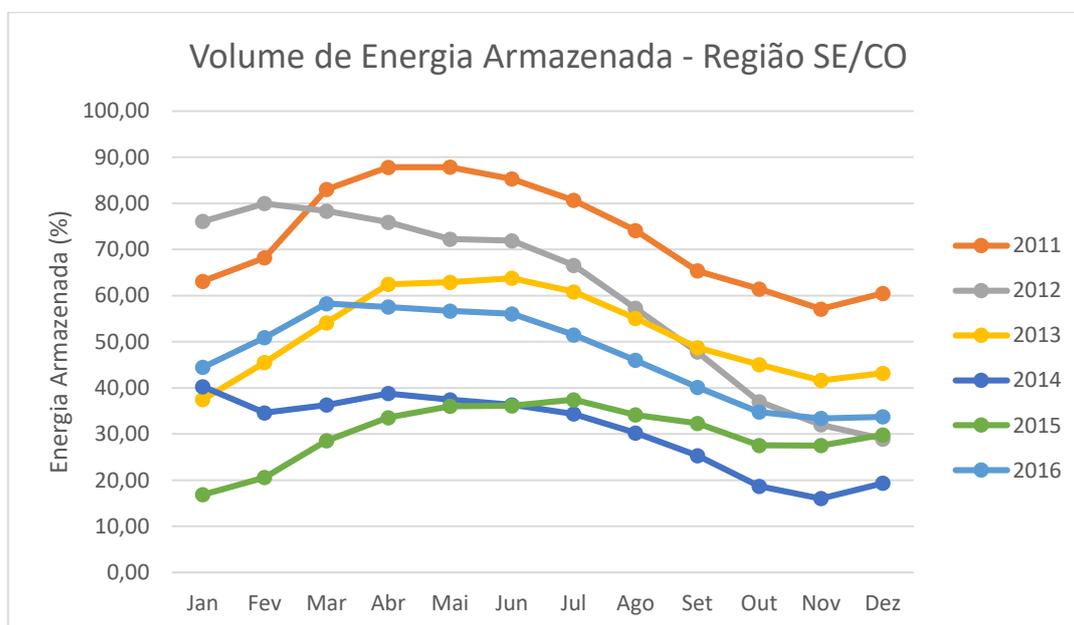


Figura 1.4: Volume de energia armazenada no Brasil. Fonte: (ONS, 2017).

Conforme dados do Operador Nacional do Sistema (ONS, 2017), o volume de energia acumulada no período de 2011 à 2016 teve comportamento decrescente, enquanto que o ano de 2014 apresentou menor quantidade de energia acumulada. Assim, este cenário de forte dependência de uma determinada fonte de energia pode ser problemático, em função da crescente demanda energética ou mesmo das variações de custo da energia elétrica, inerentes à sua disponibilidade. Desta forma, a diversificação da matriz energética de qualquer país, no sentido de adoção da geração fotovoltaica, pode proporcionar maior segurança operacional quanto à disponibilidade de energia.

A nível global, a utilização da tecnologia fotovoltaica tem aumentado de modo expressivo nos últimos anos, totalizando em uma capacidade instalada de aproximadamente 228 Gigawatt (GW) no final de 2015. Nestas circunstâncias o continente europeu, destacou-se durante anos na capacidade instalada de sistemas fotovoltaicos, porém devido a redução das políticas de incentivos, foi deixando lentamente de liderar o número de instalações, transferindo-a para países como: China, Japão e Estados Unidos (IEA, 2016a) (Pillai, 2015).

Em contraste com 2014, o ano de 2015 passou por um crescimento acelerado da implantação de sistemas fotovoltaicos no mercado global com 50,7 GW de capacidade instalada adicional, o que representa 26,5% acima da capacidade de 2014. Desses 50,7 GW instalados, 10 GW são de países não participantes do Programa de Sistemas de Energia Fotovoltaica (PVPS – *Photovoltaic Power Systems Programme*) da Agência Internacional de Energia (IEA – *International Energy Agency*) 2016. Segundo a Administração de Energia Nacional (NEA - *National Energy Administration*), a China é responsável por 15,15 GW de capacidade global instalada em 2015, tornando o país asiático líder de capacidade total instalada, inclusive à frente da Alemanha, resultando em um total acumulado de 43,5 GW, devido a fortes programas de incentivos a fonte fotovoltaica e larga produção de painéis solares, conforme mostra a *Figura 1.5* (IEA, 2016a).

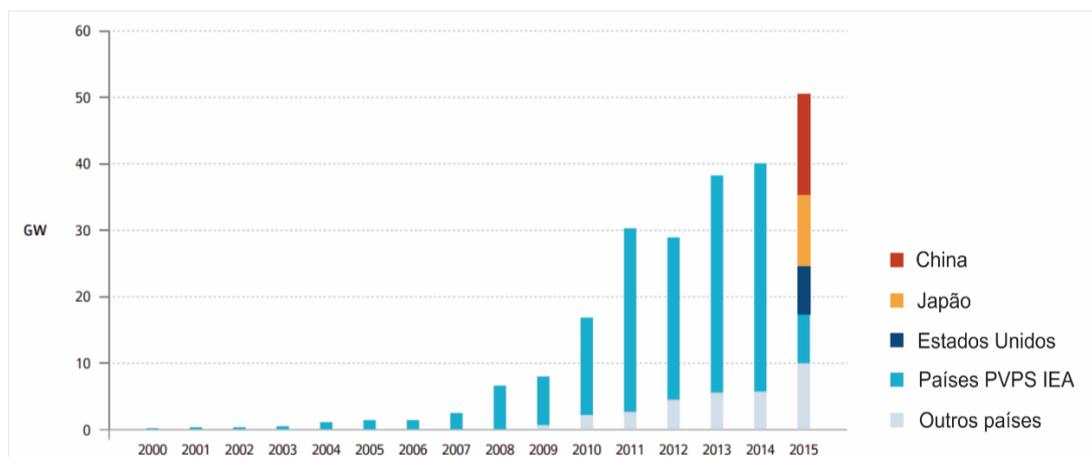


Figura 1.5: Evolução Anual da instalação de Sistemas Fotovoltaicos. Fonte: (IEA, 2016a).

Neste contexto, considera-se a perspectiva das operadoras de rede móvel, que tem que lidar com a quantidade crescente de equipamentos no *backhaul* móvel, que tendem a resultar em um expressivo consumo de energia, representando desta forma um grande desafio, dado o possível impacto sobre suas margens de lucro e eficiência, uma vez que uma porção significativa dos gastos das operadoras é destinada ao custeio de energia elétrica proveniente da concessionária.

Assim, com o objetivo de diminuir as despesas da operadora de rede móvel com o custeio de energia elétrica provida da concessionária, assim como a redução de emissões de CO₂ no meio ambiente, propõe-se o uso de sistemas fotovoltaicos conectados à rede urbanas, que apesar de potencialmente possuir um custo elevado de aquisição, possui reduzido custo de manutenção e seu retorno financeiro geralmente não ultrapassa 15 anos de execução.

1.3 Objetivos

Este estudo tem como objetivo o desenvolvimento de modelos matemáticos para estimar o consumo de energia aplicados em redes móveis heterogêneos, bem como realizar uma avaliação de viabilidade técnico-econômica de sistemas fotovoltaicos quando comparado ao custeio de energia elétrica proveniente de fontes convencionais.

Como objetivos específicos pode-se destacar:

- Realizar o levantamento detalhado sobre conceitos relativos ao uso de sistemas fotovoltaicos, destacando questões como o recurso solar disponível de uma determinada região para a aplicação de sistema fotovoltaicos ou ainda opções de instalação, e equipamentos que podem ser utilizados;
- Realizar um estudo técnico que contemple o levantamento da demanda energética de HetNets, considerando inclusive estimativas de aumento de tráfego móvel projetadas para os próximos anos;
- Realizar um estudo técnico comparando o custo de aquisição do sistema fotovoltaico com o custeio de energia elétrica, que amparado por uma análise de sensibilidade possa ajudar a identificar quais componentes de custo influenciam de modo mais impactante na composição do custo de aquisição do sistema fotovoltaico;
- Identificar os fatores que influenciam a atratividade financeira desta modalidade de geração de energia elétrica;

- Estimar de maneira objetiva o volume de emissões de CO₂ evitadas com a adoção de tal tecnologia.

1.4 Trabalhos Correlatos

Várias alternativas têm sido apresentadas para aumentar a eficiência energética em redes móveis heterogêneas, em virtude das constantes preocupações das operadoras relacionadas ao aumento dos custos com consumo de energia e mitigação das emissões de CO₂ na atmosfera. Dentre as diversas formas, destaca-se (Panwar, Sharma e Singh, 2016):

- Uso de softwares para adaptar o consumo de energia para a demanda de tráfego de informações, bem como balancear o equilíbrio entre o consumo e o desempenho da rede (Liu, Natarajan e Xia, 2016) (Soh *et al.*, 2013);
- Utilização de redes renováveis e tecnologias de captação de energia (Zhang *et al.*, 2015) (Schöndienst e Vokkarane, 2014) (Han e Ansari, 2016) (Dhillon *et al.*, 2014); e
- Uso de hardware mais eficiente em termos de energia, mediante aplicação de estratégias de implantação de redes “inteligentes” (Yang, Li e Anpalagan, 2016) (Tang *et al.*, 2015) (Fiorani *et al.*, 2016) (FARIAS *et al.*, 2016) .

Com relação aos trabalhos que baseiam-se na utilização de técnicas para adaptar o consumo de energia de acordo com a demanda de tráfego, evidencia-se (Liu, Natarajan e Xia, 2016), que apresentam um modelo de rede de celular heterogênea baseada em geometria estocástica que deriva probabilidade de cobertura, taxa média alcançável e eficiência energética de *small cells*, possuindo como principal objetivo desligá-las ou mantê-las no modo de repouso de energia, preservando a qualidade de serviço do usuário final. Duas formas de políticas de modo de repouso são utilizadas: aleatória e estratégica, com restrições tanto na probabilidade de cobertura como no tempo de despertar de cada *small cell*. Resultados confirmam a eficácia do método com melhorias de aproximadamente 30% na eficiência energética com a política de repouso aleatório e 15% com a política de repouso estratégico.

O trabalho de (Soh *et al.*, 2013) investiga técnicas de ativação e desativação de *Macro Base Stations* (MBS), em conjunto com a implantação de *Small Base Stations* (SBS). Utilizando um modelo matemático baseado em geometria estocástica. Este trabalho procura simular diversas políticas de desligamento da MBS (como desligamento aleatório ou estratégico), de modo a derivar uma taxa de eficiência energética em cada um dos cenários utilizados. Este estudo não

considera o consumo energético do *backhaul*, além de não estimar a redução das emissões de CO₂, já que essa é uma das motivações do trabalho.

Dentre os trabalhos que baseiam-se na captação de energia de fontes renováveis, destaca-se (Zhang *et al.*, 2015), que propõe um algoritmo de balanceamento de usuários entre as *Base Stations* (BSs) da HetNet. O algoritmo considera o consumo de energia da BS, e passa a tentar realizar a associação dos Equipamentos de Usuários (EU) com BSs que sejam alimentadas por fontes de energias renováveis. Assim, o problema de otimização em questão, define-se em encontrar a melhor configuração ou topologia de usuários na rede, que apresente o menor consumo global de energia. Apesar do exposto, não é considerado uma fonte de energia específica ou mesmo problemas logísticos e financeiros para transformar uma em BS “verde”.

Com relação ao trabalho de (Schöndienst e Vokkarane, 2014), este apresenta heurísticas que movem as conversões Óptico-Elétrico-Óptico (OEO - *Optical-Electrical-Optical*) em direção aos nós “verdes” na rede móvel, em que esses nós são alimentados por fontes de energia renovável. O principal objetivo da pesquisa é reduzir as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) deslocando processos intensivos de consumo de energia para nós “verdes”, diminuindo o consumo de energia em nós “negros”, os quais são alimentados por fontes convencionais de energia. Este trabalho utiliza uma metodologia em duas etapas, que consideram a potência de consumo dos equipamentos e a fonte de energia utilizada para determinar a rota que apresenta o menor custo energético e menor volume de emissões de GEE. Observa-se que o trabalho em questão não realiza uma análise de sensibilidade, que varie a taxa de penetração de nós “verdes” na rede, e de que forma esta variação afeta a probabilidade de bloqueio. Além disso, o volume de emissões de GEE evitadas não são estimadas, além de que não é considerada uma probabilidade de disponibilidade do recurso renovável, que represente o grau de incerteza de obtenção daquele tipo de energia.

Complementarmente, o trabalho de (Han e Ansari, 2016) aborda o provisionamento de fontes de energia renováveis para a alimentação das BSs de uma HetNet, porém analisando o custo de aquisição de equipamentos necessários para avaliar o impacto de implantação. O consumo de energia da rede é calculado conforme a demanda de tráfego, utilizando-se também de requisitos de QoS da rede. Com a demanda energética da rede, o algoritmo proposto realiza o dimensionamento da quantidade de painéis fotovoltaicos e da capacidade de baterias consideradas individualmente para cada MBS. O trabalho além de não considerar despesas operacionais (OPEX - *Operational Expenditure*), também não considera que os painéis podem produzir mais energia do que o necessário pela MBS, e desta forma utilizar o sistema de *net metering*⁶ para vender o excedente à concessionária ou utilizar em momentos de indisponibilidade do recurso solar, o que pode ser vantajoso em relação à opção de aquisição de baterias, que também necessitam de despesas de manutenção.

⁶ *Net metering*: política de incentivo governamental destinada a promover o investimento em energia renovável.

O trabalho de (Dhillon *et al.*, 2014) propõe um modelo matemático que é projetado para HetNets de n-camadas, onde cada BS é energizada apenas por equipamentos fotovoltaicos. Variáveis como taxa de coleta de energia, capacidade de armazenamento de energia, taxa de transmissão das BSs e densidade de implantação são consideradas. Dado que uma BS pode ficar sem energia, em função da descarga da bateria, este trabalho considera a perspectiva das BSs vizinhas atenderem os usuários que ficaram sem cobertura. Assim o trabalho considera um conjunto de n-tuplas, que são regiões de disponibilidade de energia, em que as BSs estão com energia, e desta forma tenta otimizar a maior área de disponibilidade possível, em função da movimentação espaço-temporal dos usuários. Ainda assim, o trabalho não considera o consumo energético do *backhaul* móvel, além de possuir a necessidade de considerar modelos mais realísticos de movimentação de usuários e disposição de BSs.

Com relação aos trabalhos que abordam o uso de hardware mais eficiente em termos de energia, mediante aplicação de estratégias de implantação, (Yang, Li e Anpalagan, 2016) investiga problemas relacionados com eficiência energética e propõe uma arquitetura para reduzir o consumo de energia, denominada OCRT, que considera conjuntamente múltiplas camadas, tais como, operadoras, redes principais, redes de acesso de rádio e terminais, para determinar um índice de eficiência energética da rede. O objetivo do presente estudo foi descobrir métricas e modelos de eficiência energética adequados para futuras redes heterogêneas com características típicas de cognição e técnicas de cooperação. Ainda assim, apesar de considerar mecanismos de eficiência energética em várias camadas, não considera relação do aumento de eficiência energética com possíveis limitações de espectro e desempenho da rede.

Adicionalmente, (Fiorani *et al.*, 2016) apresenta uma metodologia de quatro passos que realiza a avaliação da arquitetura e do consumo de energia de redes móveis heterogêneas, levando em consideração os equipamentos presentes nos segmentos de rádio e transporte da rede. São utilizadas para avaliação da metodologia proposta um conjunto de arquiteturas de redes móveis heterogêneas, que combinam diversas tecnologias, como *macro cells*, *femto cells*, micro-ondas, cobre ou fibra, de modo a evidenciar qual o cenário que apresenta melhor eficiência energética. O trabalho em questão utiliza um conjunto de modelos matemáticos que realizam uma estimativa de previsão de tráfego para os próximos anos, bem como o consumo energético da rede de acesso de rádio e do *backhaul* da rede. Os resultados demonstram que para um baixo volume de tráfego de dados móvel, soluções baseadas apenas no uso de *macro cells* possuem menor consumo energético, enquanto que conforme a demanda de tráfego cresce as soluções baseada em HetNets possuem melhor eficiência energética. Além disso, o melhor cenário HetNet depende das tecnologias utilizadas no *backhaul* móvel, em função de seu consumo energético.

Ao se considerar a tecnologia fotovoltaica, diversos fatores podem influenciar no custo total de aquisição, como questões ligadas à incentivos fiscais ou regimes de tributação, ou ainda a evolução tecnológica dos equipamentos utilizados, assim como a disponibilidade do recurso solar na região onde se deseja realizar a instalação. Neste contexto, (Yau e Lim, 2016) realiza a

análise de adoção de estruturas fotovoltaicas em prédios “verdes”. Ele analisa o processo de instalação das estruturas fotovoltaicas, sob abordagens distintas, inclusive variando as tecnologias de módulo fotovoltaico utilizadas. Os desempenhos dos diversos módulos fotovoltaicos utilizados são comparados, bem como o volume de energia economizado.

Adicionalmente, (Sams, 2011) realiza um estudo para tentar minimizar as despesas de capital (CAPEX - *Capital Expenditure*) e OPEX de redes de telecomunicações, no que concerne às despesas relacionadas ao consumo de energia elétrica. Esta redução de custos está associada à adoção de fontes de energia renováveis. Esta pesquisa considera cenários que utiliza o uso de painéis fotovoltaicos, baterias de Lítio, sistemas de refrigeração diretamente energizados por energia solar, etc.

Complementarmente, (Raviprasad e Singh, 2014) elabora um estudo de dimensionamento de painéis fotovoltaicos utilizando algoritmos genéticos. O objetivo é otimizar o cenário considerado, de modo a dimensionar o sistema fotovoltaico, minimizando o Custo Total de Aquisição (TCO - *Total Cost of ownership*) e considerando probabilidades de indisponibilidade do recurso solar e a degradação dos equipamentos envolvidos. Por fim, (Zefreh, Todd e Karakostas, 2014) propõe uma abordagem baseada no uso de programação linear para estimar o CAPEX e o OPEX de equipamentos fotovoltaicos, uma vez que são utilizados valores históricos de radiação solar e valores projetados de consumo energético.

Ainda assim, a adoção de fontes de energia renováveis pode representar um desafio, especialmente no que tange ao processo de viabilidade financeira, uma vez que pode compreender diversos tipos de equipamentos, dependendo do tipo de recurso natural a ser explorado. Tais custos geralmente envolvem despesas de aquisição e instalação de equipamentos, conhecidas como CAPEX, além de despesas que envolvem manutenção, operação, licenciamento dos equipamentos utilizados, conhecidas como OPEX. Sob a perspectiva da operadora de rede móvel, a minimização de tais custos representa fator estratégico, dadas as possibilidades de melhor competitividade em relação às outras operadoras de rede móvel, bem como maiores lucros.

Dentre os trabalhos citados, o de (Fiorani *et al.*, 2016) foi utilizado como premissa para esta dissertação, uma vez que esse trata do planejamento de arquiteturas HetNets que demonstram que o *backhaul* tem expressiva influência no consumo total de energia da rede móvel. Mesmo apresentando resultados favoráveis quanto a eficiência energética, os autores não consideraram fontes de energia renováveis para o problema em questão e tampouco redução considerável da emissão do volume de CO₂ na atmosfera terrestre.

Desta forma, a Tabela 1.1 apresenta um resumo dos principais trabalhos citados como fonte de pesquisa desta dissertação, destacando seus pontos altos, assim como, as questões em aberto que os mesmos apresentam.

Tabela 1.1: Comparação entre os principais trabalhos correlatos.

Autores	Pontos Altos	Questões em aberto
(Zhang et al, 2015)	Algoritmo de associação de usuários com BSs exclusivamente alimentadas por energia renovável;	- Emissão de CO ₂ ; - Problemas logísticos e financeiros para transformar uma BS em “verde”;
(Liu, Nataranjan e Xia, 2016)	Ligar e desligar BS - Diversos modos de repouso: aleatório e estratégico; Restrições na cobertura como no despertar de cada BS; (Problema de Otimização)	- Não destaca Energia renovável e Emissões de CO ₂ ;
(Schöndienst e Vokkarane, 2014)	Heurística que move as conversões OEO e o processamento elétrico em direção aos nós verdes da rede;	- Não considera a probabilidade de disponibilidade do recurso solar; - Não apresenta uma análise quanto ao aumento de nós verdes na rede;
(Fiorani et al, 2016)	Planejamento de Arquiteturas eficientemente energética, Consumo energético;	- Energia renovável; - Emissão de CO ₂ ;

1.5 Organização do Trabalho

O restante desta dissertação está dividido em 04 (quatro) capítulos conforme:

- O Capítulo 2 realiza um levantamento do referencial teórico necessário para o desenvolvimento deste trabalho, como conceitos sobre redes móveis heterogêneas, mecanismos de transporte e tipos de estações base, além disso, apresenta as arquiteturas de transporte utilizadas. Por fim o capítulo também apresenta conceitos sobre os componentes dos sistemas fotovoltaicos, expondo seu modo de funcionamento, tecnologias empregadas e conceitos sobre radiação solar;
- O Capítulo 3 apresenta os modelos analíticos utilizados para estimar a geração de energia elétrica usando o sistema fotovoltaico. Neste trabalho são calculados o consumo energético das arquiteturas HetNet e o Custo Total de Aquisição do sistema fotovoltaico.
- O Capítulo 4 realiza uma discussão sobre os resultados obtidos por meio da elaboração de um Estudo de Caso, além disso, uma análise de sensibilidade é

efetivada considerando a variação dos custos de determinados componentes que compõem o sistema fotovoltaico.

- O Capítulo 5 discute as conclusões do trabalho e as propostas de trabalhos futuros.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta o referencial teórico necessário para o desenvolvimento deste trabalho. Nas próximas subseções são expostos os conceitos técnicos sobre redes móveis heterogêneas, como os tipos de estação base – macro, micro, pico e femto, tecnologias de acesso – fibra, cobre e micro-ondas e as arquiteturas de redes móveis heterogêneas consideradas por (FIORANI et al., 2016), assim como a previsão de tráfego de dados móveis, dimensionamento da rede de rádio, dimensionamento da rede de transporte e consumo energético das arquiteturas individualmente.

Ademais, também são explanados conceitos fundamentais para a aplicação de sistemas fotovoltaicos, tais como, energia solar, que envolve irradiação solar e horas de sol pleno, formas de aproveitamento da energia solar e aplicações de sistemas fotovoltaicos, por último, componentes de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, ponderando suas características, modo de funcionamento e tecnologia empregada em sua fabricação.

2.1 Redes Móveis Heterogêneas

2.1.1 Considerações Iniciais

Historicamente, o aumento do número de células de cobertura tem sido o método primário para o aumento de capacidade nas redes móveis, em detrimento de abordagens baseadas na otimização da eficiência espectral da célula (Panwar, Sharma e Singh, 2016). Aliado à este fato, nos últimos anos, em função da demanda cada vez maior por tráfego de dados móveis, bem como por requisitos estritos de latência, ubiquidade e qualidade de serviço, tem-se observado a tendência de densificação das redes móveis por meio do uso de BSs conhecidas como *small cells* ou SBS conforme (Agyapong et al., 2014) (Bhushan et al., 2014) (Tombaz et al., 2014).

Segundo a *Small Cell Forum*⁷, uma organização sem fins lucrativos a qual é composta por 137 membros, incluindo 63 operadoras de rede móveis de vários países, representando mais de 1,71 bilhões de usuários móveis conceitua as *small cells* da seguinte maneira:

Small cells são pontos de acesso sem fio (*AP - Access Point*) de baixa potência que operam em espectro licenciado, são gerenciadas pelo operador e

⁷ *Small Cell Forum*: <http://www.smallcellforum.org/>.

apresentam inteligência baseada em borda. Elas fornecem uma melhor cobertura celular e podem ser aplicadas em residências, empresas, bem como em espaços públicos metropolitanos ou rurais. Elas incluem várias tecnologias descritas como: *femtocell*, *picocell*, *microcell* e *metrocell*. (SMALL CELL FORUM, 2012)

Desta forma, temos o conceito de HetNets, que são redes que possuem em sua arquitetura o uso de diversos tipos de estação base, incluindo *macro* e *small cells* servindo à uma mesma área de cobertura, podendo variar nas frequências utilizadas, bem como em aspectos de consumo energético, raio de cobertura ou tecnologia de rádio utilizada, além de trabalharem de forma conjunta para melhorar as condições de uso da rede, observando questões como eficiência espectral, consumo energético e mecanismos de auto gerenciamento e reconfiguração (Melrose *et al.*, 2015) (Panwar, Sharma e Singh, 2016).

Assim, com a adoção de arquiteturas de HetNets objetiva-se oferecer melhor capacidade de cobertura e serviço por meio das seguintes características em destaque:

- (i) SBS podem aumentar a capacidade e a cobertura da rede, ao servirem de modo pulverizado à um pequeno número de EUs, que podem estar fora da área de cobertura da MBS;
- (ii) Há a possibilidade de instalações de SBS em locais estratégicos, como aeroportos, locais de eventos, centros de convenções, etc;
- (iii) Uma SBS pode melhorar a qualidade de sinal em áreas onde o sinal provido pela MBS é fraco;
- (iv) Baixo custo total de aquisição da SBS em relação à implantação de uma nova MBS (Panwar, Sharma e Singh, 2016) (Pirinen, 2014) (Bhushan *et al.*, 2014).

Apesar das características expostas, há desvantagens que podem ser associadas ao uso de *small cells*, frequentemente associadas à problemas de gerenciamento de interferência, balanceamento de carga, ou ainda planejamento de tecnologias de *backhaul* (Farias *et al.*, 2013). Um resumo de tais possíveis desvantagens é apresentado na *Tabela 2.1*, que também sumariza algumas das principais vantagens quanto à adoção de *small cells* no contexto de rede móveis.

Tabela 2.1: Sumário de principais vantagens e desvantagens quanto ao uso de *small cells*.

Vantagens	Desvantagens
<p><i>Uso eficiente do espectro</i> - A curta distância física entre SBS e EU leva à uma melhor taxa de dados e melhor cobertura <i>indoor</i>, além de reduzir o número de EUs diretamente conectados à MBS.</p> <p><i>Economia de Energia</i> - O uso de SBS reduz o consumo de energia da rede devido à distância reduzida ao EU, uma vez que há menor <i>overhead</i> de sinalização. O que em geral também pode provocar menor consumo energético nos EUs.</p> <p><i>Baixo TCO</i> - É mais viável economicamente implantar uma SBS, uma vez que não exige grandes esforços de planejamento e financeiros, do que uma MBS que em geral envolvem grandes custos de aquisição, implantação, licenciamento e operação.</p> <p><i>“Plug-and-Play”</i> - Facilidade de implantação das SBS, que pode ser aleatoriamente conduzida pelos usuários finais da rede, ou seguir uma abordagem guiada pela operadora de rede móvel.</p> <p><i>Descongestionamento da MBS</i> - Com o uso de SBS, a MBS se torna menos congestionada de EUs, o que pode aumentar a capacidade de serviço do sistema, uma vez que as SBS podem utilizar <i>backhails</i> alternativos para a conexão com o núcleo da rede.</p>	<p><i>Gerenciamento de Interferência</i> - A implantação de SBSs podem resultar em alguns tipos de interferência, tais como:</p> <p>(i) <i>Intercell</i>, quando uma MBS interfere na comunicação entre um EU e uma SBS ou quando uma SBS interfere na comunicação entre um EU e uma MBS;</p> <p>(ii) <i>Intracell</i>, quando uma SBS interfere na comunicação entre outra SBS e um EU.</p> <p><i>Planejamento do Backhaul</i>: Em implantações densas de SBS, há a necessidade de transferir um grande volume de dados ao núcleo da rede móvel, o que pode exigir grandes esforços de planejamentos, ao se considerar alternativas técnicas, requisitos de qualidade e disponibilidade, além de fatores financeiros.</p>

2.1.2 Tipo de Estação Base

Em geral, operadores de redes móveis possuem diversas opções tecnológicas para o provimento de cobertura aos usuários finais. Neste contexto, estas opções refletem os tipos de estação base a serem utilizadas, considerando aspectos como cobertura, capacidade, uso de espectro licenciado, virtualização ou mesmo a utilização de serviços convergentes para o adequado dimensionamento da rede, especialmente quando se considera o contexto das redes móveis heterogêneas.

Macro Base Stations em geral são capazes de cobrir uma vasta área, atendendo à um grande número de usuários simultâneos. Instaladas sempre de modo *outdoor*, podem prover serviços 2G, 3G e 4G. Utilizando *Long-Term Evolution* (LTE), suporta células de até 100 km de cobertura, porém distâncias típicas compreendem de 0.5 à 15 km (Melrose *et al.*, 2015). Seu *backhaul* geralmente é provido por cobre, fibra ou micro-ondas (Farias, 2016).

Adicionalmente, *Micro base stations* cobrem áreas externas menores, como *shoppings*, estações de metrô, de modo a aumentar a capacidade de atendimento da rede (Farias *et al.*,

2016) (Farias *et al.*, 2013). Suas células de cobertura variam sob o alcance de 2 até 5 km, atendendo entre 256 a 512 usuários simultaneamente. Em geral, utilizam micro-ondas como tecnologia de *backhaul* (Leiva *et al.*, 2013) (Coldrey *et al.*, 2013).

Pico Base Stations podem ser instaladas tanto em ambientes *indoor* quanto *outdoor*, possuindo potências de transmissão capazes de atingir um alcance de 15 à 200m para cenários *outdoor* e de 10 à 25m para instalações *indoors*. Em geral, atendem a faixa de 64 até 128 usuários simultâneos, sendo que a tecnologia utilizada em seu *backhaul* geralmente é composta por fibra ou micro-ondas. Este tipo de estação base em geral, possui uma estratégia de implantação guiada pela operadora de rede móvel.

As estações base do tipo *Femto* podem ter sua instalação guiada tanto por usuários finais, quanto pela operadora de rede móvel, embora em ambos casos sejam instaladas de modo *indoor*. Quando instaladas pelos usuários finais, utilizam o *backhaul* provido pelo próprio usuário, cobrindo uma área de cobertura de aproximadamente 10m. Quando sua instalação é conduzida pela operadora a área de cobertura pode se estender até 25m. Apesar de possuírem um papel similar às estações base do tipo *Pico*, estas se destacam por apresentarem um baixo consumo de energia, em função da área de cobertura (Farias *et al.*, 2013). Além disso, frequentemente utilizam como tecnologia de *backhaul* fibra e cobre (Panwar, Sharma e Singh, 2016). A Tabela 2.2 sumariza as principais características dos diferentes tipos de estações base apresentadas.

Tabela 2.2: Tipo de estações base e suas principais características. Fonte: (Farias *et al.*, 2013).

Tipo de Célula	Características	Cobertura	Potência de Irradiação (W)	
			Outdoor	Indoor
Macro	Utilizada para cobrir uma vasta área, atendendo um grande número de usuários simultaneamente. Sempre são instaladas de modo <i>outdoor</i> .	< 35km	5-40	-
Micro	Cobrem de modo <i>outdoor</i> áreas menores atendendo entre 256 e 512 usuários simultaneamente.	< 2km	5-10	-
Pico	Podem ser instaladas tanto em ambientes <i>indoor</i> (10 à 25m) quanto <i>outdoor</i> (15 à 200m), além de serem instaladas primariamente pelas operadoras.	< 200m	1-2	0,1
Femto	Instaladas de forma <i>indoor</i> , possuem baixo consumo de energia podendo ser implantadas tanto pelo usuários finais, quanto pela operadora.	10-15m	-	0,05-0,25

2.1.3 Tecnologias de Backhaul Móvel

O termo *backhaul* móvel é utilizado para descrever as tecnologias utilizadas para a conexão entre as estações base e o nó de agregação com o núcleo da rede móvel (Tipmongkolsilp,

Zaghloul e Jukan, 2011) (Farias, 2016). Neste contexto diversas tecnologias de transporte podem ser adotadas, como fibra, micro-ondas ou cobre, o que somado ao processo de densificação das redes móveis por meio de *small cells*, faz com que o número de estações base a serem conectadas, sejam *macro* ou *small cells*, torne-se uma atividade desafiadora, em função de aspectos não apenas técnicos, mas também financeiros e de planejamento.

Neste âmbito, a crescente demanda por dados móveis observada nos últimos anos tem levado à crescente adoção de tecnologias com fibra e micro-ondas como alternativas de *backhaul* móvel, em detrimento de redes baseadas em cobre, principalmente ao se observar questões como capacidade, escalabilidade e desempenho. Assim, a predominância atual no uso de fibra ou micro-ondas pode ser atribuídas à algumas características chave. Por um lado, a tecnologia de fibra é geralmente considerada como um meio preferido devido sua capacidade praticamente ilimitada, longo alcance e disponibilidade, além de prover boa garantia de serviço. Por outro lado, a tecnologia de micro-ondas é geralmente associada à uma implantação menos dispendiosa financeiramente, e de rápida instalação, em especial em áreas onde a implantação por fibra tende a ser mais onerosa por questões de tempo e limitações financeiras (Farias *et al.*, 2016).

Ao se considerar *small cells*, de acordo com (Panwar, Sharma e Singh, 2016), em geral há 03 (três) tipos de topologias que podem ser utilizadas para o *backhaul* móvel:

- Cabeamento por Fibra: Estabelecer um link de fibra a partir de cada SBS até a MBS mais próxima, o que via de regra exige tempo para implantação e um grande volume de recursos financeiros;
- Link sem fio Ponto-Multiponto (PTMP): Uso de micro-ondas para implantar um nó multiponto na MBS, para que todas a SBS se conectem a ela. Exige menor tempo de implantação, porém depende de disponibilidade de visada (*LOS - Line-of-sight*);
- Link sem fio Ponto-a-Ponto (PTP): Uso de antenas direcionais em ambientes LOS, o que provê melhor desempenho e capacidade ao *backhaul* em relação à abordagem PTMP, com custo significativamente reduzido.

Adicionalmente, outros trabalhos consideram abordagens mistas, como a descrita por (Ge *et al.*, 2014), em que uma SBS utiliza a tecnologia de *mmWave*⁸ para enviar dados à MBS, que por sua vez, agrega o tráfego e envia ao núcleo da rede móvel por fibra. Em outro cenário do mesmo trabalho, todas as SBS, enviam seus dados de forma cooperativa por *mmWave* à uma outra SBS, que transfere estes dados ao núcleo da rede por fibra, podendo utilizar ou não uma MBS

⁸ *mmWave*: banda de espectro compreendida entre 30 GHz e 300 GHz

para esta função. Assim, algumas das principais alternativas de tecnologias para *backhaul* móvel são descritas a seguir.

Fibra

A tecnologia de fibra óptica é capaz de prover ilimitadas taxas de transmissão, o que a torna uma excelente alternativa para tecnologia de *backhaul* móvel, ao se considerar requisitos de aplicações com exigências estritas de qualidade de serviço, ou ainda a crescente demanda por tráfego de dados móvel registrada atualmente, em especial quando se ponderam questões como confiabilidade e desempenho.

No contexto de *backhaul* móvel, as características dos *transceivers* Ópticos são predominantemente conduzidas por tecnologias *Ethernet*, cujas velocidades variam de 1 à 100Gbps, podendo garantir um alcance de até 100km, o que em geral é suficiente para a maioria dos cenários de *backhaul* móvel, incluindo tendências futuras de aumento de demanda. Além disso, as redes de fibra óptica também podem garantir redundâncias contra potencial rompimentos, por meio do projeto de topologias redundantes.

O TCO da tecnologia de fibra em geral contempla: aquisição de *transceivers* e cabos ópticos; implantação dos cabos ópticos de modo aéreo ou subterrâneo; e a construção ou adaptação de um escritório central ou estrutura de agregação da rede. Neste contexto, os custos de implantação é um dos principais contribuintes do TCO, pois além de se considerar o processo de implantação física dos cabos, geralmente há custos com direitos de uso de infraestrutura existente, como o pagamento de taxas para concessionárias de energia elétrica, quando há a necessidade de fixação dos cabos de fibra óptica no posteamento existente em vias urbanas. No caso de instalação subterrâneas por meio de micro-perfurações, geralmente existem custos associados com o aluguel de máquinas, que faz com o custo associado seja superior à uma alternativa aérea.

De forma complementar, a tecnologia de fibra apresenta baixo consumo de energia. Um par de *transceivers Ethernet* consomem por volta de 2W, o que pode ser significativo quando há a necessidade de operação de vários links de *backhaul* simultaneamente, em função da crescente expansão das redes móveis, dado os custos associados ao custeio de energia elétrica.

No contexto de redes móveis, redes de acesso óptico frequentemente têm sido utilizadas, com base na arquitetura de uma rede óptica passiva (PON - *Passive Optical Network*). Esta, possui componentes que não utilizam energia elétrica, podendo oferecer altas taxas de velocidade e uma arquitetura simplificada, que pode facilitar o gerenciamento e manutenção da rede. As redes PON podem adotar uma topologia ponto-a-ponto, bem como uma ponto-multiponto, onde uma única fibra é compartilhada por diversos pontos de atendimento, e ainda

são compostas por fibras ópticas e diversos dispositivos ópticos e sistemas, como ONUs, OLTs, filtros, divisores passivos e lasers, que podem ser caracterizados da seguinte forma:

- **OLT** - Terminal de Linha Óptica: Localizado no escritório central, constituindo-se em porta de enlace entre a rede de acesso e a rede metro. A OLT controla e administra a transmissão das ONUs, precisando de um receptor que opere em modo rajada (volumes esporádicos de tráfego). Rajadas são conjuntos de bits vindo de uma determinada ONU. Portanto, é preciso controlar os diferentes níveis de amplitude do sinal, já que as ONUs estão localizadas em distâncias diferentes do OLT (Kramer e Pesavento, 2002) (Felix e Oliveira Duarte, De, 2013);
- **ONU** - Unidade de Rede Óptica: A sua função principal é fornecer acesso aos usuários concentrando o tráfego até que possa transmiti-los. A ONU está localizada em distâncias longas ou curtas do usuário final, como nas configurações FTTCab (*Fiber to the Cabinet*) e FTTC (*Fiber to the Curb*), respectivamente, e na locação do usuário final, como nas configurações FTTH (*Fiber to the Home*) e FTTB (*Fiber to the Building*). Nestas duas últimas, a ONU recebe a denominação de terminal de rede óptica (ONT - *Optical Network Terminal*). Além disso, quando a OLT envia mensagens em *broadcast*, as ONUs reconhecem apenas mensagens destinadas a ela e ignoram as demais, por meio da diferenciação por comprimento de onda, frequência ou tempo. Outra funcionalidade importante é a conversão do sinal óptico em elétrico para os dispositivos padrões, como telefones, computadores e outros equipamentos de aplicação do usuário final (Kramer e Pesavento, 2002).
- **Divisor Passivo (ODM)**: É um dispositivo passivo capaz de combinar e dividir o sinal óptico enviado por uma fibra de alimentação, que em sentido *downstream* irá dividir o sinal de entrada e o direciona para todas as portas de saída que estão ligadas com as ONUs, enquanto que no sentido *upstream* este dispositivo combina todos os sinais enviados desde as ONUs em direção ao OLT. Além disso, um ou mais divisores podem ser conectados em sequências, enquanto que cada ONU estabelece comunicação direta com o OLT, mas não com as outras ONUs (Wang, 2011).

Os dispositivos utilizados nas redes PON, como divisores/combinadores, reduzem significativamente o custo de implantação da fibra óptica nas redes de acesso, mas a arquitetura da rede também desempenha um papel fundamental neste objetivo. A utilização de componentes passivos reduz bastante os custos na infraestrutura e manutenção da rede óptica (Wang, 2011). De modo complementar, a *Figura 2.1* ilustra a arquitetura de uma rede PON.

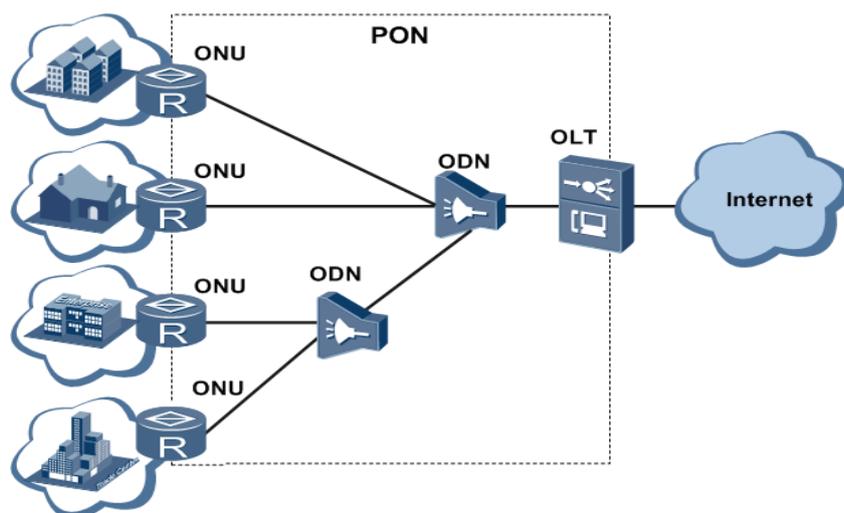


Figura 2.1: Arquitetura de uma rede PON. Fonte: (HUAWEI, 2014).

Nas redes PON é necessário regular o processo de acesso múltiplo ao meio de transmissão, seja em sentido *downlink*, como em sentido *uplink* (Perros, 2005) (Bouabdallah, Perros e Pujolle, 2005). Neste sentido, diversas técnicas podem ser utilizadas, como:

- **TDM:** Multiplexação por Divisão de Tempo, que divide a largura de banda total do enlace em vários canais de comunicação, podendo oferecer um alto nível de compartilhamento de banda entre os usuários da rede, apesar de exigir que o ONT opere na capacidade máxima do enlace, o que em geral excede as necessidades básicas de um único usuário. Este esquema de multiplexação permite que cada ONU/ONT utilize uma janela de tempo fixa ou variável, estabelecidas pela OLT. Adicionalmente, tal esquema de multiplexação ainda é a base de muitas redes PON da atualidade (Heron e Pesovic, 2014);
- **DWDM:** Multiplexação Densa por Divisão de Comprimento de Onda, que proporciona no contexto PON, a utilização de vários comprimentos de onda em uma única fibra. Em geral, oferece links simétricos de 1Gbps por usuário e não permite o compartilhamento da banda total do enlace entre os usuários, sendo melhor potencialmente aproveitado em cenários de *backhaul* móvel, onde o processo de gerenciando de um comprimento de onda por terminal, pode ser melhor administrado (Heron e Pesovic, 2014);
- **TWDM:** Multiplexação por Divisão de Tempo e Comprimento de Onda, que provê um número de comprimentos de onda bem menor que o DWDM, em geral 4 ou mais, porém cada um destes é capaz de operar de modo simétrico ou assimétrico com

taxas de 2,5 à 10Gbps Em 2012, o FSAN⁹ escolheu o TWDM-PON, como solução para implementação da arquitetura *Next-Generation PON Stage 2* (NG-PON2) (Luo *et al.*, 2013).

Cobre

O cobre ainda possui uma alta taxa de penetração, especialmente em áreas suburbanas onde o volume de tráfego de dados está crescendo rapidamente. Em muitos casos, o cobre ainda é o meio utilizado para a provisão de *backhaul* móvel, apesar dos serviços legados E1 (2 Mbps) e T1 (1,55 Mbps) estarem se provando um meio ineficaz de acompanhar a demanda cada vez maior por dados móveis, uma vez que suas velocidades são inadequadas para serviços de última geração como o 4G/LTE.

Ainda assim, o cobre pode executar um papel fundamental neste cenário dado que não há nenhum custo de instalação associado ao mesmo, pois as redes baseadas em cobre já estão instaladas, em geral há décadas. A instalação de novas redes baseadas em cobre não é algo que deve ser considerado na atualidade, porém em alguns cenários, a inexistência de CAPEX ou custo relativo às obras civis pode ser determinantes, uma vez que custos com implantação de fibra óptica em geral se tornam elevados, principalmente pelas obras civis inerentes à sua implantação.

Conforme a utilização cada vez maior de fibra ou micro-ondas como tecnologias de *backhaul* móvel, é natural que novas instalações contemplem algumas destas tecnologias. Porém nas instalações onde o cobre já conecta ou está disponível para conectar uma célula qualquer, faz sentido considerar o uso do cobre. Em alguns cenários é possível conectar uma célula à 100Mbps sob uma distância de até 300m (Farias *et al.*, 2016).

Ainda assim, com a crescente densificação das redes móveis, por meio da adoção de *small cells*, tecnologias baseadas em xDSL (ADSL, ADSL2+, VDSL, etc.) podem ser utilizadas para conexão destas SBS, de modo a facilitar este processo de densificação, especialmente em regiões onde o xDSL possui um papel expressivo como tecnologia de acesso, conforme pode ser observado em alguns países da América Latina, como o Brasil (TeleSíntese, 2011).

Existem ainda outras alternativas baseadas na opção de realizar uma agregação de canais *Digital Subscriber Line* (DSL) ou *bonding*, que é uma técnica pela qual os múltiplos pares traçados do cobre são reconfigurados para transformar-se em um único “cabo”, podendo prover capacidades de transmissão maiores, além de estender o alcance que pode ser atingido sob uma dada velocidade (Cota e Pavičić, 2011). Neste cenário, os assinantes já estão conectados

⁹ Full Service Access Network (FSAN): <https://www.fsan.org/>

por diversos cabos, não sendo necessária a instalação significativa de novos cabos, conforme exemplificado pela *Figura 2.2*.

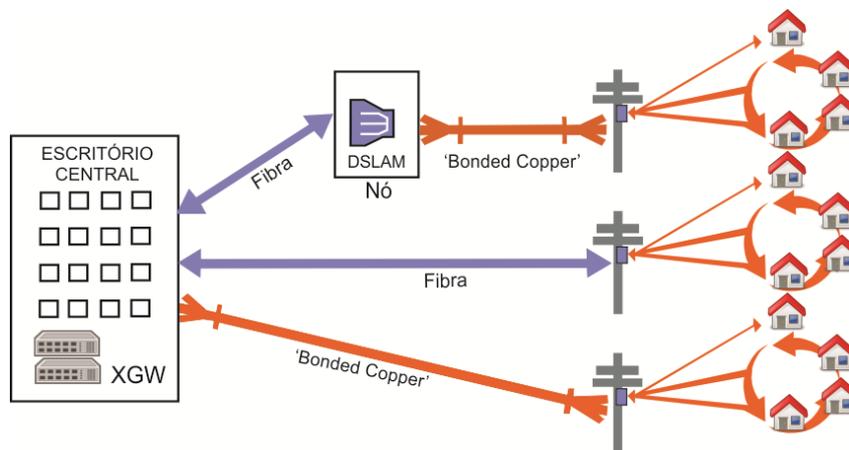


Figura 2.2: Exemplo de aplicação de *Bonding DSL*. Fonte: Adaptado de (Genesis, 2017).

Outras tecnologias xDSL como *G.fast*, se propõem a atingir taxas de transmissão na ordem de 1Gbps agregado para *downlink* e *uplink*, além de trabalhar com distâncias de até 250m (Timmers *et al.*, 2013), que podem ser consideradas para uso no contexto de *backhaul* móvel. Assim, *G.fast* pode ser usado em conjunto com instalação FTTx de modo a reduzir custos com implantação de fibra óptica, na última milha do usuário ou ponto de conexão (Abidin *et al.*, 2016), ou ainda possibilitando que a instalação de fibra óptica possa ser feita de forma gradual.

Ainda com relação ao uso do cobre no contexto de tecnologias xDSL, os autores de (Coomans *et al.*, 2015) apresentam conceitos para uma tecnologia de acesso DSL de quinta geração, referida como *XG-fast*. O objetivo desta tecnologia é fornecer taxas de dados de até 10Gbps para o usuário final em linhas de cobre bem próximas aos pontos de distribuição. Os cenários de implantação de destino para o *XG-fast* incluem FTTF (*Fiber-to-Frontage*), onde um terminal de rede óptica (ONT - *Optical Network Terminal*) é instalado perto da fronteira entre propriedade pública e privada para encurtar o comprimento do cobre, evitando o trabalho de construção nas instalações do cliente.

Outros cenários de implantação do *XG-fast* incluem redes domésticas, enquanto que as taxas de dados de vários gigabits também podem fornecer conectividade as iminentes redes 5G, que comparadas às redes 4G, devem atingir 1.000 vezes a capacidade do sistema, incluindo expressivas melhorias na eficiência espectral e energética. Embora o *XG-fast* seja apresentado aqui como uma tecnologia para cabos telefônicos de par trançado, o mesmo pode ser usado principalmente com diferentes tipos de cabos, incluindo cabos *Ethernet*, cabos coaxiais e linhas de alimentação (Coomans *et al.*, 2015).

Micro-ondas

A tecnologia de micro-ondas é frequentemente associada como uma opção mais viável economicamente que o uso de fibra óptica. Em geral pode ser instalada rapidamente, especialmente em áreas que a implantação de fibra ótica é um processo dispendioso financeiramente. Ainda assim observa-se que ao longo dos anos, a forte adoção destes sistemas, sejam baseados em topologias PTP ou PTMP, podendo alcançar de 1 à 4Gbps, dependendo das configurações, condições climáticas e tecnológicas consideradas, o que levou à forte adoção desta tecnologia tanto em cenários urbanos, quanto rurais (Tipmongkolsilp, Zaghloul e Jukan, 2011) (Chia, Gasparroni e Brick, 2009).

Esta capacidade expressiva de taxa de transmissão, que é comparável à tecnologia de fibra, pode ser explicada graças à esquemas de modulação como o 4096-QAM¹⁰, tecnologias MIMO ou ainda aproveitamento de bandas de frequência alternativas. Apesar disso, o 4096-QAM por ser um esquema de modulação denso, tende a reduzir o alcance, enquanto tecnologias de MIMO e utilização de bandas de frequências alternativas, tendem a aumentar o CAPEX e OPEX, respetivamente.

Ao se considerar questões como alcance e disponibilidade, transmissões por micro-ondas sofrem forte interferência de chuvas, diferentemente da tecnologia de fibra, o que diminui seu alcance real em regiões que apresentam frequentemente chuvas torrenciais, em comparação com regiões de clima menos chuvoso, além de potencialmente implicar em aumento de custos financeiros, dada a necessidade de instalar mais antenas, em virtude do alcance reduzido.

Neste contexto, um sistema de modulação adaptativa pode ser considerado, onde a eficiência espectral possa ser adaptada de acordo com as condições climáticas consideradas, o que demanda um esforço de planejamento e custo técnicos para implantação. Ainda assim, nunca há garantia que a capacidade desejada de transmissão será atingida em todos os momentos de utilização, o que pode prejudicar aplicações de tempo real, que em geral possuem requisitos estritos de atraso e latência.

Com relação aos custos relacionados ao uso de micro-ondas, pode-se considerar: (i) equipamentos de rádio de alta capacidade; (ii) construção de torres ou estruturas de fixação dos rádios em prédios; (iii) construção de uma estrutura de agregação da rede, especialmente em topologias PTMP; e (iv) considerar custos para utilização de banda licenciada. Adicionalmente, o consumo energético deve ser levado em consideração, visto que uma antena de micro-ondas pode consumir algumas dezenas de *watts*, o que pode dificultar a escalabilidade de um *backhaul* móvel baseado nesta tecnologia, dado os custos associados com energia elétrica.

¹⁰ QAM – Quadrature Amplitude Modulation. Fonte: (National Instruments, 2014).

Por fim, a tecnologia de micro-ondas possui a opção de reuso de equipamentos, uma vez que equipamentos podem ser reaproveitados, em outros locais de instalação, o que frequentemente não ocorre com os cabos de fibra óptica.

2.1.4 Arquiteturas de Redes Móveis Heterogêneas

Esta seção apresenta um detalhamento das arquiteturas de redes móveis heterogêneas apresentadas em (Fiorani *et al.*, 2016) e utilizadas para avaliar seus respectivos perfis de consumo energético, para subsidiar o dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos. No referido trabalho, utiliza-se um modelo matemático para estimar a previsão de tráfego móvel por área, com base em (Auer e Blume, 2012) e (UTMS, 2011). Assim, conforme (Fiorani *et al.*, 2016), a demanda média de tráfego móvel [Mbps/km²] pode ser obtida conforme a Eq. (1):

$$\tau_b = \rho \cdot \alpha \cdot \sum_k r_k \cdot s_k, \quad (1)$$

onde ρ , α representam a densidade de usuários e a porcentagem de usuários ativos, enquanto que r_k é a taxa de dados média gerada por terminais do tipo k e s_k é a fração média de usuários que utilizam terminais do tipo k .

De modo similar à (Auer e Blume, 2012) e (Fiorani *et al.*, 2016), há diferentes tipos de terminais k considerados (PCs, smartphones e *tablets*). Os usuários são divididos entre aqueles com perfil de tráfego intenso (*heavy*) e ordinário (*ordinary*), onde o uso de dados com perfil intenso é mais severo que no perfil ordinário. Assim, considerando-se que h representa a porcentagem de usuários classificados com perfil intenso, a demanda média de tráfego por terminais do tipo k , pode ser definida conforme a Eq. (2):

$$r_k = \frac{[h \cdot r_k^{heavy} + (100-h) \cdot r_k^{ordinary}]}{100}. \quad (2)$$

Nesta equação, r_k^{heavy} e $r_k^{ordinary}$ representam a média de tráfego gerado por um usuário intenso e ordinário, respectivamente. Assim, utilizando-se a Eq. (1) em conjunto com tais valores, é possível calcular a demanda de tráfego média por área de um dado ano.

Complementarmente, em (Fiorani *et al.*, 2016) são consideradas 02 (dois) tipos de HetNets, que diferenciam-se pelos tipos de *small cells* utilizadas. O primeiro tipo é baseado no uso de *Distributed Indoor Radio Architecture* (DRA), enquanto que o segundo tipo é baseado no uso de *femto cells*. Ambos os tipos de estação base são implantadas em conjunto com *macro cells*.

Neste contexto, para ambas arquiteturas, alguns parâmetros e suposições são consideradas, como: (i) utilização de um cenário urbano, com uma dada área (A) e um número determinado de prédios (N_b); (ii) todos os prédios possuem um número fixo de andares (N_f) e de apartamentos (N_a); (iii) utilização de uma taxa fixa de usuários *indoor* (I), que podem ser atendidos pela MBS ou qualquer SBS, enquanto que $(1 - I)$ representa a taxa de usuários *outdoor*. Estes são exclusivamente atendidos pela MBS.

As arquiteturas baseadas em DRA empregam o uso de uma arquitetura de *fronthaul* para interconectar seus componentes, como antenas e unidades remotas de rádio (RRU - *Remote Radio Unit*) ao Hotel DU (*Digital Unit*). Conforme considerado em (Fiorani *et al.*, 2016), o número de antenas DRA depende de uma taxa de penetração (η), que representa a fração de prédios equipados com equipamentos DRA. Desta forma, o número de antenas DRA (*indoor*) pode ser calculado como: $N_{DRA} = N_b \cdot N_f \cdot \eta$. O parâmetro η varia dentro do intervalo [0-1]. O restante dos usuários (*outdoor*), são atendidos pela MBS, cujo número pode ser calculado conforme a Eq. (3):

$$N_{Macro}^{DRA} = \frac{\rho \cdot A \cdot \alpha \cdot (1 - \eta \cdot I)}{N_{users/BS}}, \quad (3)$$

onde $N_{users/BS}$ representa o número de usuários ativos que podem ser atendidos simultaneamente pela MBS. Este termo é calculado conforme:

$$N_{users/BS} = \frac{C_{macro}}{r}, \quad (4)$$

onde C_{Macro} e $\bar{r} = \sum_k r_k \cdot S_k$ representam a capacidade de atendimento da MBS e a taxa de dados média requerida por usuário ativo, respectivamente. A capacidade de atendimento da MBS é calculada conforme apresentado em (Kelif, Coupechoux e Godlewski, 2010).

Ainda assim, em (Fiorani *et al.*, 2016) são propostas duas arquiteturas de sistemas DRA, que diferenciam-se pelas tecnologias que compõem seus respectivos *fronthauls*. A primeira baseia-se em uma abordagem de limitação de custos financeiros de implantação, considerando para isso o uso de tecnologias mais maduras, enquanto que a segunda arquitetura se baseia em tecnologias de multiplexação por divisão de comprimento de onda (DWDM - *Dense Wavelength Division Multiplexing*), em conjunto com protocolos de Rádio sobre Fibra (RoF). Transmissões de RoF em geral requerem um grande volume de taxa de dados, o que impõem limites à distância atingida na faixa de 15 à 20km entre as RRUs e o Hotel DU. Ainda assim, um único Hotel DU pode cobrir uma vasta área residencial, mesmo considerando tais limitações. Detalhes sobre as arquiteturas baseadas em DRA são apresentados nas seções subsequentes.

Com relação as arquiteturas baseadas no uso de *femto cells*, conforme (Fiorani *et al.*, 2016), considera-se que tal tipo de estação base segue uma estratégia de implantação não-coordenada

pela operadora, sendo instalada aleatoriamente pelos usuários da rede móvel. Assim, o número de *femto cells* (N_{femto}) é calculada em função do parâmetro (θ), que representa a taxa de usuários que são servidos por *femto cells*. Desta forma, o número de *femto cells* em uma dada área, é representado por: $N_{femto} = (N_b \cdot N_a \cdot \theta) / I$. O parâmetro varia no intervalo de $[0; 1]$. E de forma similar à DRA, a MBS deve servir aos usuários que não são atendidos pelas *femto cells*, cujo número de antenas MBS pode ser calculado conforme a Eq. (5):

$$N_{Macro}^{Femto} = \frac{\rho \cdot A \cdot \alpha \cdot (1 - \theta)}{N_{users / BS}} \quad (5)$$

Conforme exposto por (Fiorani *et al.*, 2016), para as arquiteturas baseadas em *femto cells* também são propostas duas arquiteturas de *fronthaul* diferentes. A primeira baseia-se também na utilização de tecnologias mais maduras e no aproveitamento de infraestrutura existente para diminuir custos de implantação, enquanto que a segunda apoia-se na utilização de redes ópticas passivas em conjunto com mecanismos de multiplexação por divisão de tempo e comprimento de onda (TWDM-PON).

A seguir, todas as arquiteturas de redes móveis heterogêneas de (Fiorani *et al.*, 2016) são exibidas detalhadamente, de forma a evidenciar seus componentes, topologia e tecnologias de transporte utilizadas.

Arquitetura 1: Macro+DRA-CF

Nesta arquitetura, referenciada como “DRA *with curb fronthaul*” (Macro+DRA-CF), conforme apresentada pela *Figura 2.3*, cabos de cobre como o UTP (CAT 5/6/7) são utilizados para interconectar as antenas à RRU, sendo considerados como infraestrutura previamente existente no interior de prédios.

Além disso, a arquitetura Macro+DRA-CF utiliza técnicas de transmissão de rádio sobre cobre, para realizar a comunicação entre antenas e RRU localizada em uma cabine externa. A partir da cabine externa, o RRU se conecta ao Hotel DU por meio de um link PTP de fibra óptica operado à 10Gbps, que necessita de *transceivers* específicos para este funcionamento. Adicionalmente, utilizam-se protocolos de RoF para efetivar a comunicação entre a RRU e o Hotel DU, localizado no escritório central, enquanto que este também utiliza um link de micro-ondas para encaminhar o tráfego móvel à MBS.

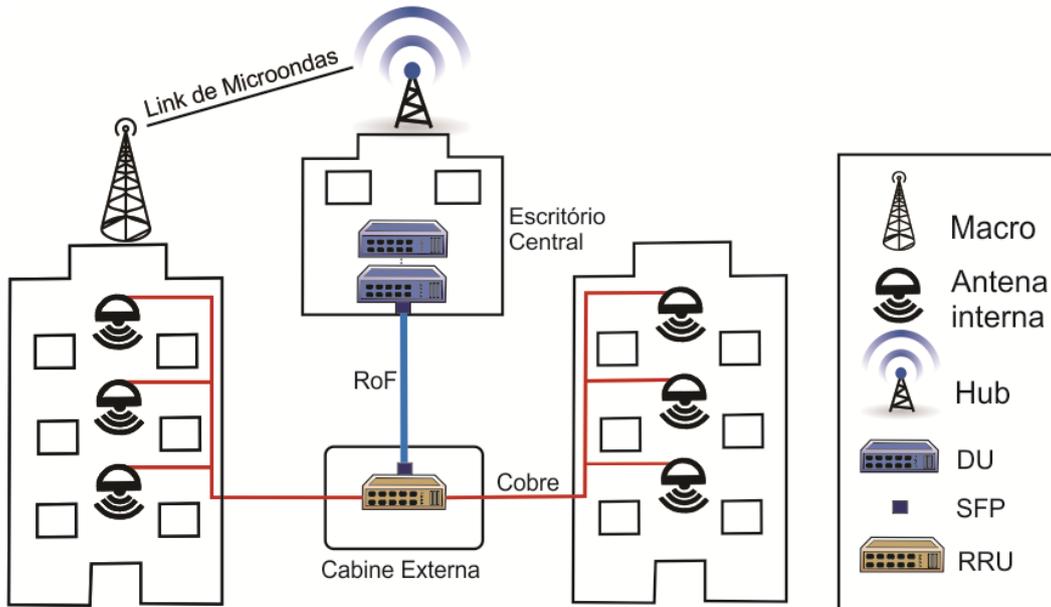


Figura 2.3: Representação da arquitetura Macro+DRA-CF. Fonte: (Fiorani *et al.*, 2016).

A potência de consumo da arquitetura Macro+DRA-CF ($P_{CF}^{DRA,tot}$), expressa em *watts* (W), tem seu cálculo obtido pela soma da potência de consumo da rede *outdoor* da MBS (P_{Macro}^{DRA}) e da rede *indoor* DRA-CF (P_{CF}^{DRA}), conforme exposto pela seguinte fórmula:

$$P_{CF}^{DRA,tot} = P_{Macro}^{DRA} + P_{CF}^{DRA}. \quad (6)$$

O consumo total da rede *outdoor* da MBS é dado por:

$$P_{Macro}^{DRA} = N_{Macro}^{DRA} \cdot (P_{Macro} + 2 \cdot P_{MW}), \quad (7)$$

onde P_{Macro} e P_{MW} representam a potência de consumo de uma MBS e a potência de consumo de uma antena de micro-ondas, respectivamente. Adicionalmente, N_{Macro}^{DRA} é calculada utilizando a Eq. (3), enquanto que a potência de consumo da rede *indoor* DRA-CF é calculada da seguinte forma:

$$P_{CF}^{DRA} = N_{DRA} \cdot P_{Amp} + \left[\frac{N_{DRA}}{A_{RRU}} \right] \cdot (P_{RRU} + 2 \cdot P_{Tr} + P_{DU}^{port} + \left[\frac{P_{DU}^{rack}}{N_{DU}^{port}} \right]), \quad (8)$$

onde P_{Amp} , P_{RRU} e P_{Tr} são as potências de consumo de uma antena amplificadora, de um RRU e um *transceiver* óptico. O termo P_{DU}^{port} representa a potência de consumo associada às funções

de processamento de banda base de um único RRU, enquanto que P_{DU}^{rack} representa o consumo com climatização e resfriamento e N_{DU}^{port} representa o número de portas DU utilizadas no rack.

Arquitetura 2: Macro+DRA-BF

A segunda arquitetura é referenciada como “DRA with building fronthaul” (DRA-BF), conforme apresentada na *Figura 2.4*. Nesta arquitetura, os RRUs são instalados dentro dos prédios e novamente conectados às antenas por meios de cabos de cobre previamente existentes dentro das instalações dos prédios. Além disso, cada RRU é conectada diretamente à uma ONU, que por sua vez é ligada por meio de uma fibra de distribuição ao OLT localizado no escritório central utilizando assim, uma infraestrutura PON.

Conforme a *Figura 2.4*, cada ONU tem um link de 10Gbps PTP com a OLT, que também utiliza transmissões de RoF. A OLT é conectada diretamente ao Hotel DU, enquanto que este também utiliza um link de micro-ondas para encaminhar o tráfego móvel à MBS. Na comunicação entre ONUs e OLT é considerado o uso de DWDM como mecanismo de multiplexação da rede PON, o que faz com que cada ONU receba um comprimento de onda para realizar a comunicação com o escritório central.

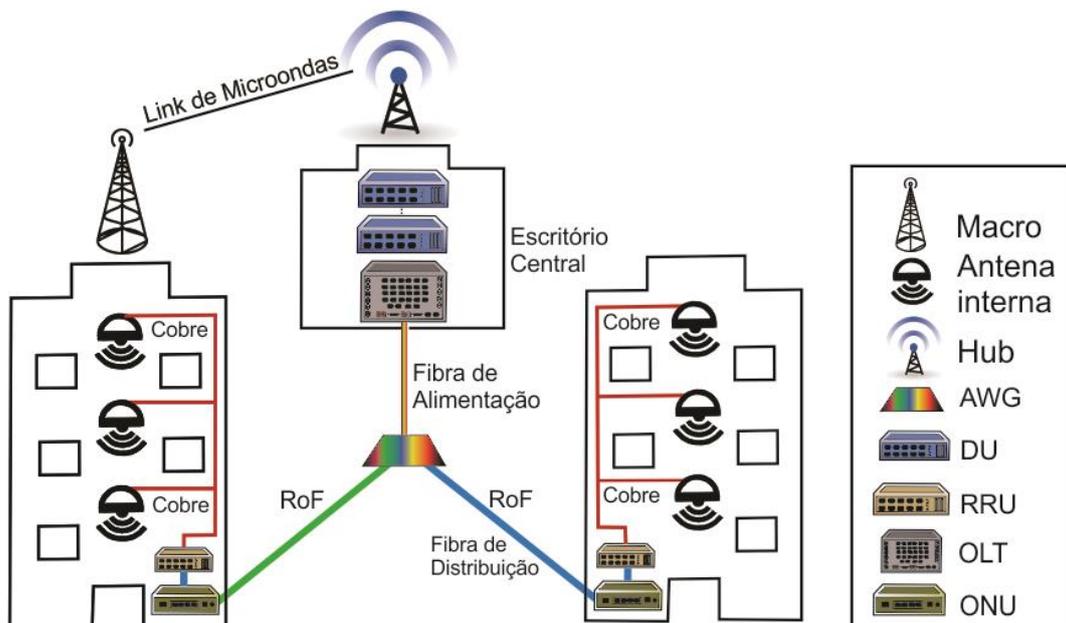


Figura 2.4: Representação da arquitetura Macro+DRA-BF. Fonte: (Fiorani *et al.*, 2016).

A potência de consumo da arquitetura Macro+DRA-CF ($P_{BF}^{DRA,tot}$), expressa em *watts* (W), tem seu cálculo obtido pela soma da potência de consumo da rede *outdoor* da MBS (P_{Macro}^{DRA}) e da rede *indoor* DRA-BF (P_{BF}^{DRA}), conforme exposto pela seguinte fórmula:

$$P_{BF}^{DRA,tot} = P_{Macro}^{DRA} + P_{BF}^{DRA}. \quad (9)$$

A potência de consumo da rede *outdoor* da MBS (P_{Macro}^{DRA}) é calculada conforme Eq. (7), enquanto que o cálculo da potência de consumo da rede *indoor* DRA-BF (P_{BF}^{DRA}) é expresso conforme a Eq. (10):

$$P_{BF}^{DRA} = N_{DRA} \cdot P_{Amp} + N_b \cdot \eta \cdot [N_{RRU}^b \cdot (P_{RRU} + P_{DU}^{port} + \left[\frac{P_{DU}^{rack}}{N_{DU}^{port}} \right]) + N_{ONU}^b \cdot (P_{ONU} + \left[\frac{P_{OLT}}{N_W^D} \right])], \quad (10)$$

onde P_{ONU} e P_{OLT} representam a potência de consumo de uma ONU e de uma OLT respectivamente. O termo N_{RRU}^b representa o número de RRUs por prédio, enquanto que N_{ONU}^b representa o número de ONUs por prédio. Por fim, o parâmetro N_W^D representa o número de comprimento de ondas DWDM utilizados por fibra.

Arquitetura 3: Macro+Femto-CB

A primeira arquitetura baseada no uso de *femto cells* é referenciada como “*Femto-Based with curb backhaul*” (Femto-CB) e é apresentada na *Figura 2.5*. Nesta arquitetura, as *femto cells* são conectadas à modems VDSL por meio de cabos de cobre existente no interior dos prédios. Cabos de cobre externos são utilizados para conectar estes modems VDSL à DSLAM instalada em uma cabine externa.

Adicionalmente, a DSLAM é diretamente conectada à um *switch* de transporte *Ethernet* no escritório central, por meio de um link de fibra óptica PTP 10Gbps, utilizando *transceivers* para realizar tal conexão. Neste caso considerou-se mais uma vez o uso de tecnologias maduras para realizar a conexão da rede de rádio ao escritório central, por motivos de limitação de custos financeiros. Além disso, de modo similar às demais arquiteturas, o escritório central utiliza um link de micro-ondas para encaminhar o tráfego móvel da rede *indoor* à MBS.

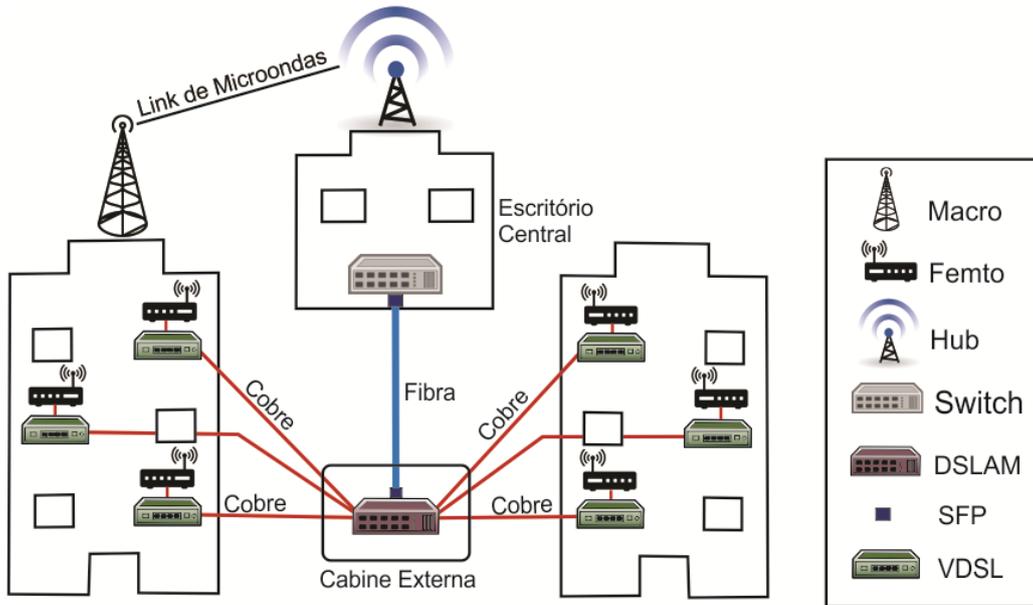


Figura 2.5: Representação da arquitetura Macro+Femto-CB. Fonte: (Fiorani *et al.*, 2016).

A potência de consumo da arquitetura Macro+Femto-CB ($P_{CB}^{femto,tot}$), expressa em *Watts* (W), tem seu cálculo obtido pela soma da potência de consumo da rede *outdoor* da MBS (P_{Macro}^{femto}) e da rede *indoor* Femto-CB (P_{CB}^{femto}), conforme expresso pela seguinte fórmula:

$$P_{CB}^{femto,tot} = P_{Macro}^{femto} + P_{CB}^{femto}. \quad (11)$$

A potência de consumo da rede *outdoor* da MBS (P_{Macro}^{femto}) é calculada conforme a Eq. (12):

$$P_{Macro}^{femto} = N_{Macro}^{femto} \cdot (P_{Macro} + 2 \cdot P_{MW}), \quad (12)$$

onde N_{Macro}^{femto} é calculada utilizando a Eq. (5). Complementarmente, o termo P_{CB}^{femto} é calculado conforme a expressão a seguir:

$$P_{CB}^{femto} = N_{femto} \cdot (P_{femto} + P_{VDSL}^m) + \left[\frac{N_{femto}}{N_{DSLAM}^p} \right] \cdot (P_{DSLAM} + 2 \cdot P_{Tr}) + \left[\frac{N_{femto}}{N_{DSLAM}^p \cdot N_S^p} \right] \cdot P_s \quad (13)$$

onde P_{femto} , P_{VDSL}^m , P_{DSLAM} e P_s representam a potência de consumo de uma *femto cell*, a potência de consumo de um modem VDSL, a potência de consumo de uma DSLAM e a potência de um *switch Ethernet*, respectivamente. Com relação aos termos N_{DSLAM}^p e N_S^p , estes representam o número de portas da DSLAM e o número de portas do *switch Ethernet* respectivamente.

Arquitetura 4:Macro+Femto-BB

Por fim, a segunda arquitetura baseada no uso de *femto cells* é referenciada como “*Femto-Based with building backhaul*” (Femto-BB), conforme apresentado pela *Figura 2.6*.

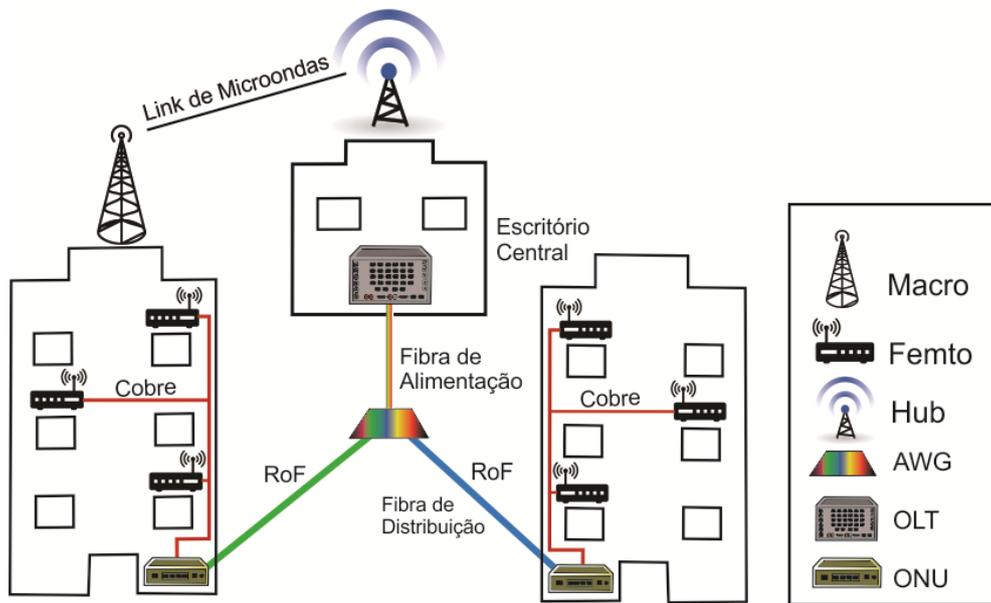


Figura 2.6: Representação da arquitetura Macro+Femto-BB. Fonte: (Fiorani *et al.*, 2016).

Nesta arquitetura todas as *femto cell* são conectadas diretamente às ONUs utilizando cabo de cobres do tipo UTP (CAT 5/6/7). Cada ONU é conectada por meio de uma fibra de distribuição ao AWG, que realiza o processo de multiplexação até a OLT localizada no escritório central. Assim como nas arquiteturas anteriores, o escritório central utiliza um link de micro-ondas para encaminhar o tráfego móvel à MBS. De modo alternativo à outras arquiteturas, Femto-BB utiliza o mecanismo de TWDM como mecanismo de multiplexação na rede PON, que segundo os autores de (Fiorani *et al.*, 2016) foi por conta da característica de alto compartilhamento dos recurso ópticos entre as *femto cells* e possível redução no consumo de energia.

A potência de consumo da arquitetura Macro+Femto-BB ($P_{BB}^{femto,tot}$), expressa em *Watts* (W), tem seu cálculo obtido pela soma da potência de consumo da rede *outdoor* da MBS (P_{Macro}^{femto}) e da rede *indoor* Femto-CB (P_{BB}^{femto}), conforme expresso pela seguinte fórmula:

$$P_{BB}^{femto,tot} = P_{Macro}^{femto} + P_{BB}^{femto} . \quad (14)$$

Com relação à potência de consumo da rede *outdoor* da MBS, esta é calculada conforme apresentado na Eq. (12), enquanto que a potência de consumo da *indoor* Femto-CB (P_{BB}^{femto}) é calculada conforme a Eq.(15):

$$P_{BB}^{femto} = N_{femto} \cdot P_{femto} + N_b \cdot I \cdot N_{ONU}^b \cdot (P_{ONU} + \left[\frac{P_{OLT}}{N_{femto}^{mux} \cdot N_W^T} \right]), \quad (15)$$

onde I é uma variável booleana que assume o valor 0 (zero) quando $\theta = 0$ e assume o valor 1 (um) quando $\theta > 0$ ($\theta \in (0, I]$). Além disso, o termo N_{femto}^{mux} representa o número de *femto cells* que podem ser multiplexadas em um único comprimento de onda do TWDM na infraestrutura PON, enquanto que N_W^T representa o número de comprimentos de onda TWDM utilizados por fibra.

2.2 Sistemas Fotovoltaicos

2.2.1 Energia Solar

O Sol, além de ser a estrela central do sistema solar, é a principal fonte de energia para a terra fornecendo luz e calor para a manutenção da vida no Planeta (Venables, 2008). A energia proveniente do sol sob a forma de onda eletromagnética, a qual é uma fonte de energia renovável, limpa e inesgotável pode ser aproveitada pela humanidade para prover suas necessidades energéticas (Zilles *et al.*, 2012). Do total de energia solar que incide na extensão da Terra, aproximadamente, metade atinge de fato a superfície, totalizando cerca de 885 milhões de TWh/ano (IEA, 2014a), superior a 8.000 vezes o consumo final total de energia global em 2013 (IEA, 2016b). Esses dados proporcionam à fonte solar, considerando suas múltiplas aplicações, o maior potencial técnico de aproveitamento quando comparada a outras fontes de energia renováveis (IPPC, 2012).

A energia radiante emitida pelo sol, também denominada radiação solar, penetra na superfície terrestre e pode ser decomposta em planos. No plano horizontal, a radiação global consiste na soma da radiação direta e difusa, ao mesmo tempo que no plano inclinado, acrescenta-se uma parcela refletida na extensão terrestre e nos elementos do entorno, denominada albedo, conforme *Figura 2.7*.

As características da radiação solar, tais como: intensidade, distribuição espectral e angular, sofrem influências antes de atingir o solo, devido ao contato com a atmosfera, através de efeitos de absorção e espalhamento. Essas alterações dependem basicamente da espessura da

camada atmosférica, ângulo zenital do sol, condições atmosféricas e meteorológicas, dentre outros (Pinho e Galdino, 2014) (Stine e Geyer, 2001).

O recurso solar não pode ser considerado como inalterável, devido sua variabilidade ao longo do dia, do ano, e de acordo com a região. Essas oscilações, em grande medida, deve-se a geografia terrestre e seus movimentos planetários de rotação e translação (Karttunen *et al.*, 1989) (Friaça *et al.*, 2008), que tornam possível certa previsão deste recurso. Não obstante, acrescenta-se a essas variações aquelas provocadas por fenômenos climáticos, tais como, chuvas, furacões, granizo, neve, formação de nuvens, entre outros, os quais são mais árduos de prever.

A Terra realiza o movimento de translação quando a mesma executa um deslocamento em torno do sol de maneira elíptica. Tal movimento é responsável pela progressão dos anos, além de intervir diretamente na composição das estações do ano, inverno, verão, outono e primavera, visto que em alguns períodos do deslocamento, o globo terrestre altera sua posição em relação ao sol, modificando a intensidade de luz e calor incidente no mesmo.

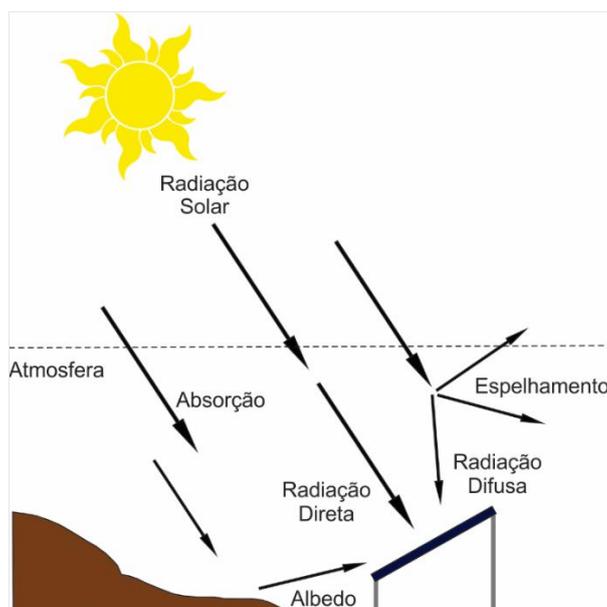


Figura 2.7: Elementos da radiação solar. Fonte: (Pinho *et al.*, 2008)

O movimento de rotação, que é o giro que a terra executa em torno de si mesma, ocasiona a decorrência dos dias e das noites. A velocidade desse movimento é de aproximadamente 1.666,7 km/h (Karttunen *et al.*, 1989), para áreas próximas à linha do Equador (latitude 0°). À medida que consideramos latitudes maiores, ou seja, distantes da linha do Equador, a velocidade de rotação diminui, esse comportamento pode ser observado em diversas regiões do globo, inclusive em

algumas cidades brasileiras, como por exemplo, em Porto Alegre (latitude 30°), a velocidade de rotação é de 1.444,2 km/h (Karttunen *et al.*, 1989).

Conforme exposto pela *Figura 2.8*, é possível assegurar que os raios solares atingem a Terra paralelamente, e com uma intensidade constante numa área imaginária perpendicular aos raios, na borda da atmosfera terrestre. Porém, nem toda extensão terrestre é perpendicular aos raios solares, o que minimiza a insolação num plano horizontal, como por exemplo em locais próximos aos polos, pois estes são iluminados apenas durante parte do ano, ao longo dos solstícios de verão. Ademais, a figura expõe que a radiação solar que atinge as duas superfícies é a mesma. Todavia, a região da superfície B é maior que a superfície A, fazendo com que a intensidade por unidade de área, no caso, a irradiância, na superfície B seja menor. Esse evento é denominado efeito cosseno (Stine e Geyer, 2001).

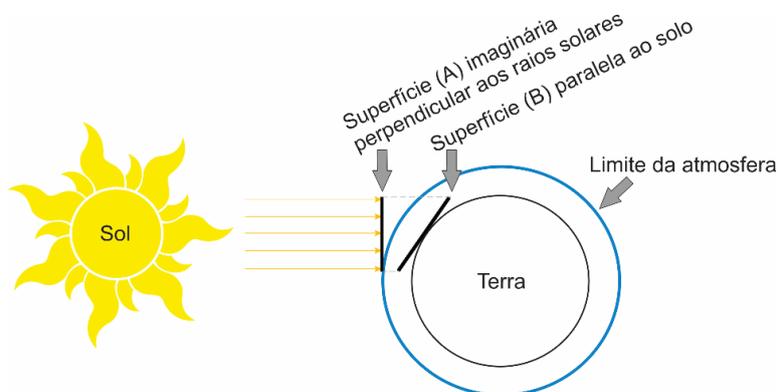


Figura 2.8: Dispersão dos raios solares em diferentes superfícies. Fonte: (Stine e Geyer, 2001).

Em resumo, a irradiância solar diversifica-se conforme a posição terrestre e o conseqüente ângulo de incidência dos raios solares (Floor, KNMI. e Bilt), 2004) (Silva, 2006), conforme exposto pela *Figura 2.9*.

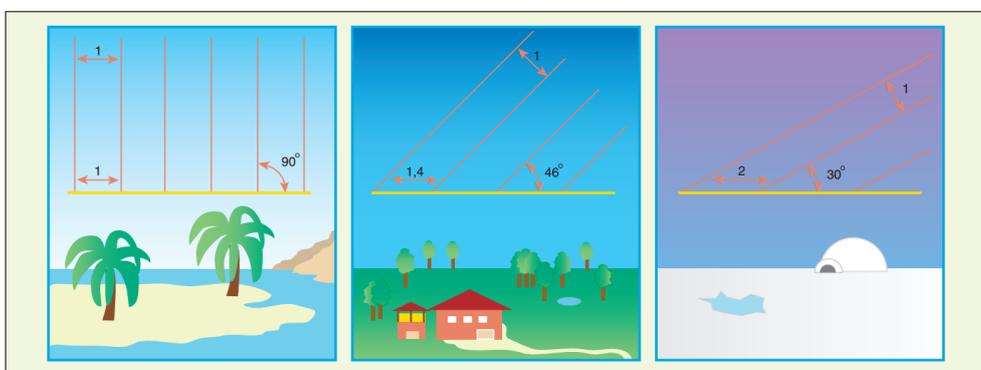


Figura 2.9: Efeito da inclinação dos raios solares na radiação recebida. Fonte: (Floor, KNMI. e Bilt), 2004).

Dessa forma, zonas próximas à linha do Equador dispõem de menor variabilidade da irradiação ao longo do ano, ao mesmo tempo que localidades em grandes latitudes apresentam maiores valores de irradiação em meses de verão, porém no inverno apresentam os menores, de maneira que a energia global anual recebida seja menor nas maiores latitudes (Tolmasquim, 2016). A *Figura 2.10* mostra a distribuição espacial da irradiação solar média anual (W/m^2) que atinge a superfície terrestre. Esses dados foram aferidos com base em imagens de satélites meteorológicos adquiridos entre os anos de 1990 e 2004 (SODA, 2016) (Pinho e Galdino, 2014).

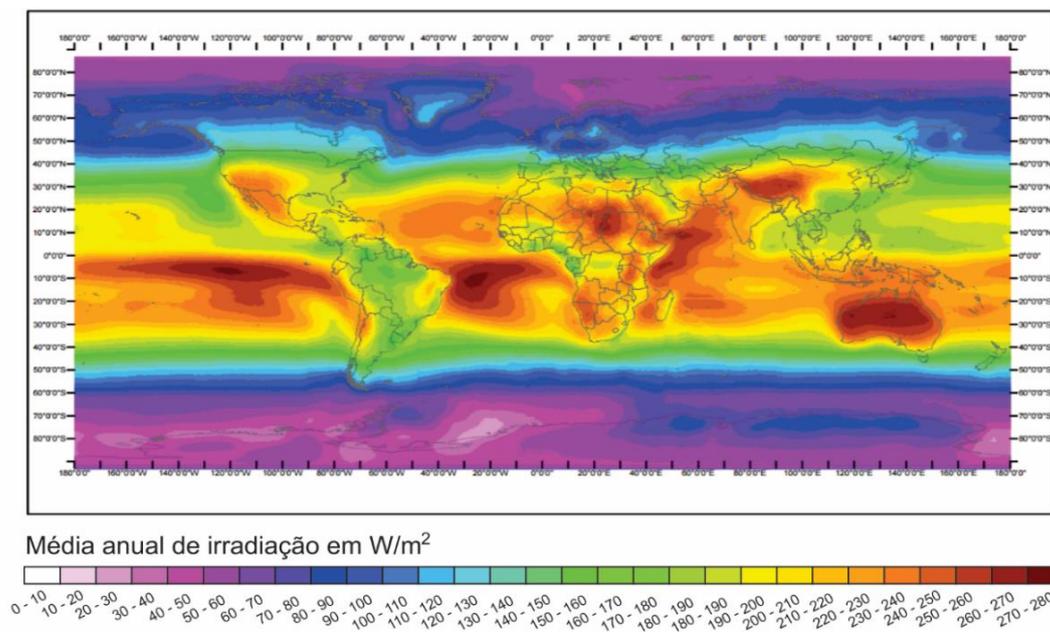


Figura 2.10: Mapa de Irradiação solar média anual. Fonte: (SODA, 2016).

Tais dados são importantes para o desenvolvimento de aplicações de tecnologias para converter a energia proveniente do sol em energia elétrica, pois ao se projetar um sistema fotovoltaico, é exigido uma irradiação solar de no mínimo 125 a 166 W/m^2 , o que em um período de 24h representa de 3 a 4 kWh/m^2 .dia, a qual corresponde a irradiação solar na base temporal diária média anual, valores estes disponíveis para quase todas as zonas entre os trópicos de Câncer e Capricórnio (Pinho e Galdino, 2014).

A *Figura 2.11* ilustra mapas que evidenciam a irradiação média anual no território brasileiro (a) e europeu (b), respectivamente. Nota-se como o potencial solar disponível no Brasil é superior a diversos países da Europa, especialmente da Alemanha, que possui quantidade expressiva de sistemas de geração fotovoltaica instalados (PEREIRA et al., 2006) (JRC, 2014) (PANDEY et al., 2016) (IEA, 2016a).

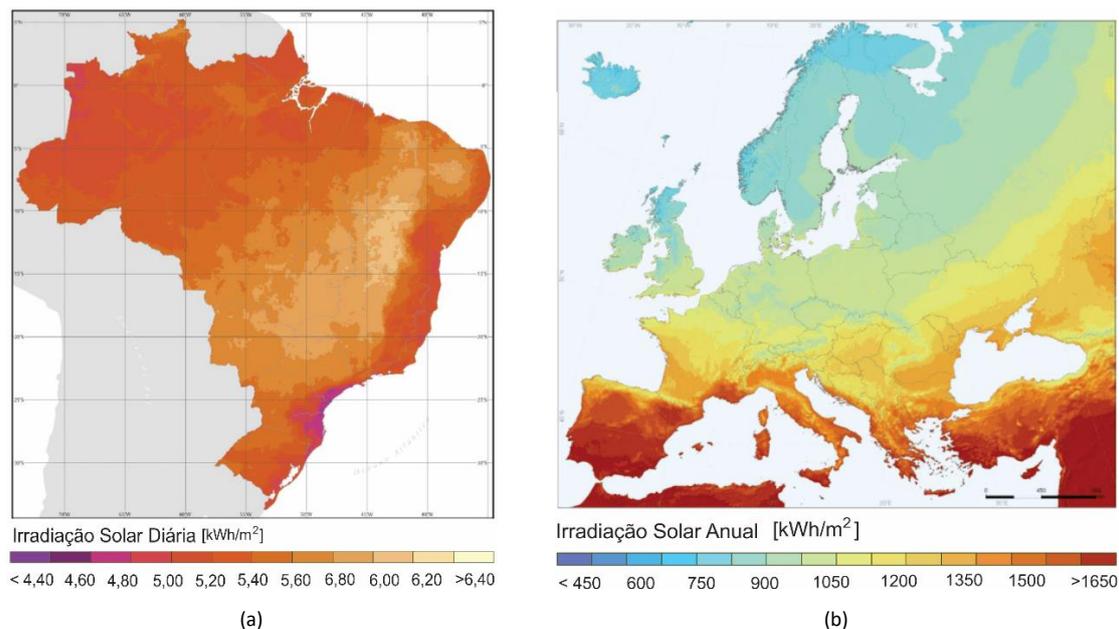


Figura 2.11: Mapa de irradiação solar média anual do Brasil e da Europa. Fonte: (Pereira *et al.*, 2006) e (IET, 2012).

A maior parcela do território brasileiro está localizada parcialmente próximo à linha do Equador, de maneira que não se percebem grandes diversificações na duração da luz solar. Mesmo assim, a fim de potencializar o aproveitamento da energia emitida pelo sol, é necessário ajustar a orientação do coletor ou módulo fotovoltaico em conformidade com a latitude do local.

A radiação solar incidente na superfície da terra é considerada uma das variáveis fundamentais para um bom aproveitamento do recurso solar disponível em diversas regiões. Ainda assim, há outra variante importante que pode ser considerada para a viabilidade de tecnologias fotovoltaicas, representada pela quantidade de horas de sol pleno (HSP), a qual é caracterizada pelo valor acumulado de energia solar ao longo de um dia. Esta grandeza expressa o número de horas em que a irradiância solar deve manter-se inalterável e igual a 1 kWh/m^2 (Pinho e Galdino, 2014) (Jucá e Carvalho, 2013).

A Figura 2.12 ilustra a definição do HSP para 03 (três) dias com distintos perfis de irradiância, o qual é utilizado para estipular a dimensão do gerador fotovoltaico, ou a potência pico da instalação. Nota-se que ao nível da superfície global, a irradiância solar máxima fixa-se em um ponto de 1 kWh/m^2 , e desta forma 01 HSP é a energia obtida no decorrer de uma hora com essa irradiância ao longo de um dia (Pinho *et al.*, 2008). No Brasil, o número de horas de sol por dia varia entre 4 a 8 horas, conforme pode ser verificado na Figura 2.13. Em conformidade com o mapa, a maior insolação média diária em um ano encontrada no território brasileiro, corresponde a 8 horas de sol, que pode ser visualizada na região do sertão nordestino, contemplando a área que abrange o sudeste do Estado do Piauí com a região noroestes do Estado da Bahia. De forma complementar, a região leste do Estado do Ceará, próxima das regiões oeste dos Estados do

Rio Grande do Norte e da Paraíba apresentam disponibilidade solar elevada e encorajadora de investimentos em tecnologias fotovoltaicas.

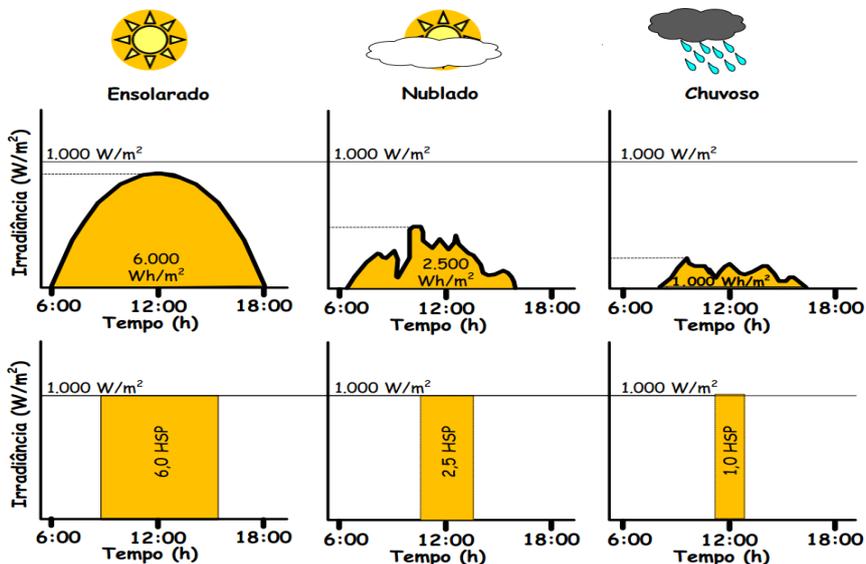


Figura 2.12: Dias com diferentes valores de HSP, em conformidade com os perfis de radiação solar diária. Fonte: (Pinho *et al.*, 2008).

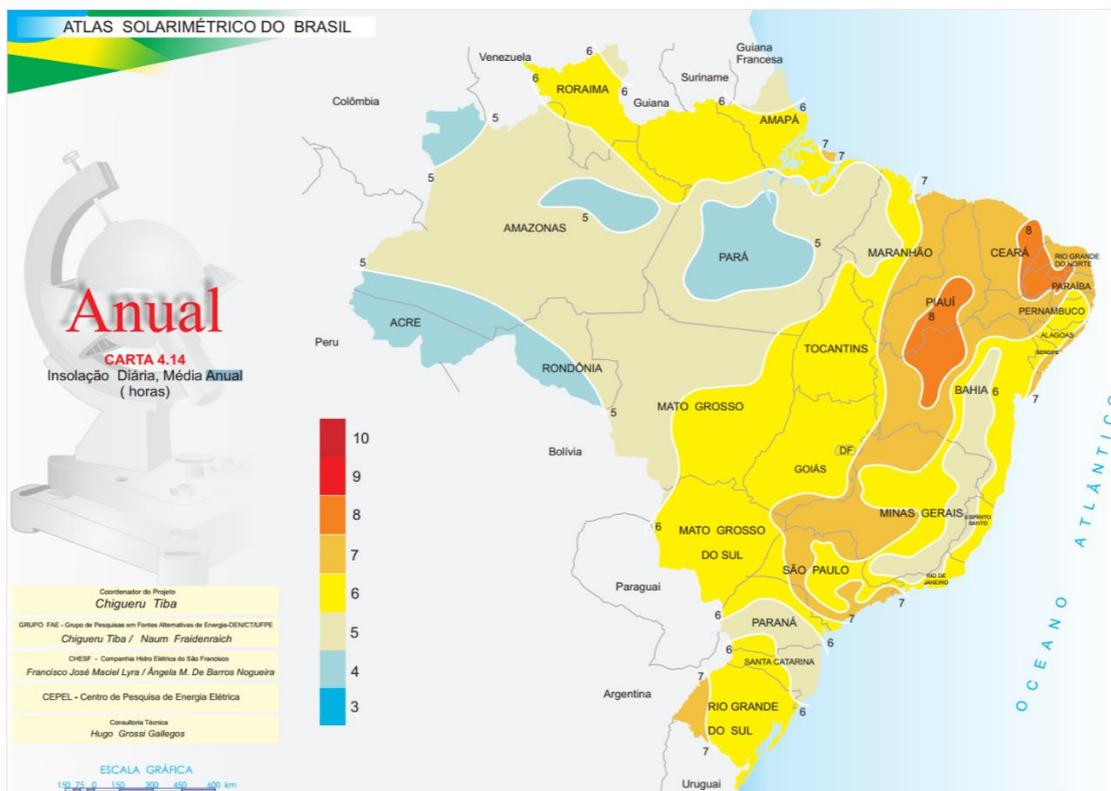


Figura 2.13: Insolação diária média anual. Fonte: (Tiba, 2000).

2.2.2 Formas de Aproveitamento da Energia Solar

O uso da energia solar como fonte direta de geração de eletricidade é considerado uma prática contemporânea, que teve seu início por volta do século passado, meados de 1956. A estrela central do sistema solar dispõe de um amplo potencial de sua utilização por meio de sistemas de captação e conversão em outras formas de energia, tais como a térmica e a elétrica. Baseado neste escopo, diferenciam-se duas tecnologias de geração: a heliotérmica, que consiste em aquecer um fluido a partir da energia solar para produzir vapor, e a fotovoltaica, que apoia-se na conversão direta da luz em eletricidade (Pinho e Galdino, 2014) (Reis, dos, 2015) (Adam, 2001).

Na geração de energia solar térmica ou heliotérmica (CSP - *Concentrated Solar Power*) são utilizados dois tipos de coletores solares que aquecem fluidos, podendo ser classificados em coletores concentradores e coletores planos, o primeiro, está associado a aplicações em temperaturas superiores a 100°C, podendo atingir até 400°C para o acionamento de turbinas a vapor e subsequente geração de eletricidade. Já o segundo, para aplicações residenciais e comerciais em baixa temperatura, aproximadamente 60°C, para o aquecimento de piscinas, ar quente para secagem de grãos, aquecimento de água para banho, etc. (Pinho e Galdino, 2014). Na produção de energia solar fotovoltaica, o elemento primordial para a conversão direta da luz solar em energia elétrica é a célula fotovoltaica, um produto construído com material semicondutor, o qual se utiliza do efeito fotovoltaico, para esse fim.

Ambas tecnologias conciliadas representam uma porção pequena da matriz energética global, porém requerem destaque especial, em virtude de seus aspectos positivos, tais como: rápida expansão da capacidade instalada nos últimos anos, vinculada a potente redução de custos; grande potencial técnico de aproveitamento; e a não emissão de poluentes atmosféricos no decorrer de sua operação. Tais características incentivaram pesquisas para o aproveitamento da energia proveniente do sol como possibilidade de suprimento elétrico (Tolmasquim, 2016). Na prática, diversas instituições (Greenpeace, GWEC e SolarPower Europe, 2015) (IEA, 2014a) (IEA, 2014b), visam em suas pesquisas a longo prazo maior inserção da produção elétrica total resultante da geração heliotérmica e fotovoltaica.

Apesar da tecnologia heliotérmica ser bastante difundida na indústria em virtude de suas especificidades e benefícios, a queda de preço significativa de células e módulos fotovoltaicos, tornam estas mais competitivas e disseminadas mundialmente (Pinho e Galdino, 2014) (IEA, 2016a). A *Figura 2.14* apresenta as taxas médias de crescimento anual da capacidade de energia renovável, demonstrando a tecnologia fotovoltaica em destaque no período de 2010 a 2015. Quando comparada a outras formas de geração de energia, a tecnologia fotovoltaica, em 2015, correspondeu a 28%, quase três vezes maior do que a CSP no mesmo período (Seyboth *et al.*, 2016).

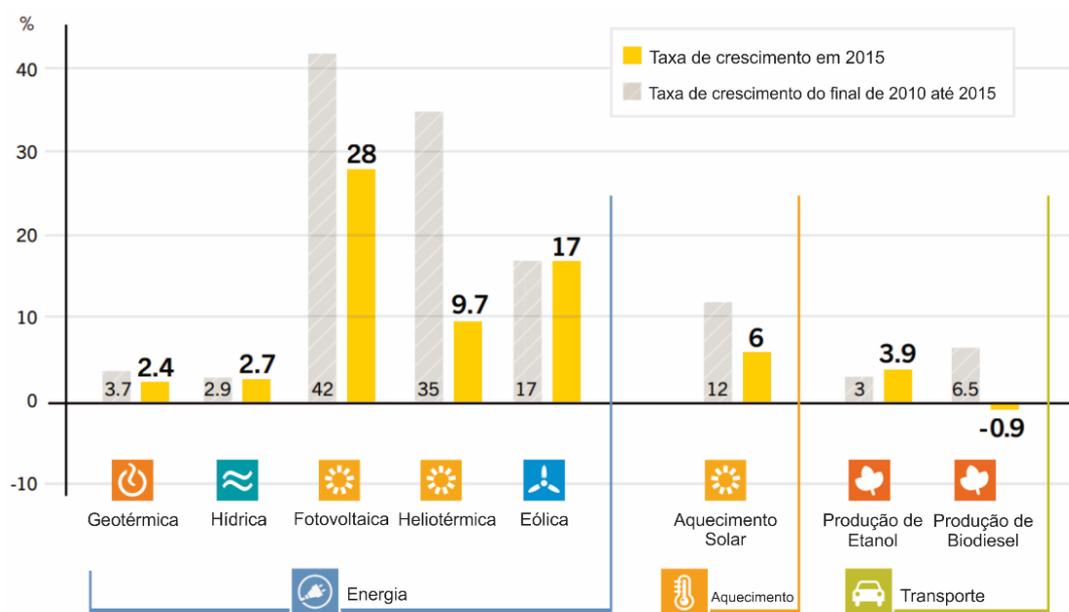


Figura 2.14: Taxas anuais de crescimento da capacidade de energia renovável 2010-2015. Fonte: (Fu *et al.*, 2016).

Dessa forma, o potencial fotovoltaico não pode ser menosprezado, pois além disso, essa energia proveniente do sol é responsável pela origem, seja de forma direta ou indireta, de praticamente todas as outras fontes de energia existentes, como por exemplo, hidroeletricidade, eólica, biomassa, geotérmica e etc. (Pinho e Galdino, 2014) (Tolmasquim, 2016) (Zilles *et al.*, 2012) (GREF, 1993).

2.2.3 Aplicações de Sistemas Fotovoltaicos

Quando se deseja utilizar um determinado tipo de aplicação fotovoltaica, deve-se contemplar sua aplicabilidade e/ou disponibilidade dos recursos energéticos, pois nesse caso, cada tipo possui complexidade variável que envolve fatores como, investimento inicial, custo de manutenção, poluição do ar e sonora, área ocupada pelo sistema fotovoltaico, entre outros.

Os sistemas fotovoltaicos podem ser categorizados em dois tipos principais de aplicações: isolados (SFI) e conectados à rede (SFCR) (Reis, dos, 2015), em que os SFI se subdividem em Individuais e Em Minirrede. Os SFCR por sua vez, são divididos em Grandes Centrais e Urbanos, podendo ainda, os Urbanos, serem Integrados à edificação ou Aplicados a Edificação conforme ilustra a *Figura 2.15* (Pinho e Galdino, 2014) (Urbanetz Junior, 2010) (Jannuzzi, 2009).

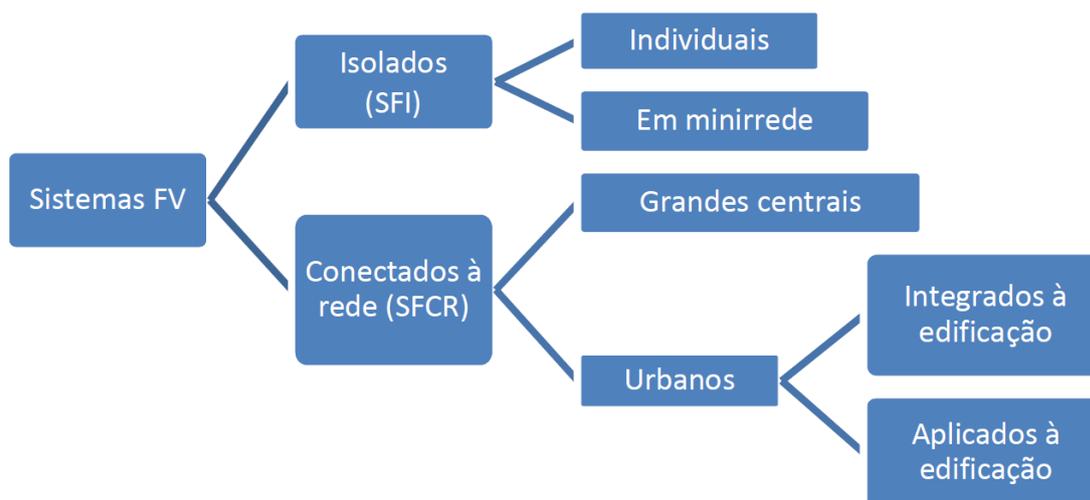


Figura 2.15: Categorias de Sistemas Fotovoltaicos. Fonte: (Urbanetz Junior, 2010).

Quando a geração de energia produzida por um SFI for unicamente para atender apenas uma unidade consumidora (UC), denomina-se Individual ou Sistema Fotovoltaico Domiciliar (SFD). Em contrapartida, quando a geração for compartilhada em um grupo limitado isolado de unidades consumidoras que estão geograficamente próximas umas das outras, chama-se Sistemas Isolados em Minirrede (Manrique, 2015) (Urbanetz Junior, 2010).

No primeiro caso, a eletrificação rural baseia-se no atendimento por meio da energia solar, de residências individuais, possibilitando aos favorecidos estender suas atividades diárias, incluindo lazer, educação, agricultura, entre outros. Já no segundo caso, a eletrificação de lugares remotos é feita com a utilização de sistemas em minirredes fotovoltaicas, que objetiva fornecer energia elétrica de forma confiável, e ao mesmo tempo diminuir a dependência de recursos externos, visto que a tecnologia mais difundida nesse tipo de sistema é o gerador a diesel, que apresenta alto custo operacional e desvantagens socioambientais.

Os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR) rejeita uso de acumuladores de energia, uma vez que a energia gerada por esses sistemas tem a possibilidade de serem consumidas diretamente pelos consumidores, ou introduzida diretamente na rede convencional, para posteriormente ser consumida pelas unidades consumidoras ligadas ao sistema de distribuição, representando uma fonte complementar ao sistema elétrico ao qual está conectado (Adam, 2001) (Pinho e Galdino, 2014), conforme mostra a *Figura 2.16*.

Os SFCR podem ser classificados em Grandes Centrais e Urbanos (Urbanetz Junior, 2010). Em grandes centrais os sistemas geradores de energia elétrica são de médio e grande porte, localizados a longas distâncias dos centros consumidores, constituindo-se de vários geradores fotovoltaicos interligados à rede elétrica, conectado a um ou mais inversor, o qual demandam potências da ordem de MWp. Por serem um sistema de geração centralizada, com finalidade de distribuição e não de autoconsumo, via de regra são operados por produtores independentes e

sua conexão com a rede de energia elétrica é normalmente feita em média e alta tensão (13,8 ou 34,5 kV). Mesmo assim, é importante destacar, que o nível de tensão de conexão da central geradora deve ser definido pela distribuidora devido às limitações técnicas da rede (Pinho e Galdino, 2014).

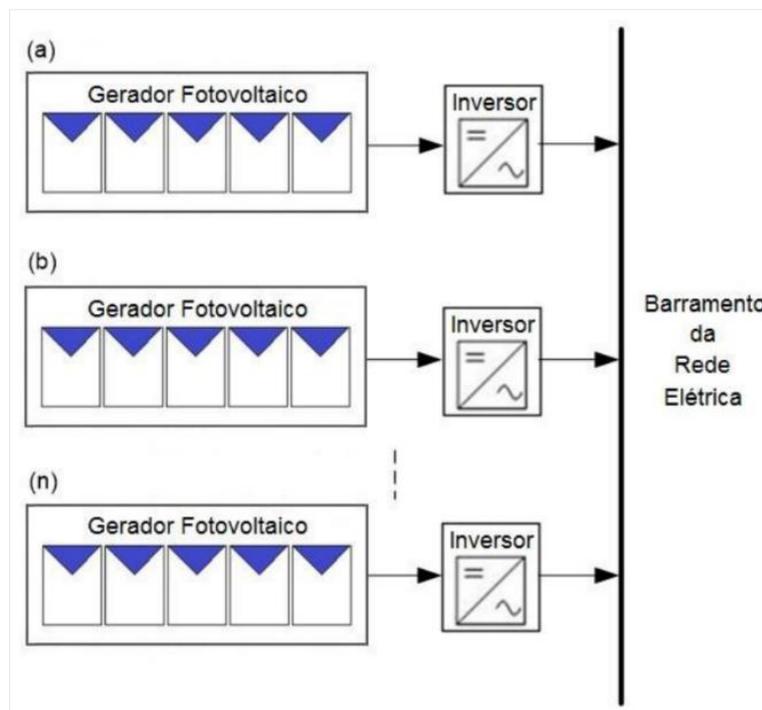


Figura 2.16: Esquema de Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede. Fonte: (Pinho e Galdino, 2014).

Em SFCR urbanos, existe uma distinção quando se deseja empregar painéis fotovoltaicos na edificação, uma vez que podem ser aplicados ou integrados à edificação. Quando aplicados, os SFCR dispensam a criação de novos espaços para sua instalação, podendo ser empregados em edificações já existentes sobre os telhados ou fachadas, desempenhando não apenas um papel de fonte de energia, mas como elementos de sombreamento e diferencial arquitetônico do próprio edifício. Os sistemas fotovoltaicos integrados a edificações (SFIE) podem ser melhor aproveitados quando definidos ainda na etapa de projeto da edificação, podendo inclusive substituir outros materiais nas coberturas ou fachadas opacas ou de vidro, diminuindo o custo final da obra (Pinho e Galdino, 2014) (Rüther, 2004).

O sistema fotovoltaico conectado à rede urbano se torna vantajoso para aplicações de baixa tensão, devido ser uma forma de geração distribuída dando reforço para rede elétrica em pontos selecionados, estratégia que vem sendo usada com sucesso em inúmeros países (Rüther, 2004). O SFCR urbano reside no fato de que é uma iniciativa que conjuga economia e sustentabilidade, podem representar usinas descentralizadas que não ocupam área extra, pois estão integradas ou aplicadas à edificação e a energia gerada pode ser totalmente utilizada no local de consumo,

diminuindo perdas com transmissão e distribuição, além de reduzir o consumo de energia oriunda da concessionária de energia elétrica (FGV Energia, 2016) (Martino Jannuzzi, De, 2000) (Rüther, 2004) (INEE, 2016).

Nas instalações de SFCR os painéis fotovoltaicos são conectados ao inversor de corrente contínua, que por conseguinte faz a interface com a rede elétrica convencional. A energia consumida da concessionária e a energia injetada na rede de distribuição são registradas separadamente por um medidor com leitura bidirecional.

Este sistema de medição em dois sentidos denomina-se sistema *net metering* ou sistema de compensação de energia para geração de energia solar, que é caracterizado por permitir que a energia excedente gerada pela unidade consumidora individual seja vendida para a concessionária por um preço abaixo do cobrado ao consumidor pela concessionária (Rosa, 2016), a qual funcionará como um sistema de armazenamento, cumulando excessos e posteriormente compensando o usuário com o consumo de energia elétrica ativa dessa mesma unidade consumidora ou outra unidade, porém de mesma titularidade. É o mais simples e o mais adotado sistema em diversos países investidores em energia solar fotovoltaica, em especial países do continente americano (Rüther, 2004) (Pinho e Galdino, 2014) (ANEEL, 2012a).

Quando o SFCR gerar energia excedente, em relação a demanda da unidade consumidora, esse excesso é entregue a energia elétrica e o medidor registra-a. Por outro lado, quando a unidade consumidora consome mais energia do que a produzida pelo SFCR, o medidor registra esse fluxo em seu sentido convencional de medição. Nesse contexto, a tarifa de importação e exportação de energia da rede e para a rede deve ser a mesma e depende unicamente das concessionárias de energia elétrica do país em questão, obedecendo às normas técnicas específicas para instalações elétricas de baixa tensão (ABNT, 2005) (Rüther, 2004).

Sendo assim, esse processo de medição bidirecional incentiva os consumidores de energia elétrica a difundir a geração distribuída, além de trazer outros benefícios ao consumidor: tais como, consumo mais eficiente de energia, possibilidade de atendimento remoto da concessionária, melhor monitoramento da rede pela distribuidora e principalmente a redução de perdas técnicas e não-técnicas de transmissão e distribuição de energia, entre outros (ANEEL, 2012b).

2.2.4 Componentes de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede

Efeito Fotovoltaico

A energia solar fotovoltaica é o resultado da conversão direta da radiação solar em eletricidade por meio de dispositivos elétricos constituídos de materiais semicondutores, quando exposto a energia radiante emitida pelo Sol.

O semicondutor mais usado para a confecção desses componentes eletrônicos é o silício (Si), elemento número 14 da tabela de classificação periódica, o qual existe em grande quantidade na crosta terrestre (Tolmasquim, 2016) (American Chemical Society, 2016). Acrescentando-se átomos de fósforo e boro, ao silício, num processo conhecido como dopagem, forma uma junção **pn**, a qual fica exposta a fótons com energia maior que o *gap* existente entre a banda de valência e condução, ocorrendo a produção de pares elétron-lacuna, se isto ocorrer na área onde o campo elétrico é diferente de zero, as cargas que são aceleradas, geram uma corrente através da junção e esse deslocamento de cargas dá início a uma diferença de potencial, que é denominado efeito fotovoltaico (Reis, dos, 2015).

Célula Solar

Através do efeito fotovoltaico, as células solares convertem de forma direta a energia do sol em energia elétrica de maneira estática, silenciosa, não-poluente e renovável (Rüther, 2004). O avanço tecnológico está presente em toda cadeia produtiva de dispositivos fotovoltaicos, a construção de células mais eficientes conforme mostra a tabela 2.3, economicamente acessíveis e adaptáveis com as mais diversas aplicações ainda perdura como objetivo central de pesquisadores ao redor do mundo (Tolmasquim, 2016).

Várias tecnologias de confecção de células fotovoltaicas foram desenvolvidas nos últimos 60 anos (Pinho e Galdino, 2014), tais como, filmes finos de telureto de cádmio (CdTe), disseleneto de cobre índio e gálio (CIGS), silício amorfo hidrogenado (a-Si:H), silício microcristalino (c-Si), silício crescido em fitas (Si-fitas), multijunção de alta eficiência, células baseadas em corantes (DSSC¹¹) ou polímeros, e as células fabricadas a partir de lâminas de silício cristalino ultrapuro (c-Si) que dominam o mercado mundial atualmente. Estas últimas podem ser constituídas de cristais monocristalinos ou policristalinos, respondendo por aproximadamente 94% da fabricação total de células fotovoltaicas em 2016, para países membros do PVPS IEA (Fraunhofer ISE, 2015) (Pinho e Galdino, 2014) (IEA, 2016a). Atualmente as células fotovoltaicas apresentam diversas eficiências de conversão, que variam conforme o material e tecnologia empregada. A eficiência de uma célula solar é o parâmetro que representa o quão efetivo é o processo de conversão da irradiação solar em energia elétrica (Pinho e Galdino, 2014) (Green *et al.*, 2012).

¹¹ DSSC: Dye Sensitized Solar Cells

A *Tabela 2.3* apresenta as maiores eficiências construídas de células fotovoltaicas. As células multijunção apresentam a máxima eficiência, alcançando o valor de 37,9%, são constituídas de elementos dos grupos 13, 14 e 15 da tabela periódica, que correspondem a família do boro, carbono e nitrogênio, respectivamente. A associação desses materiais permite absorver os fótons de grande parte do espectro solar, porém devido ao seu custo elevado são utilizadas para aplicações específicas, como por exemplo, uso na indústria espacial (IEA, 2016a).

As mais utilizadas são as células fotovoltaicas de silício, produzidas em laboratório atingindo eficiência de 26,3% (Green *et al.*, 2017). Por ser uma tecnologia consolidada e confiável, são utilizadas na maioria das aplicações terrestres em qualquer escala, principalmente nos principais mercados mundiais, China, Japão e Alemanha (Rüther, 2004).

Tabela 2.3: Eficiências das células fotovoltaicas produzidas em laboratórios até 2015. Fonte: (Green *et al.*, 2017).

Tecnologia Empregada	Classificação	Eficiência (%)
Silício	Monocristalino	26,3 ± 0,5
	Policristalino	21,3 ± 0,4
	Filmes finos Transferidos	21,2 ± 0,4
Compostos III A-VA (13-15)	GaAs (filme fino)	28,8 ± 0,9
	GaAs (policristalino)	18,4 ± 0,5
	InP (monocristalino)	22,1 ± 0,7
Calcôgenicos Compostos II B-VI A (ou 12-16)	CIGS ($\text{CuIn}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{Se}_2$) (filme fino)	18,7 ± 0,6
	CdTe (filme fino)	21,0 ± 0,4
Silício amorfo/nanocristalino	Amorfo (a-Si) (filme fino)	10,2 ± 0,3
	Nanocristalino (nc-Si)	11,8 ± 0,3
Células Sensibilizadas por Corantes	-	11,9 ± 0,4
Células Orgânicas (filme fino)	-	11,2 ± 0,3
Multijunção	InGaP/GaAs/InGaAs	37,9 ± 1,2
	a-Si/nc-Si/nc-Si (filme fino)	14,0 ± 0,4

Módulo Fotovoltaico

O componente essencial para a geração fotovoltaica é a célula solar. No entanto, para obter um melhor aproveitamento energético, às células são utilizadas em conjunto, interligadas eletricamente e encapsuladas em série e ou/paralelo, pois individualmente têm baixa tensão e

corrente de saída, sendo da ordem de 0,5 a 0,8 volts, para as células de silício. Sendo assim são necessárias 36, 60 e 72 células, ligadas em série para formar os módulos fotovoltaicos, de modo a fornecer uma saída única de tensão e corrente (Pinho e Galdino, 2014).

Módulos fotovoltaicos geram energia elétrica em corrente contínua (CC) e são projetados e estabelecidos para serem utilizados, sob diversos eventos climáticos, como sol, chuva, neve, granizo, vento, entre outros, tendo que funcionar satisfatoriamente nestas condições por períodos de 30 anos ou mais. Devido a essas e outras características um módulo fotovoltaico típico é constituído por diversas camadas (Tolmasquim, 2016) (Zilles *et al.*, 2012), tais como, moldura de alumínio, selante, vidro, encapsulante, células fotovoltaicas e *backsheet*, conforme exposto pela *Figura 2.17*.

A moldura de alumínio é a parte estruturante do módulo, adiciona robustez e garante a sua integridade nas mais inúmeras circunstâncias. O selante é responsável por impedir a entrada de gases e umidade, além de proteger o interior da placa solar de vibrações e choques mecânicos. O vidro para a fabricação do módulo fotovoltaico é especial, ultrapuro, com baixo teor de ferro, revestido com uma camada antireflexiva, age protegendo as células e condutores do ambiente, resistindo inclusive, as mais fortes chuvas de granizo de algumas regiões. O encapsulante mais utilizado é o EVA (*Etil Vinil Acetato*) que é encarregado de proteger as células do envelhecimento causado por raios UV, altas temperaturas, umidade, além de otimizar a condução elétrica. Por fim, temos o *backsheet*, o qual está situado na parte de trás do módulo, protegendo a célula fotovoltaica de componentes externos e agindo como um isolante térmico.

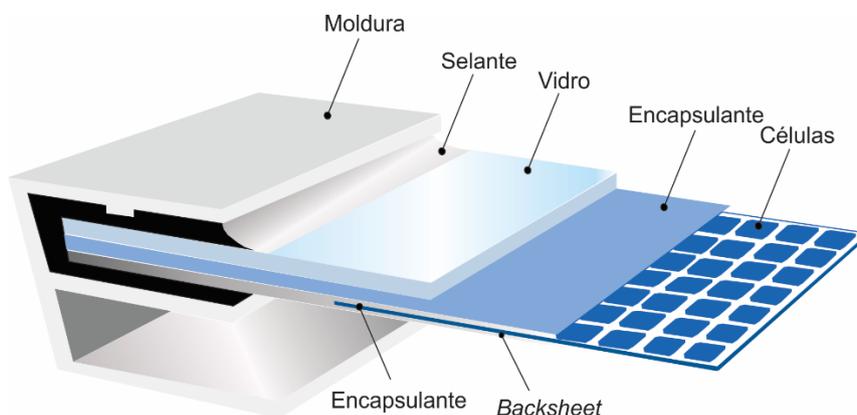


Figura 2.17: Camadas de um módulo fotovoltaico. Fonte: (Tolmasquim, 2016).

Combinados em série e/ou paralelo, os módulos compõem arranjos fotovoltaicos, de acordo com a tensão e corrente desejadas, os quais formam estruturas fotovoltaicas com potência superior aos demais encontrados na indústria atualmente. Um módulo normalmente é identificado pela sua potência elétrica de pico, normalmente identificada nas folhas de dados do fabricante como Wp (Loschi, 2015), o qual é feito nas condições-padrão de ensaio (STC -

Standard Test Conditions), no que concerne a irradiância solar de 1.000 W/m^2 sob uma distribuição espectral padrão para massas de ar (AM - *Air Mass*) de 1,5 e temperatura da célula de 20°C (Pinho e Galdino, 2014). É importante destacar que o desempenho dos módulos é, principalmente influenciado pela irradiação solar, bem como pela horas de sol pleno, temperatura nominal de operação, efeitos de sombreamento, estado de limpeza, entre outros, conforme pode ser melhor especificado em (Pinho e Galdino, 2014).

Por fim, com relação ao processo de instalação dos módulos fotovoltaicos em edificações, observa-se que há várias opções disponíveis, porém em cenários com característica de geração distribuída urbana (próximo ao centro de consumo), o sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica pública deve ser aplicado na edificação. Dentre as opções disponíveis destaca-se à opção de instalação na cobertura das edificações ou em suas fachadas, dependendo do projeto arquitetônico da edificação e da área disponível para aplicação, conforme ilustra a *Figura 2.18*.

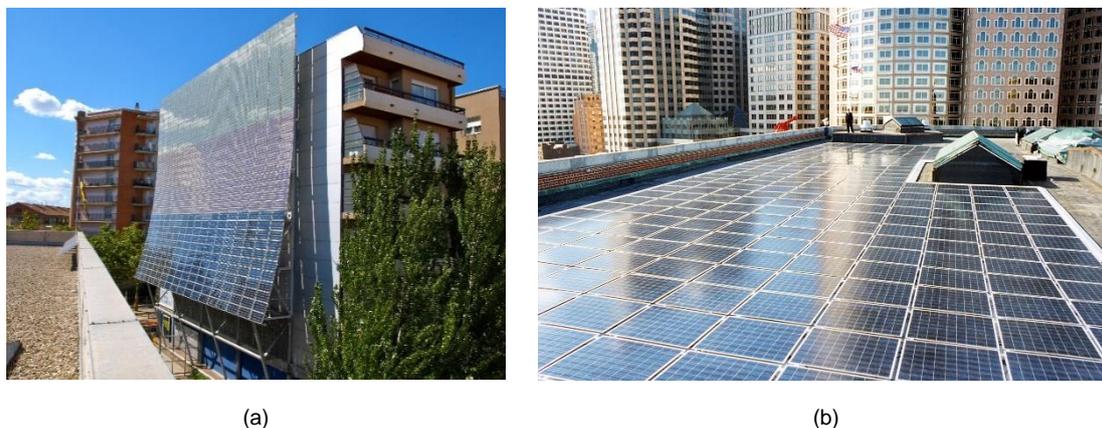


Figura 2.18: Exemplo de estruturas fotovoltaica: (a) aplicadas em fachadas (Wikiwand, 2017). (b) Coberturas de edificações (Stockergy, 2017).

Inversor

A produção de energia é gerada em corrente contínua (CC) pelos módulos. Por esse motivo, normalmente é necessário a utilização de um dispositivo elétrico que possui a finalidade de transformá-la em corrente alternada (CA) para autoconsumo ou para inserção na rede elétrica convencional (Pinho e Galdino, 2014) (Peruzzo, 2012). Considerado um equipamento de alta eficiência, aproximadamente 99%, o inversor tem como função transformar uma tensão corrente contínua (CC) proveniente de diversas fontes, tais como, baterias, células a combustível ou módulos fotovoltaicos, em uma tensão corrente alternada (CA), em que a diferença de potencial elétrico de saída deve ter amplitude, frequência e conteúdo harmônico apropriado às cargas a

serem alimentadas (Pinho e Galdino, 2014) (Peruzzo, 2012) (Reis, dos e Santos, 2015) (IEA, 2016a).

Devido existirem variadas aplicações com características específicas, há disponível no mercado diferentes tipos de inversores, para satisfazer as exigências de cada propósito. Em alguns casos, esses dispositivos fazem parte de equipamentos maiores, por exemplo, motores elétricos de indução. Já para sistemas fotovoltaicos, os inversores podem ser categorizados dependendo do tipo de aplicação em que se deseja implementar: sistemas fotovoltaicos isolados e conectados à rede. Apesar de apresentarem as mesmas noções gerais de funcionamento, no caso de SFCR, eles devem aceitar certas imposições das distribuidoras de energia elétrica, tais como questões que envolvem segurança e qualidade da energia que será injetada na rede. Complementarmente, deve ser levada em consideração a saída do inversor, para sistemas com potência individual de até 05 kW, que devem ser monofásicas, sendo que para níveis acima dessa potência, indica-se a trifásica (Tolmasquim, 2016).

Os inversores são produzidos com a ajuda de dispositivos semicondutores de potência, que compõe chaves eletrônicas controláveis, podendo ser colocadas em estado de condução ou de bloqueio através de um sinal de controle, permitindo dessa forma a conversão, na saída do inversor, da tensão CC para CA mutuamente. Para os primeiros inversores, essas chaves controladas eram compostas de tiristores (SCR, TRIAC e GTO). Enquanto que para os inversores atuais, elas são de transistores (BJT, MOSFET e IGBT), os quais são bastante utilizados no mercado, por não requererem o uso de redes de filtragem complexas e onerosas, que implicam em perdas de energia, visto que os inversores operam com a estratégia de controle de modulação por largura de pulso (PWM - *Pulse Width Modulation*) que permite um bom controle sobre a forma de onda e o valor da tensão de saída (Pinho e Galdino, 2014) (Peruzzo, 2012).

Para se determinar qual inversor utilizar em uma determinada aplicação, a princípio, deve-se saber qual é o tipo de aplicação que se deseja instalá-lo (SFI ou SFCR). No primeiro caso, o dispositivo eletrônico precisa suportar uso de baterias. Outros parâmetros que devem ser especificados são: a forma de onda e distorção harmônica, eficiência na conversão de potência, potência nominal de saída, entre outros, que são melhor especificados em (Pinho e Galdino, 2014).

Se tratando de SFCR os inversores podem ser categorizados em quatro tipos distintos: inversores centrais, microinversores, *string e multistring* (Tolmasquim, 2016) (Pinho e Galdino, 2014). Os Inversores centrais são projetados para aplicações de grande porte como instalações de sistemas fotovoltaicos industriais e usinas solares, possuem natureza trifásica e potência que variam de centenas de kWp até MWp. Os microinversores tem a finalidade de atender módulos fotovoltaicos individualmente, potencializando a produção de cada um.

Adicionalmente, problemas de efeitos de sombreamento ou defeito em um determinado módulo, são isolados, não afetando a produção de energia de todo o arranjo fotovoltaico. Em

contrapartida, há um maior investimento inicial, maiores despesas de O&M e menor eficiência desses aparelhos elétricos. Os inversores *strings* são os mais utilizados em instalações de microgeração. Estes são inversores monofásicos munido de apenas uma entrada SPPM (Seguimento do Ponto de Potência Máxima), compatível apenas com instalações de microgeração de até 10 kWp. Os inversores multistring podem ser monofásicos ou trifásicos, composto de várias entradas independentes com SPPMs para conexão de uma série de módulos. São apropriados para instalações urbanas, nas quais, cada série de módulos pode estar sujeita a diferentes condições de irradiância e/ou sombreamento. Possui potência na faixa de dezenas de kWp.

2.3 Conclusões do Capítulo

Este capítulo apresentou conceitos importantes de redes móveis heterogêneas, assim como principais tipos de estações de base e as diferentes tecnologias de acesso que podem ser utilizadas para o transporte de tráfego móvel das estações base. As principais características das estações de base foram descritas, como por exemplo, cobertura, capacidade e consumo energético, enquanto que questões sobre as tecnologias de transporte, como taxas de dados alcançáveis, cobertura, aspectos de custos financeiros ou de suas principais topologias foram também abordadas neste capítulo.

Complementarmente, conceitos sobre sistemas fotovoltaicos foram abordados, onde questões como radiação solar e sua distribuição no globo foram discutidas. Questões como Horas de Sol Pleno e Efeito fotovoltaico também foram apresentadas, além de um detalhamento sobre os principais componentes do sistema fotovoltaico conectado à rede.

3. DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

3.1 Considerações Iniciais

Este capítulo apresenta modelos matemáticos para avaliar o consumo total de energia (Con_{Total}) das arquiteturas HetNets de (Fiorani *et al.*, 2016), assim como dimensionar o custo total de aquisição de sistemas fotovoltaicos conectado à rede urbana (TCO_{FV}), o qual é dividido em 06 (seis) fases, que são resumidas pela *Figura 3.1*. A técnica proposta pode ser aplicada em qualquer localidade que tenha energia solar disponível o suficiente para gerar energia elétrica. Nesse escopo a solução é utilizada para adequar o gerador fotovoltaico às reais necessidades de consumo energético definidas pelas arquiteturas consideradas neste trabalho, assim como a redução da emissão de CO_2 na atmosfera.

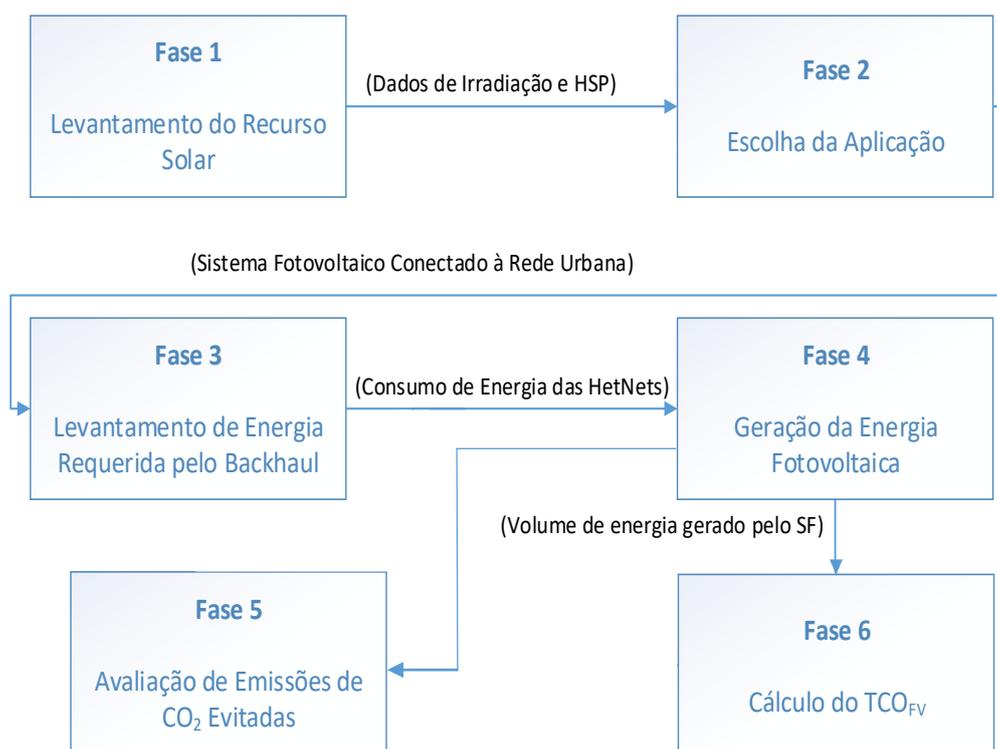


Figura 3.1: Metodologia de avaliação para o custo total de aquisição do sistema fotovoltaico. Fonte: Elaborada pela autora.

A Fase 1, que contempla o levantamento do recurso solar disponível, é usada para quantificar a radiação solar global incidente sobre os painéis fotovoltaicos. Essa fase utiliza como entradas, a irradiação solar diária média anual, que representa o potencial energético (Watts) que incide em uma superfície de 1 m² de área, e o número de horas de sol pleno, que é uma grandeza que representa a energia disponibilizada pelo sol acumulada ao longo de um dia.

A etapa seguinte (Fase 2) é a escolha da aplicação, que é utilizada para definir quais tecnologias fotovoltaicas melhor se adequam ao cenário de utilização, onde são considerados requisitos como, disponibilidade dos recursos energéticos, custos de aquisição, operação e manutenção, área de instalação, dimensão do sistema, entre outros.

A Fase 3 que abrange o levantamento da energia requerida pelo *backhaul*, é usada para determinar o consumo total de energia acumulado, projetada ao longo de 15 anos de análise de um conjunto de arquiteturas de redes móveis heterogêneas. Essa fase utiliza como entradas, consumo total de energia, consumo mínimo da rede, número de medidores e consumo mínimo do medidor.

A Fase 4, de geração de energia fotovoltaica é usada para calcular quanto de energia será necessária para suprir a demanda energética de uma arquitetura. Ela utiliza como entrada, área, eficiência e energia gerada por um painel, assim como, irradiação solar diária, tempo de claridade do sol, potência de entrada do inversor e eficiência do inversor.

Por fim, a Fase 5 realiza uma estimativa sobre o volume de emissões de CO₂ evitadas no meio ambiente, enquanto que a Fase 6 contempla uma análise sobre o Custo Total de Aquisição do Sistema Fotovoltaico projetado, incluindo despesas de investimento e capital (CAPEX), assim como despesas de manutenção e operação (OPEX) do sistema fotovoltaico. Ambas as fases, consideram dados da fase de geração de energia fotovoltaica.

3.2 Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico

3.2.1 Fase 1: Levantamento do Recurso Solar

Nesta fase do dimensionamento, em posse de dados de coordenadas geográficas (latitude e longitude) da região que se deseja instalar o sistema fotovoltaico, deve-se consultar fontes de dados solarimétricos, uma vez que tais fontes apresentam estudos ao longo de vários anos e séries históricas, através da qual é possível se estimar estatisticamente os dados de irradiação solar de um dado local ou região. Adicionalmente, os dados de irradiação solar geralmente são

representados pela grandeza kWh/m².dia e esta dimensão apresenta uma aferição diária, média anual.

Para fins de exemplificação, ao se considerar aleatoriamente um município brasileiro com notáveis índices de disponibilidade solar, considera-se inicialmente, a instalação sob o plano horizontal (0° N), voltado para a face norte geográfico do globo. Neste caso, conforme a *Figura 3.2*, este plano representa o pior cenário de disponibilidade de irradiação solar, pois não considera a orientação e o ângulo de inclinação do painel que ajuda a maximizar a geração de energia elétrica, sendo esta inclinação favorável de 15° N, conforme latitude da região.

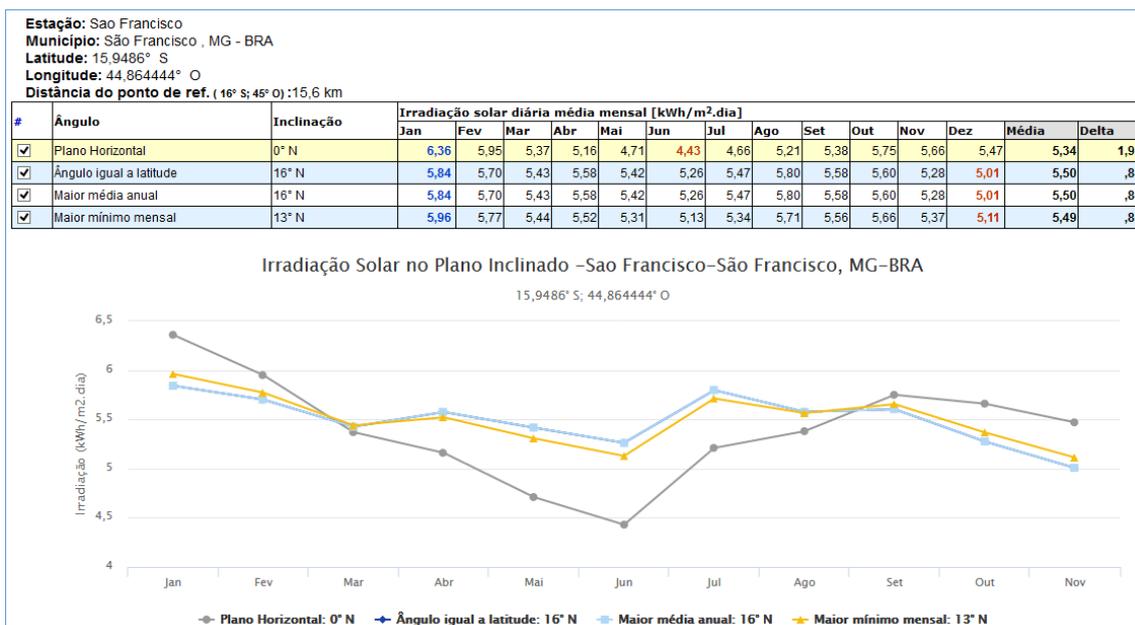


Figura 3.2: Dados de irradiação solar no município brasileiro de São Francisco (MG). Fonte: (CRESESB, 2006).

É importante destacar que no caso do Brasil, algumas regiões de seu território, possuem valores de irradiação solar diária média anual, mesmo considerando o plano horizontal, comparáveis as melhores zonas do globo terrestre, tais como, Califórnia (Estados Unidos), Sudão, etc.

3.2.2 Fase 2: Escolha da Aplicação Fotovoltaica

Nesta fase é realizada a escolha da aplicação fotovoltaica, que deve determinar as tecnologias utilizadas para geração de energia, que deve inclusive considerar em seu escopo, se haverá armazenamento de energia para consumo posterior. A preferência da não utilização de armazenamento de energia elétrica, influencia diretamente no Custo Total de Aquisição do

Sistema Fotovoltaico (TCO_{PV}), dado os consideráveis preços de baterias estacionárias, ou tecnologias similares, que variam conforme a capacidade de armazenamento a ser instalada. A *Figura 3.3* ilustra um exemplo de um sistema de baterias estacionárias comumente utilizada em sistemas fotovoltaicos.

Para o contexto de redes móveis heterogêneas, devido ao fato desta estar inserida predominantemente em cenários urbanos, considerou-se o sistema fotovoltaico conectado à rede urbana, principalmente, por ser amplamente utilizado em instalações distribuídas, de cunho residencial ou comercial, já que possibilita a utilização do sistema de compensação de energia elétrica, em momentos que não haja disponibilidade de recurso solar.

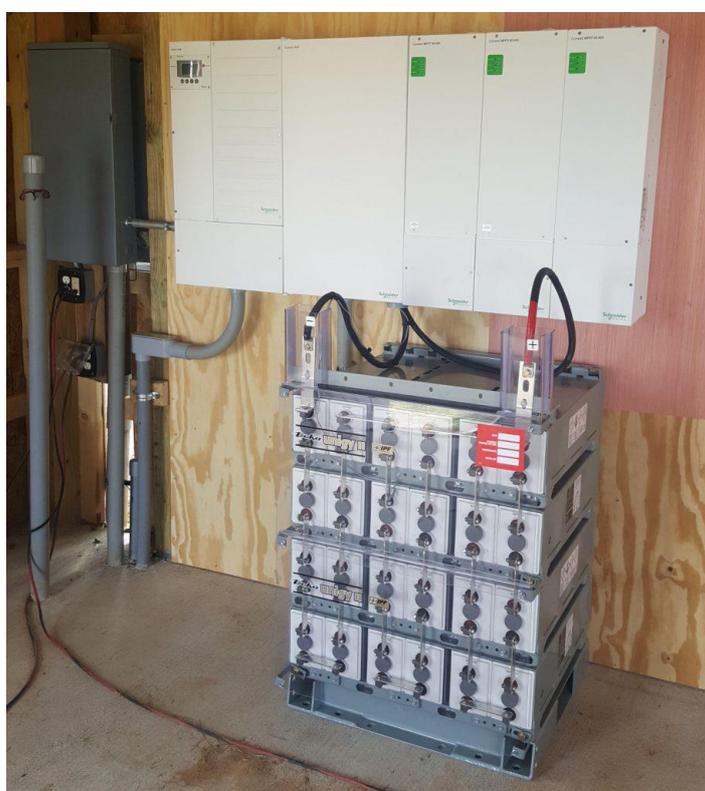


Figura 3.3: Exemplo de sistema de baterias estacionárias utilizadas em Sistemas Fotovoltaicos. Fonte: (MTVSOLAR, 2017).

Adicionalmente, os instrumentos regulatórios de um dado país devem ser considerados nesta fase, para a escolha das tecnologias utilizadas, já que questões como licenciamento de equipamentos que podem ser utilizados, ou mesmo as especificações técnicas dos mesmos, influenciam no projeto técnico final do sistema fotovoltaico, bem como no seu custo de aquisição.

3.2.3 Fase 3: Levantamento da Energia Requerida pelo *Backhaul*

Nesta fase, após realizar-se a análise da demanda energética das arquiteturas de redes móveis heterogêneas consideradas neste trabalho, é possível estimar o consumo médio diário, considerando que esses equipamentos estarão em regime de funcionamento 24h por dia. A partir do consumo médio diário, pode-se calcular quanto cada arquitetura HetNet requer de energia para seu funcionamento, cuja informação é representada neste trabalho pelo parâmetro (Con_{Total}). Assim, a *Tabela 3.1* ilustra a forma de cálculo do consumo médio diário das arquiteturas consideradas neste trabalho.

Tabela 3.1: Exemplo de cálculo de consumo diário de energia. Fonte: Elaborada pela autora.

Carga	Potência (W)		Horas de utilização por dia		Consumo Médio Diário (kWh)
Equipamento 1	15	x	24	=	0,36
Equipamento 2	60	x	24	=	1,44
Equipamento 3	100	x	24	=	2,4

Assim, pode-se definir que o volume de energia elétrica a ser gerado por meio de painéis fotovoltaicos, para o funcionamento mínimo de uma dada arquitetura de HetNet (E_{Min}) é o resultado da diferença entre o consumo de energia elétrica total de uma arquitetura de rede heterogênea (Con_{Total}) e o consumo mínimo franqueado de energia, proveniente da concessionária de energia elétrica, conforme Eq. (16):

$$E_{Min} = Con_{Total} - (N_{Med} \cdot Con_{Grid}^{Min}), \quad (16)$$

onde N_{Med} e Con_{Grid}^{Min} representam o número de medidores de energia elétrica utilizados em uma dada arquitetura HetNet e o consumo diário mínimo franquiado a partir da concessionária de energia elétrica por medidor (kWh), respectivamente. É importante destacar que neste escopo considerou-se que o número de medidores bidirecionais é igual ao número de inversores utilizados na arquitetura HetNet ($N_{Inv} = N_{Med}$).

3.2.4 Fase 4: Geração de Energia Fotovoltaica

Nessa fase, a geração total de energia elétrica do sistema fotovoltaico (E_{gen}) necessária para atender a demanda energética da arquitetura de rede heterogênea em complemento ao consumo

mínimo franqueado a partir da rede elétrica convencional, expressa em kWh, pode ser representada pela Eq. (17):

$$E_{gen} = N_{Inv} E_{Inv}, \quad (17)$$

onde N_{Inv} representa o número de inversores necessários para alimentar uma dada arquitetura HetNet, podendo ser calculado por meio do termo $N_{Inv} = \left\lceil \frac{CON_{Total}}{E_{Inv}} \right\rceil$. Assim, pode-se concluir que $E_{gen} \geq E_{Min}$, uma vez que o valor de N_{Inv} é arredondado para cima, de forma que o volume de energia efetivamente gerado, acaba sendo maior que o mínimo necessário.

Adicionalmente, o volume de energia gerado diariamente por um inversor (E_{Inv}), dado em kWh, é expresso pela Eq. (18):

$$E_{Inv} = \eta_{Inv} N_{Inv}^P E_P, \quad (18)$$

onde η_{Inv} o parâmetro de eficiência energética do inversor que varia entre [0;1], enquanto que N_{Inv}^P e E_P representam respectivamente o número de painéis solares que podem ser instalados por inversor e a energia elétrica gerada por um painel solar. O termo N_{Inv}^P é dado pela Eq. (19):

$$N_{Inv}^P = \left\lceil \frac{P_{Inv}^{Input} t_{solar}}{E_P} \right\rceil, \quad (19)$$

onde P_{Inv}^{Input} e t_{solar} representam a potência nominal de entrada do inversor em kW e o tempo de exposição médio da placa fotovoltaica ao sol (horas) por dia, respectivamente. O termo E_P , expresso em kWh, é obtido conforme Eq. (20):

$$E_P = A_P \eta_P r_s t x_{loss}, \quad (20)$$

onde A_P , η_P e r_s representam a área de um painel solar (m^2), a taxa de eficiência do painel fotovoltaico para conversão da radiação solar incidente em energia elétrica, variando entre [0;1], a intensidade de radiação solar incidente diária ($kWh/m^2.dia$), respectivamente. O parâmetro $t x_{loss}$ representa a taxa de perda de desempenho do painel fotovoltaico ao longo dos anos, variando de modo decrescente dentro do intervalo de [0,8;1].

3.2.5 Fase 5: Emissões de CO₂ Evitadas

O usuário ao consumir energia elétrica da rede convencional, emite grandes quantidades de CO₂ na atmosfera, uma vez que essa energia consumida é proveniente, frequentemente a partir da queima de combustíveis fósseis. Ainda assim, tais volumes de emissões variam bastante

entre os países, uma vez que é necessário considerar as tecnologias que compõem a matriz energética de um dado país, que em geral varia de acordo com os recursos naturais disponíveis ou tecnologias empregadas. Assim, sob a perspectiva da operadora de rede móvel é possível reduzir significativamente a emissão de CO₂, assim como de outros gases poluentes, por meio do sistema fotovoltaico, uma vez que este representa fonte limpa de geração de energia.

Nesta pesquisa, para realizar a estimativa referente ao quantitativo de emissões de CO₂ evitadas por usuário, considera-se a Eq. (21) e como entrada o fator de emissão de CO₂ (Fac_{CO_2}), que representa a quantidade de emissões de CO₂ (kg) que deixou de ser emitida na atmosfera, por quilowatt-hora (kWh) que evitou-se de consumir da rede convencional de energia elétrica, em função da energia elétrica gerada pelos painéis fotovoltaicos.

Tal parâmetro foi extraído do relatório de emissão de CO₂ a partir de combustíveis fósseis, que apresenta os valores deste fator para os vários países que compõem o IEA, analisando a composição da matriz energética de cada um dos países em questão (Ang e Su, 2016). Assim, o cálculo do volume de emissões de CO₂ evitadas por usuário (kg/usuário), através da utilização de painéis fotovoltaicos pode ser descrito conforme a Eq. (21):

$$Emi_{user} = \frac{E_{Min} Fac_{CO_2}}{\rho \cdot A}. \quad (21)$$

3.3 Fase 6: Custo Total de Aquisição

Nesta fase é realizada uma análise sobre o Custo Total de Aquisição (TCO_{FV}) associado à adoção de um sistema fotovoltaico no cenário de redes móveis heterogêneas. O TCO_{FV} é dado pela soma do $CAPEX_{FV}$ e do $OPEX_{FV}$, conforme ilustrado pela *Figura 3.4* e expresso pela Eq. (22). O $CAPEX_{FV}$ é obtido pela soma dos custos de aquisição e instalação de equipamentos, tais como módulos, inversores e Kits de Instalação. Além disso, os custos associados ao processo de instalação dos equipamentos fotovoltaicos são calculados de forma percentual, com base no montante financeiro associado à aquisição de tais equipamentos.

$$TCO_{FV} = CAPEX_{FV} + OPEX_{FV} \quad (22)$$

O $OPEX_{FV}$ contém as despesas de operação e manutenção da estrutura fotovoltaica, que em geral se apresentam de forma anual. É composto por 03 (três) categorias de custo principais: energia elétrica da concessionária, manutenção dos equipamentos fotovoltaicos e aluguel de espaço físico para instalação das placas.

Com relação aos custos associados com energia elétrica, observa-se que as concessionárias de energia em geral cobram um valor de disponibilidade mínima, o qual é dado em quilowatt-hora (kWh), por medidor bidirecional instalado. Este valor, que em geral varia de acordo com o tipo de instalação do medidor (monofásica, bifásica ou trifásica), é sempre cobrado, por mais que não haja consumo registrado no medidor de energia.

Além disso, gastos com manutenção de equipamentos fotovoltaicos, consideram também troca de partes defeituosas, limpeza ou mesmo tempo de garantia dos equipamentos envolvidos, enquanto que as despesas com aluguel, dizem respeito ao aluguel de espaços físicos utilizados para instalação dos painéis fotovoltaicos.

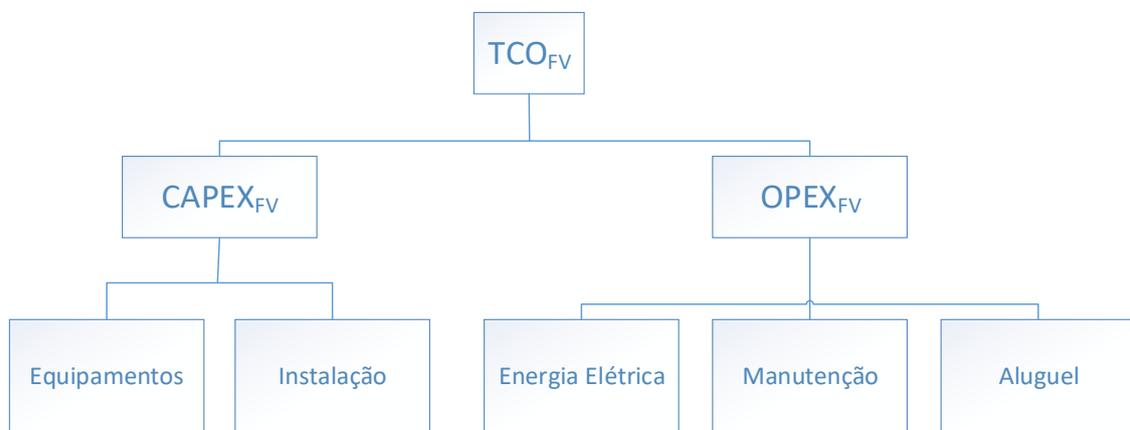


Figura 3.4: Caracterização do Custo Total de Aquisição do Sistema Fotovoltaico. Fonte: Elaborada pela autora.

3.3.1 CAPEX: Custo dos Equipamentos e Instalação

Esta seção apresenta os modelos analíticos utilizados para o dimensionamento do custo de bens de capital associado ao sistema fotovoltaico, em função da demanda energética das arquiteturas de redes heterogêneas apresentadas em (Fiorani *et al.*, 2016). Assim, o $CAPEX_{FV}$ pode ser descrito pela Eq. (23):

$$CAPEX_{FV} = (1 + tx_{install}) C_{equip}, \quad (23)$$

onde $tx_{install}$ e C_{equip} representam a taxa de instalação e custo inicial de aquisição dos equipamentos fotovoltaicos, respectivamente. O custo inicial de aquisição dos equipamentos fotovoltaicos (painéis, inversores e kits de instalação) é calculado conforme a Eq. (24):

$$C_{equip} = \sigma [N_P (C_P^{Unit} + C_{Kit}^{Unit}) + N_{Inv} C_{Inv}^{Unit}] \quad (24)$$

onde N_p representa o número de painéis fotovoltaicos que é dada por: $N_p = N_{Inv} N_{Inv}^p$. Enquanto que C_P^{Unit} , C_{Kit}^{Unit} e C_{Inv}^{Unit} , representam, o custo unitário do painel, kit de instalação dos painéis e inversor, respectivamente. O parâmetro σ varia no intervalo de $[0,6;1]$, de modo a representar uma taxa de depreciação do custo de aquisição dos equipamentos fotovoltaicos, simulando uma possível evolução tecnológica e popularização de tais equipamentos, e conseqüentemente um processo de barateamento no custo de aquisição.

3.3.2 OPEX: Custo de Operação e Manutenção

Esta seção apresenta os modelos analíticos utilizados para o dimensionamento do custo de operação e manutenção associado ao sistema fotovoltaico, considerando a demanda energética das arquiteturas de redes heterogêneas apresentadas em (Fiorani *et al.*, 2016). Assim, $OPEX_{FV}$ pode ser descrito pela Eq. (25):

$$OPEX_{FV} = C_M + N_{Med} (C_{Med} + Con_{Grid}^{Min} C_{purchase}^{kWh}) + N_p A_p C_{m2}^{rent}, \quad (25)$$

onde C_M , N_{Med} , C_{Med} , Con_{Grid}^{Min} , $C_{purchase}^{kWh}$ e C_{m2}^{rent} representam, respectivamente, o custo de manutenção da estrutura fotovoltaica, o número de medidores bidirecionais, o custo de instalação de cada medidor, o consumo mínimo de energia da rede convencional de energia elétrica por medidor bidirecional, o custo monetário de 1 kWh e o custo de aluguel por m² dos telhados dos prédios onde os painéis consideram-se ser instalados. Além disso, N_p e A_p representam o número total de painéis fotovoltaicos utilizados na arquitetura e a área de um único painel, respectivamente. O custo de manutenção da estrutura fotovoltaica é calculado conforme a Eq. (26):

$$C_M = tx_M [N_p (C_P^{Unit} N_{MP} + C_{Kit}^{Unit} N_{MK}) + N_{Inv} C_{Inv}^{Unit} N_{MI}], \quad (26)$$

onde tx_M representa uma taxa de manutenção sofrida pelos equipamentos, enquanto que as variáveis C_P^{Unit} , N_{MP} , C_{Kit}^{Unit} e N_{MK} representam, respectivamente, o custo de aquisição dos painéis fotovoltaicos, o número de manutenções dos painéis, o custo de aquisição do kit de instalação dos painéis, e o número de manutenções do kit.

As variáveis N_{Inv} , C_{Inv}^{Unit} e N_{MI} representam o número de inversores utilizados em uma dada arquitetura, o custo de aquisição dos inversores e o número de manutenções destes inversores, respectivamente, enquanto que a quantidade de manutenções aos quais os kits e inversores estarão sujeitos, pode ser ilustrada pela *Figura 3.5*.

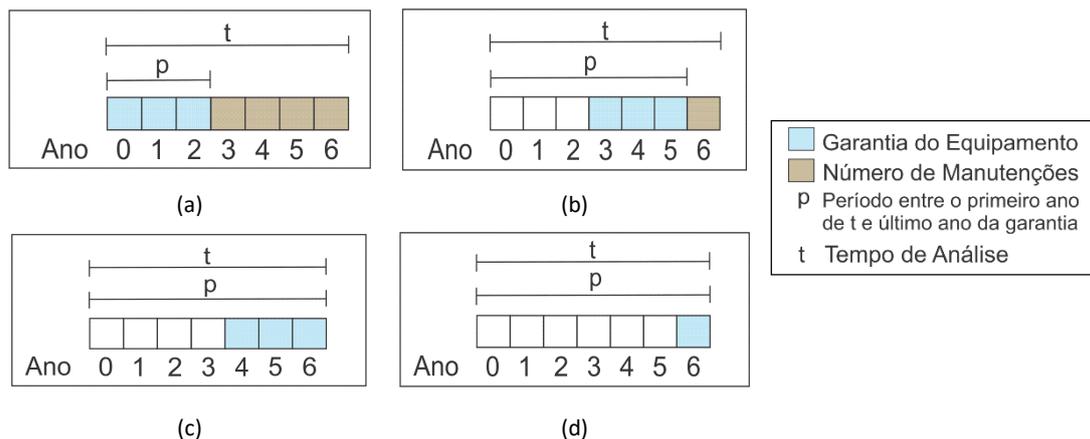


Figura 3.5: Cálculo do número de manutenções realizadas nos equipamentos do SF. Fonte: Elaborada pela autora.

De acordo com *Figura 3.5*, a variável t representa o período de análise (anos), no qual será considerada a avaliação de viabilidade do uso dos equipamentos fotovoltaicos. No contexto deste trabalho é necessário a definição de um período de análise, uma vez que alguns equipamentos, como o painel fotovoltaico, possuem vida útil que pode exceder o período de 30 anos, e aliado a este fato a previsão de consumo energético é projetada até sob um intervalo de tempo menor, além desta projeção possuir um comportamento crescente a cada ano. Assim, na modelagem analítica realizada neste trabalho optou-se por analisar a implantação do sistema fotovoltaico, apenas dentro do período de consumo de energia projetado.

Ainda conforme a *Figura 3.5*, p representa o período compreendido entre o início do período t e o término da garantia do equipamento considerado (kits de instalação ou inversores), também representado em anos. Desta forma, o número de manutenções realizadas nos inversores e kits de instalação é equivalente ao período em anos, ao qual o equipamento ficou descoberto por processos de garantia, dentro do intervalo de análise da estrutura fotovoltaica t , ao se considerar 01 (uma) unidade de manutenção por equipamento ao ano.

Por exemplo, consideremos que temos um período t de 7 anos, e que um dado equipamento fotovoltaico tenha garantia de 03 (três) anos. Sendo assim, segundo a *Figura 3.5 (a)*, se tal equipamento for adquirido no Ano 0, este equipamento estará coberto pela garantia até o final do Ano 2 (totalizando 3 anos). Assim, tal equipamento deverá receber pelo menos 04 (quatro) manutenções programadas, com 01 (uma) manutenção sendo realizada a cada ano, dentro do período t de observação. Se o equipamento for adquirido no Ano 4, conforme a *Figura 3.5 (c)*, este não receberá manutenções programadas dentro do período de análise t , uma vez que o fim de seu período de garantia coincide com o final do período t . Os demais exemplos da *Figura 3.5* seguem a mesma lógica de funcionamento. Assim, a Eq. (27) generaliza o número total de manutenções realizadas nos equipamentos fotovoltaicos, conforme:

$$f(m_x) = \begin{cases} t - p_x, & t > p_x \\ 0, & t \leq p_x \end{cases} \quad (27)$$

Desta forma, temos que $N_{MI} = N_{MK} = f(m_x)$, onde $x \in \{kits, inversores\}$, enquanto que o número de manutenções realizadas nos painéis fotovoltaicos é representado por $N_{MP} = t$, uma vez que neste trabalho consideram-se manutenções anuais nos painéis fotovoltaicos.

3.3.3 Economia Monetária do Usuário

Para gerar-se economia financeira para o usuário final, além de outros fatores, é relevante considerar taxas de importação e exportação de energia da rede e para a rede elétrica convencional. Cada país vem gerando suas próprias normas e prescrições, para a interligação de tais sistemas à rede, no Brasil, por exemplo, o valor da fatura de energia elétrica passou a ser fixada pela concessionária de cada Estado.

A tarifa de importação da rede de energia elétrica agrega valores relacionados aos componentes físicos do sistema, encargos e tributos. Enquanto que a tarifa de exportação de energia para a rede desincorpora esses impostos, já que não haverá transmissão, distribuição, encargos e tributos referente ao fornecimento de energia ao consumidor.

Assim, conceitua-se que a economia monetária do usuário é a energia elétrica gerada de forma excedente (E_{xtra}) pelo sistema fotovoltaico, a qual é vendida à concessionária. Esse saldo positivo pode ser descrito pelo termo $E_{xtra} = (E_{gen} - E_{Min})$. Assim, a economia monetária do usuário (AS_{User}) pode ser descrita conforme a Eq. (28):

$$AS_{user} = \frac{[E_{xtra} C_{sale}^{kWh} + Con_{Total} C_{purchase}^{kWh}] - CAPEX_{FV}}{\rho \cdot A}, \quad (28)$$

onde C_{sale}^{kWh} e $C_{purchase}^{kWh}$ representam respectivamente os preços de venda e compra do kWh, a partir da concessionária de energia elétrica. Adicionalmente, ρ representa a densidade populacional de usuários (usuários/km²) e A representa a área residencial (km²), parâmetros estes que também são utilizados em (Fiorani *et al.*, 2016).

3.4 Conclusões do Capítulo

Neste capítulo foi apresentada uma metodologia para o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos aplicados ao contexto das arquiteturas de redes móveis heterogêneas

apresentadas em (Fiorani *et al.*, 2016). Tal metodologia se baseia em um conjunto de modelos matemáticos que se dividem em 02 (duas) partes principais, isto é, o Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico e o cálculo do Custo Total de Aquisição do mesmo.

Na modelagem que realiza o dimensionamento do sistema fotovoltaico são considerados todos os componentes das arquiteturas de redes móveis utilizados, de forma que a demanda energética gerada por seus equipamentos serve de ponto de partida para o dimensionamento dos equipamentos fotovoltaicos. Outros fatores são considerados durante o processo de modelagem, como características dos equipamentos fotovoltaicos, ou mesmo a intensidade e disponibilidade do recurso solar.

O TCO fotovoltaico é caracterizado, de forma que seus componentes são devidamente apresentados, e inseridos nos modelos desenvolvidos neste trabalho. O TCO fotovoltaico é composto por CAPEX e OPEX, que contemplam custos de aquisição e instalação de equipamentos, processos de manutenção, aluguel, e garantia dos mesmos.

Por fim, este capítulo apresentou uma breve discussão sobre emissões de CO₂ que podem ser evitadas, acompanhadas de modelos utilizados para estimar este volume evitado por usuário da rede móvel.

4. ESTUDO DE CASO E ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 Considerações Iniciais

Esta seção apresenta os resultados da análise realizada sobre o Custo Total de Aquisição do Sistema Fotovoltaico (TCO_{FV}) e sobre as emissões de CO_2 evitadas ao longo da projeção de 15 anos do período de análise associadas à adoção de um sistema fotovoltaico no cenário de HetNets. Essa projeção foi adaptada de (Fiorani et al., 2016), o qual considera um período de análise de 2010 a 2030, totalizando 21 anos, porém, devido a necessidade de dados atuais, em virtude da elaboração desta pesquisa, não foi considerado dados a partir de 2010, mas sim, a partir de 2016, que resultou em um período de 2016 a 2030, totalizando 15 anos de observação, conforme estudo de caso a seguir.

4.2 Estudo de Caso

De forma análoga aos trabalhos de (Fiorani et al., 2016) e (Tombaz et al., 2014), para o estudo de caso deste trabalho foi considerada uma área residencial de 100 km^2 , com densidade populacional de 3.000 usuários por km^2 , além de 10.000 (dez mil) prédios residenciais uniformemente distribuídos, conforme ilustrado pela *Figura 4.1*.

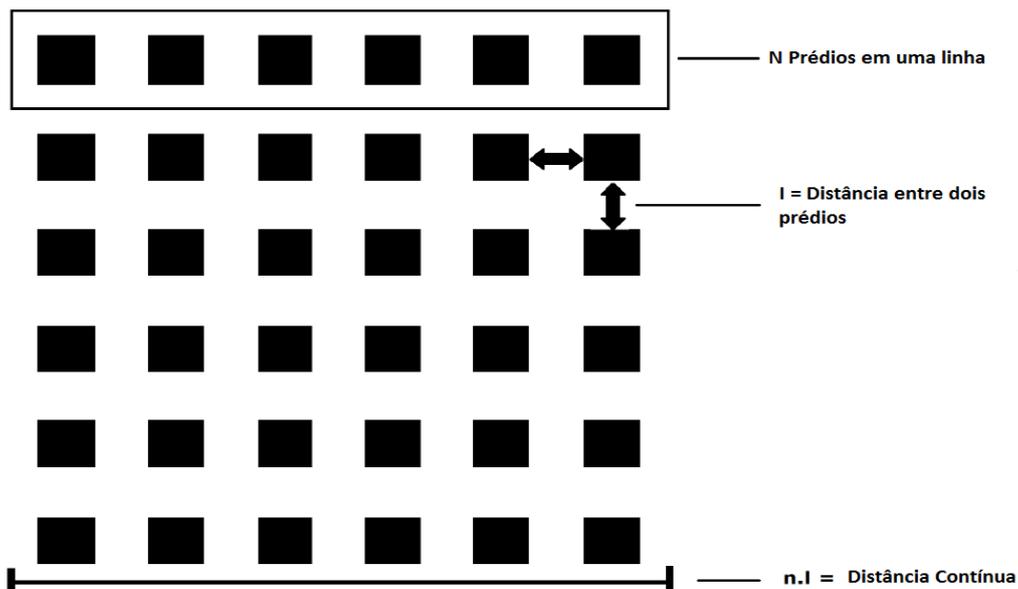


Figura 4.1 Representação dos prédios do estudo de caso. Fonte: Adaptado de (Farias, 2016).

Para simplificação dos modelos apresentados, foi assumido a mesma quantidade de andares e apartamentos para todos os edifícios, neste caso, 05 (cinco) andares, 03 (três) apartamentos por andar, totalizando 15 (quinze) apartamentos por prédio. Adicionalmente, cada edifício foi considerado como tendo uma área útil de cobertura de até 800m².

No cenário proposto adota-se o perfil de geração distribuída urbana, no qual o sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica pública deve ser aplicado na edificação, considerando as coberturas das edificações como local de instalação dos painéis fotovoltaicos, conforme apresentado pela *Figura 4.2*. Adicionalmente, para melhor generalização do estudo e avaliação de viabilidade deste trabalho mesmo em condições não ideais, considerou-se a utilização da irradiação solar incidente no plano horizontal (0°N), apesar desta inclinação representar o ângulo menos proveitoso de produção de energia elétrica. A configuração de inclinação mais adequada para a implantação do SF é o ângulo igual a latitude geográfica do local a ser instalado.

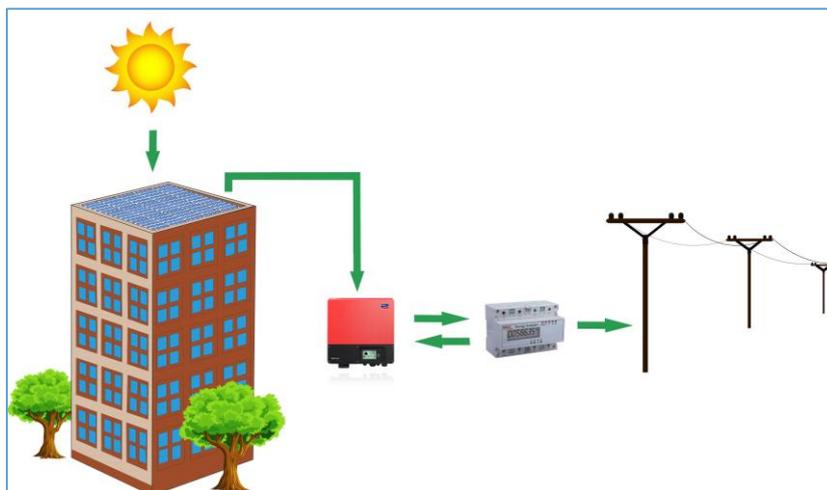


Figura 4.2: Cenário de aplicação horizontal do sistema fotovoltaico. Fonte: Elaborada pela autora.

Através dos dados de consumo total de energia elétrica de cada uma das arquiteturas HetNet apresentadas em (Fiorani *et al.*, 2016), é possível estimar a quantidade de energia que o sistema fotovoltaico deve produzir para complementar o consumo energético individual de cada arquitetura. A *Figura 4.3* ilustra a projeção de consumo energético (kWh) esperado pelas arquiteturas HetNet apresentadas no referido trabalho. Observa-se que todas as arquiteturas possuem crescimento exponencial de consumo de energia elétrica, possivelmente em função das projeções de tráfego de dados móveis esperadas para os próximos anos. Ainda assim, a arquitetura que apresenta maior consumo energético é a Femto-CB, por outro lado, a que apresenta menor consumo energético é a Femto-BB.

É importante destacar, que tais dados de consumo foram obtidos por meio da reprodução de todos os modelos matemáticos propostos por (Fiorani *et al.*, 2016), considerando-se que todos os equipamentos que compõem as arquiteturas estariam ligados 24h por dia, o que resultou em uma projeção de consumo energético para os próximos anos (kWh).

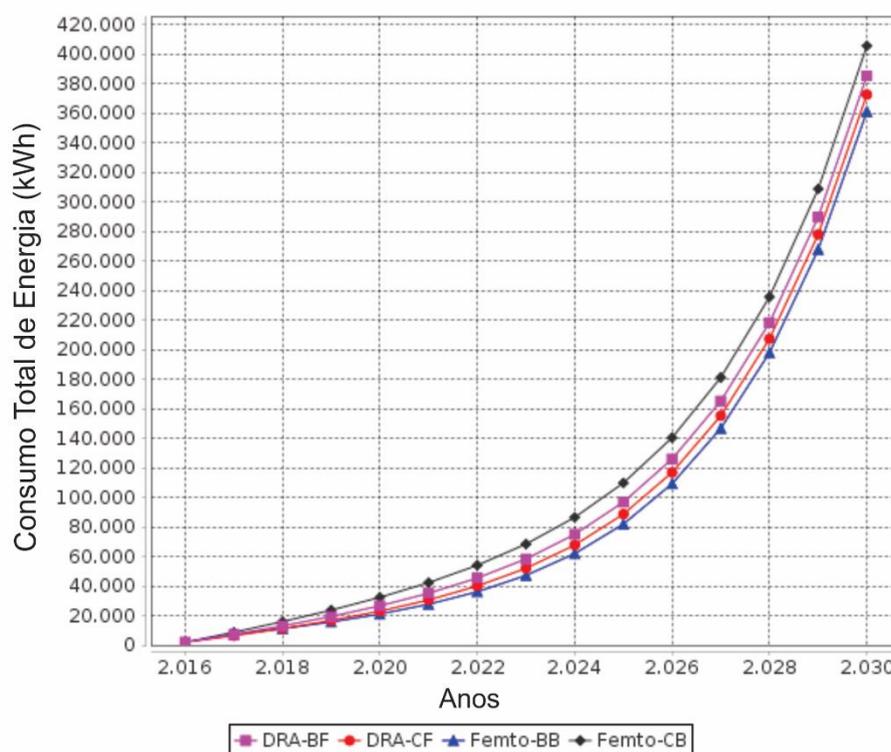


Figura 4.3: Projeção de consumo energético das arquiteturas apresentadas em (Fiorani *et al.*, 2016).

De modo complementar à *Figura 4.3*, a *Tabela 4.1* apresenta o consumo acumulado de energia elétrica ao longo dos 15 anos, expresso em Reais (R\$), de modo a representar um valor de referência para avaliação do sistema fotovoltaico. Neste contexto, é importante destacar que não foi considerado reajuste da tarifa de energia elétrica, apesar da mesma frequentemente possuir comportamento crescente, o que favoreceria o processo de adoção do sistema fotovoltaico.

Assim, o sistema fotovoltaico, para ser considerado vantajoso financeiramente no âmbito das arquiteturas de HetNet, deve possuir o Custo Total de Aquisição (TCO_{FV}) inferior aos valores apresentados na *Tabela 4.1*, caso contrário o custeio com energia elétrica seria a opção mais vantajosa financeiramente, sem evidentemente considerar as vantagens ambientais envolvidas.

Este trabalho considera um período de análise t de 15 anos (conforme Eq. 27), sob o período de 2016 até 2030, onde as implantações das estruturas fotovoltaicas são analisadas considerando um perfil de consumo de energia crescente, dado o progressivo aumento da

demanda de tráfego de dados esperado para os próximos anos nas redes móveis. Desta forma, este cenário de consumo crescente de energia, implicou em uma abordagem anual de aquisição e instalação de estruturas fotovoltaicas, para atender a demanda energética necessária. Assim, anualmente novos equipamentos fotovoltaicos são adquiridos, em adição à infraestrutura já existente, conforme a expectativa de demanda energética do respectivo ano.

Tabela 4.1: Valores de referência para o custo associado ao consumo de energia a partir da concessionária. Fonte: Elaborada pela autora

Arquitetura HetNet	Valor (Milhões de R\$)
Macro+DRA-CF	484,74
Macro+DRA-BF	525,97
Macro+Femto-CB	591,72
Macro+Femto-BB	452,83

Adicionalmente, para realizar o dimensionamento e o estudo técnico de viabilidade técnico-econômico de um sistema fotovoltaico, parâmetros importantes são considerados neste estudo de caso, tais como:

- Dados do painel fotovoltaico: Composto de silício policristalino, o painel possui eficiência energética de 16,68%, com perda de potência anual de 0,5%. Sua infraestrutura física é constituída de 72 células, possuindo uma área de 1,91 m², com vida útil em torno de 25 a 30 anos e tempo de garantia em torno de 10 anos contra defeitos de fabricação. Suas células fotovoltaicas são protegidas por uma camada de vidro temperado e quando posto em condições ideais de insolação produz 320W, 8,69A e 36,8V em corrente contínua. Além disso seu custo unitário é parametrizado sob o valor de R\$ 635,00 (Canadian Solar, 2016). Neste trabalho não foi considerada massa unitária de um painel fotovoltaico, ou mesmo seu peso em conjunto, quando instalados nas coberturas dos prédios considerados;
- Dados do Inversor: Além de converter a CC em CA, o inversor tem como função potencializar o desempenho de geração de energia dos painéis fotovoltaicos. Sua potência de saída nominal é de 60 kW, podendo chegar até 62 kW, dependendo das condições ambientais favoráveis. Possui eficiência de 98,6% e tempo de garantia de 05 anos, conforme especificações do fabricante e seu custo unitário é de R\$ 20.246,45 (Inverter Go, 2016);

- Dados do Kit de instalação do painel fotovoltaico: Representa a estrutura de instalação de um único painel sob forma horizontal, ou seja, sem ângulo de inclinação de acordo com a latitude do local de instalação. É importante ressaltar que o custo com a aquisição de kits de instalação sem inclinação geralmente é inferior à opção com inclinação, porém optou-se por este tipo de instalação, para considerar um cenário menos favorável de captação de radiação solar, e assim tornar a avaliação do TCO Fotovoltaico (TCO_{FV}) mais relevante. O material utilizado na confecção do kit é resistente tanto à corrosão, como a elementos climáticos e atmosféricos. Possui garantia de 12 anos e o valor associado ao custo de aquisição é de R\$ 199,75 por painel fotovoltaico instalado (Neosolar Energia, 2016).

Outro dado de entrada para o cálculo do TCO Fotovoltaico (TCO_{FV}) é o custo de instalação dos equipamentos fotovoltaicos que incluem mão de obra e projeto de engenharia equivalente a 20% do valor inicial do produto, conforme (Roy *et al.*, 2012) e (Fu *et al.*, 2016). Complementarmente, a irradiação solar considerada neste estudo de caso, varia entre 2,5 a 7,5 kWh/m².dia, enquanto que a média anual de insolação diária baseou-se no intervalo de 3 a 10 horas/dia no caso do Brasil, conforme (Tiba, 2000) (Pereira *et al.*, 2006).

Neste estudo de caso, considerou-se que o custo de aquisição dos equipamentos fotovoltaicos sofrerão uma depreciação anual fixa de 5%, limitado à 60% do valor original dos produtos (Farias, 2016), de modo a simular um possível processo de barateamento do preço de compra dos equipamentos fotovoltaicos, em função de avanços tecnológicos e popularização de instalações, dado as projeções otimistas do mercado de energia fotovoltaica.

Quanto aos valores de importação e exportação da tarifa de energia elétrica em kWh para a rede de distribuição, o primeiro corresponde a R\$ 0,64 apenas com tributos (ICMS, PIS/PASEP e COFINS), sem considerar outras contribuições financeiras imposta pelo Estado e concessionárias, como encargos setoriais e transmissão e distribuição de energia, respectivamente (Nakabayashi, 2014). O segundo a R\$ 0,47 sem impostos e tributos (ANEEL, 2015) (Conselho Nacional de Política Fazendária, 2015) (Brasil, 2015), valores estes que representam a média tarifária para o ano de 2015. Adicionalmente, é importante destacar o custo de disponibilidade do sistema elétrico, sendo o consumidor pertencente ao grupo B, o valor em moeda corrente equivale a 100 kWh ao mês, caso o sistema fotovoltaico seja aplicado em uma cidade brasileira (ANEEL, 2010).

Adicionalmente é considerada uma taxa de R\$ 300,00 para instalação do medidor bidirecional (Nakabayashi, 2014), valor que deve ser repassado à concessionária de energia elétrica. Além disso, considera-se o aluguel da área ocupada pelos painéis fotovoltaicos nas coberturas das edificações, sob o preço anual de R\$ 183,96/m² (FIPE, 2016). O fator de emissão de CO₂ utilizado para estimar a quantidade de emissões de CO₂ que deixam de ser lançados na

atmosfera (kg), por quilowatt-hora que deixou de ser consumido da rede convencional de energia elétrica, está no intervalo de 0,1 à 1 kg/kWh. Países como China e Estados Unidos possuem fatores de emissão entre 0,6 e 0,9 kg/kWh (Ang e Su, 2016).

Assim, a *Tabela 4.2* sumariza todos os parâmetros utilizados neste estudo de caso para o dimensionamento fotovoltaico, considerando ainda a taxa de instalação dos equipamentos fotovoltaicos, que representa apenas o valor investido pela operadora de rede móvel na instalação de todos os equipamentos fotovoltaicos (painéis, kits, inversores, etc.), além de contemplar custos com projetos. Uma taxa de manutenção dos equipamentos também é apresentada na *Tabela 4.2*, de modo a representar o valor a ser investido na manutenção de um equipamento, com base em valor de compra.

Tabela 4.2: Parâmetros complementares do Sistema Fotovoltaico. Fonte: Elaborada pela autora.

Equipamento	Valor	Referências
Potência Nominal do Inversor (P_{Inv}^{Input})	60 kW	
Tempo de Garantia do Inversor	05 Anos	(Inverter Go, 2016)
Eficiência do Inversor (η_{Inv})	98,6%	
Custo Unitário do Inversor (C_{Inv}^{Unit})	R\$ 20.246,45	
Tempo de Garantia dos Kits de Instalação	12 Anos	(Neosolar Energia, 2016)
Preço Unitário do Kit de Instalação (C_{Kit}^{Unit})	R\$ 199,75	
Tempo de Garantia do Pannel Fotovoltaico	25 Anos	
Área do Pannel (A_P)	1,918828 m ²	
Eficiência do Pannel (η_P)	16,68%	(Canadian Solar, 2016)
Potência Nominal do Pannel	320 W	
Taxa de Perda de Desempenho do Pannel Fotovoltaico (tx_{loss})	0,5% a.a.	
Custo Unitário do Pannel (C_P^{Unit})	R\$ 635,00	
Irradiação Solar (r_s)	2,5 a 7,5 kWh/m ² .dia	(Tiba, 2000) (Pereira <i>et al.</i> , 2006)
Duração Solar Média (t_{solar})	3 a 10 horas/dias	
Consumo mínimo da rede de energia elétrica por medidor (Con_{Grid}^{Min})	100 kWh a.a.	(ANEEL, 2015)
Custo de Compra do kWh ($C_{purchase}^{kWh}$)	R\$ 0,47/kWh	
Custo de Venda do kWh (C_{sale}^{kWh})	R\$ 0,64/kWh	(Nakabayashi, 2014)
Custo do Aluguel de Telhado/m ² (C_{m2}^{rent})	R\$ 183,96 a.a./m ²	(FIPE, 2016)
Custo de Instalação do Medidor Bidirecional (C_{Med})	R\$ 300,00	(Nakabayashi, 2014)
Fator de Emissão de CO ₂ (Fac_{CO2})	0,1 a 1 kg/kWh	(Brander <i>et al.</i> , 2011) (Ang e Su, 2016) (IEA, 2015)

Taxa de Instalação de Equipamentos ($tx_{install}$)	20%	(Roy <i>et al.</i> , 2012) (Fu <i>et al.</i> , 2016)
Taxa de Depreciação do Preço de Compra dos Equipamentos Fotovoltaicos (σ)	5% a.a.	(Farias, 2016)
Período de Análise (t)	15 Anos	-
Taxa de manutenção dos equipamentos (tx_M)	1% a.a.	(Nakabayashi, 2014)

Além disso, a *Tabela 4.3* apresenta os parâmetros utilizados para estimar a demanda energética do *backhaul* móvel, conforme os modelos matemáticos de (Fiorani *et al.*, 2016), e expostos no Capítulo 2 desta dissertação. É importante destacar, que alguns dos parâmetros expostos na *Tabela 4.3*, também são utilizados no modelos matemáticos apresentados neste trabalho, como a área geográfica considerada (A) e a densidade de usuários móveis (ρ).

Tabela 4.3: Parâmetros utilizados para reprodução dos resultados de (Fiorani *et al.*, 2016) e (Tombaz *et al.*, 2014).

Parâmetro	Valor
Área (A)	100km ²
Densidade de usuários móveis (ρ)	3.000 usuários/km ²
Porcentagem de Usuários Ativos (α)	16%
Número de Prédios (N_b)	10.000
Número de Andares por Prédio (N_f)	5
Número de Apartamentos por Prédio (N_A)	15
Porcentagem de Usuários Indoor (I)	80%
Número de Antenas Indoor por RRU (A_{RRU})	8
Número de RRUs por Prédio (N_{RRU}^b)	1
Número de Portas DU por Rack DU (N_{DU}^{port})	200
Número de Comprimentos de Onda DWDM-PON (N_W^D)	380
Número de Comprimentos de Onda TWDM-PON (N_W^T)	4
Número de Femtos por Comprimento de Onda (N_{femto}^{mux})	100
Número de ONUs por Prédio (N_{ONU}^b)	1
Número de Portas da DSLAM (N_{DSLAM}^p)	24
Número de Portas do Switch Ethernet (N_S^p)	12

A Tabela 4.4 apresenta a potência de cada um dos equipamentos utilizados nas arquiteturas HetNets, bem como seu consumo diário (kWh) e o respectivo valor financeiro projetado para 01 (um) ano. Considerou-se que os equipamentos estarão ligados 24h por dia, enquanto que utilizou-se o valor de R\$ 0,64 como valor de tarifa de energia elétrica, para representar o valor financeiro associado. É importante destacar que neste estudo de caso não é considerada a variação de preço da tarifa de energia elétrica, e desta forma questões como inflação, custo de oportunidade ou variações na composição da matriz energética não são considerados. Ainda assim, caso fosse considerado o cenário brasileiro dos últimos anos, no qual a tarifa de energia aumentou significativamente nos últimos anos, o valor associado ao consumo diário seria proporcionalmente maior.

Por fim, estima-se a emissão anual de CO₂ (kg) por equipamento. Para o cálculo em questão considera-se o fator de emissão de CO₂ no valor de 0,1 kg/kWh, valor compatível com países cuja matriz energética é similar ao cenário brasileiro.

Tabela 4.4: Quadro de potência e consumo estimado de energia dos equipamentos de HetNets. Fonte: Elaborada pela autora.

Equipamento (Unidade)	Potência (W)	Consumo Diário (kWh)	Estimativa de Emissão Anual de CO ₂ (kg)	Valor Anual (R\$)
Macro cell (P_{Macro})	650	15,6	569,4	3.644,16
Antena micro-ondas (P_{MW})	30	0,72	26,28	168,19
Antena amplificadora (P_{AMP})	5	0,12	4,38	28,03
RRU (P_{RRU})	100	2,4	87,6	560,64
Transceiver (P_{Tr})	2	0,048	1,752	11,21
Porta DU (P_{DU}^{port})	25	0,6	21,9	140,16
Rack DU (P_{DU}^{rack})	150	3,6	131,4	840,96
ONU (P_{ONU})	5	0,12	4,38	28,03
OLT (P_{OLT})	1197	28,73	1.048	6.711,33
Femto cell (P_{femto})	10	0,24	8,76	56,06
Modem VDSL (P_{VDSL}^M)	10	0,24	8,76	56,06
DSLAM (P_{DSLAM})	40	0,96	35,04	224,25
Switch Ethernet (P_S)	300	7,2	262,8	1.681,92

4.3 Resultados Obtidos

A Figura 4.4 apresenta o Custo Total de Aquisição do sistema fotovoltaico (TCO_{FV}), em função da intensidade de radiação solar (r_s). Utilizou-se a densidade de usuários, no valor de 3.000 usuários/km², enquanto que a duração solar média (t_{solar}) com o valor 6,0 horas.

Neste contexto, observa-se que a partir dos parâmetros de entrada utilizados, o TCO_{FV} , expresso em milhões de Reais (R\$), tende a ser inferior ao valor financeiro associado ao custeio de energia elétrica por parte da concessionária. Esta lucratividade se configura quando os valores de irradiação solar (r_s) assumem valores a partir de 5,0 kWh/m².dia, e assim o TCO_{FV} assume valores que variam aproximadamente de 480 à 580 Milhões de Reais (R\$), enquanto que o custeio de energia elétrica varia de 484,74 à 591,72 Milhões de Reais (R\$), conforme exposto pela Tabela 4.21.

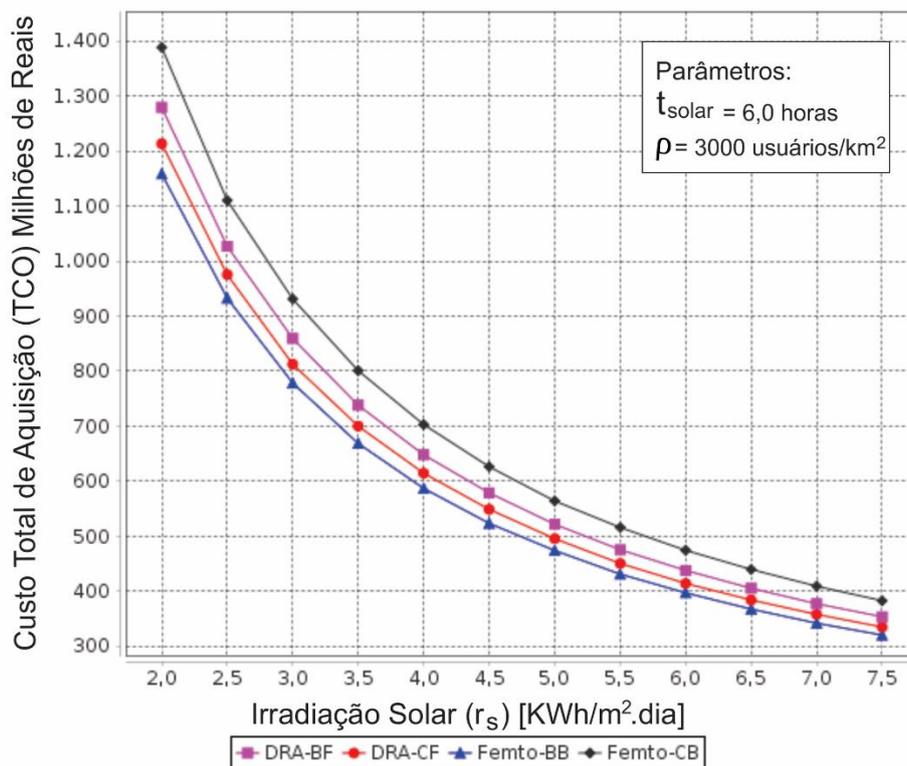


Figura 4.4: TCO Fotovoltaico em função da intensidade de radiação solar. Fonte: Elaborada pela autora.

Assim, evidenciam-se vantagens econômicas quanto à implantação de sistemas fotovoltaicos para regiões do planeta em que a radiação solar incidente é superior à 5,0 kWh/m².dia, como em

regiões de clima tropical, as quais se encontram entre os trópicos de Câncer e Capricórnio, tais como: a maioria das regiões da América Latina, África e Ásia. Desta forma, observamos a vantagem econômica e ambiental, pois além da viabilidade e economia financeira, a geração de energia por meio do sistema fotovoltaico ainda tem a característica de reduzir as emissões de gases poluentes no meio ambiente.

De modo complementar à *Figura 4.4*, apresenta-se o custo médio anual de implantação do sistema fotovoltaico por usuário, em função da intensidade de irradiação solar na *Figura 4.5*. Observa-se que conforme a intensidade de radiação solar aumenta, o custo associado à implantação do sistema fotovoltaico diminui, aumentando assim sua vantagem em relação ao custeio de energia elétrica a partir de fontes convencionais. Assim, as implantações de sistemas fotovoltaicos em regiões com grande disponibilidade de recurso solar apresentam melhores condições de implantação desta tecnologia, conforme já exposto na *Figura 4.4*.

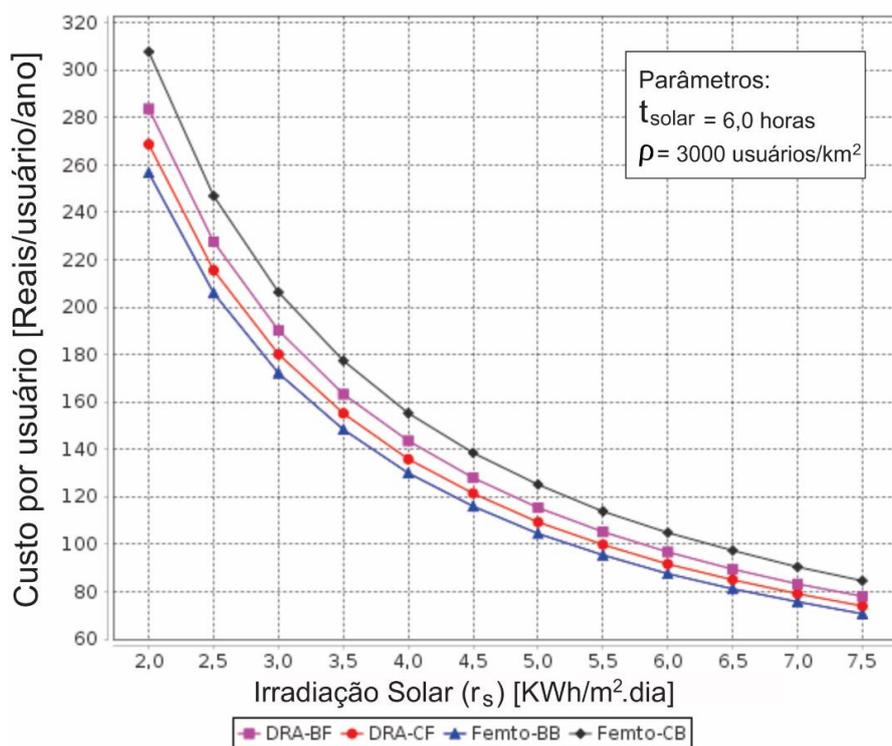


Figura 4.5: Custo do sistema fotovoltaico por usuário ao ano em função da intensidade de radiação solar. Fonte: Elaborada pela autora.

A *Figura 4.6* apresenta a economia esperada por usuário, conforme a *Eq. (28)*, que representa o custeio com energia elétrica que deixou de ser realizado em função do sistema fotovoltaico. Neste contexto, observa-se que todas as arquiteturas apresentam um valor de economia por usuário negativo quando a intensidade de radiação solar é inferior à 5,5 kWh/m².dia, ou seja, para este caso o sistema é mais caro quando comparado ao modelo tradicional. No entanto, em

termos ambientais, o sistema fotovoltaico continua sendo vantajoso, pois emite menos CO₂ do que os sistemas habituais de fornecimento de energia.

Apesar do benefício ambiental ser tratado apenas de forma qualitativa, na *Figura 4.7* é possível quantificá-lo precisamente, uma vez que nesse estudo é calculado o volume de emissão de CO₂ evitadas por usuário anualmente (kg/usuário/ano), a partir do uso de sistemas fotovoltaicos. Os principais parâmetros utilizados são a densidade de usuários, cujo valor é de 3.000 usuários/km², o volume de energia elétrica consumida pelas arquiteturas HetNet de (Fiorani *et al.*, 2016), e o fator de emissão de CO₂, que representa quanto CO₂ teria sido emitido na atmosfera por quilowatt-hora de energia consumido da rede convencional de energia elétrica.

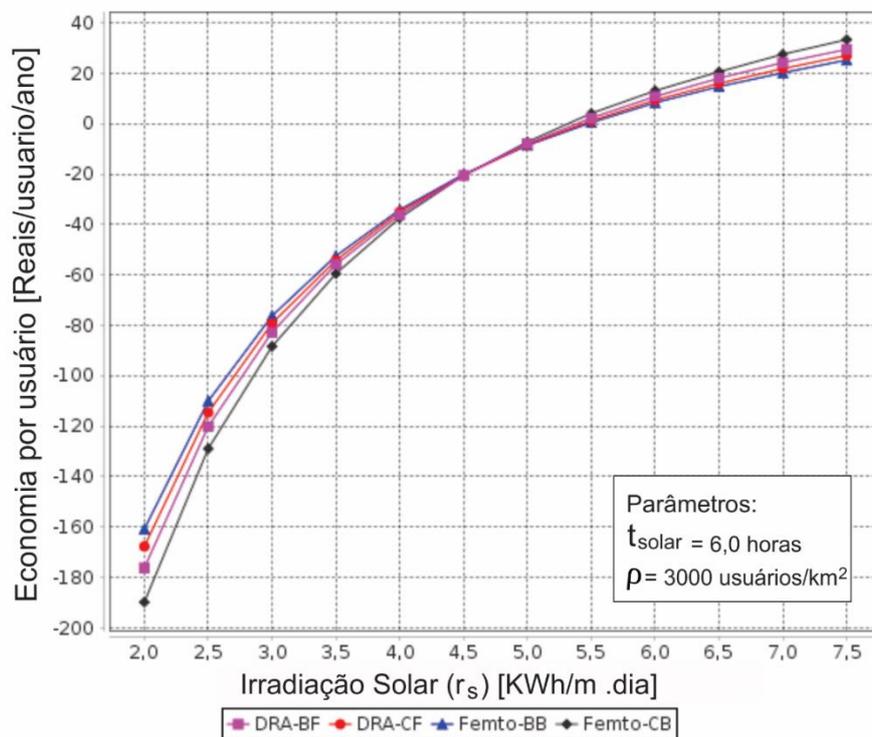


Figura 4.6: Economia gerada por usuário em função da intensidade de radiação solar. Fonte: Elaborada pela autora.

Analisando-se este gráfico, observa-se que a arquitetura Macro+Femto-CB é a que deixa de realizar mais emissões de CO₂ na atmosfera, dado que seu consumo energético é superior quando comparado ao consumo de outras arquiteturas, correspondendo a aproximadamente 70 kg/usuário/ano. Posteriormente, tem-se as arquiteturas Macro+DRA-BF, Macro+DRA-CF e, por último, a Macro+Femto-BB, sendo esta última, dotada de características de baixo impacto ambiental. Sendo assim, para promover um ambiente urbano ecologicamente equilibrado recomenda-se o uso de arquiteturas de redes móveis heterogêneas com impacto ambiental elevado, evidentemente, para no momento da substituição da fonte de geração de energia

elétrica a vantagem da utilização do SF ficar satisfatória. Ainda assim é importante destacar que os parâmetros de duração solar média e intensidade de radiação solar, não influenciam diretamente nos resultados da *Figura 4.7*, conforme Eq. (21).

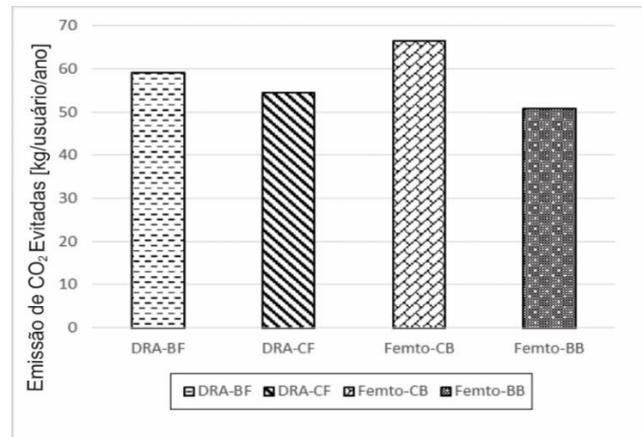


Figura 4.7: Volume de emissões de CO₂ evitadas por usuário ao ano. Fonte: Elaborada pela autora.

A *Figura 4.8* apresenta o volume de emissões de CO₂ evitadas por usuário anualmente (kg/usuário/ano) em função da densidade de usuários. Observa-se que o volume de emissões de CO₂ evitadas por usuário diminui, à medida que a densidade de usuários aumenta, logo, há uma economia por ter mais pessoas utilizando energia “limpa”.

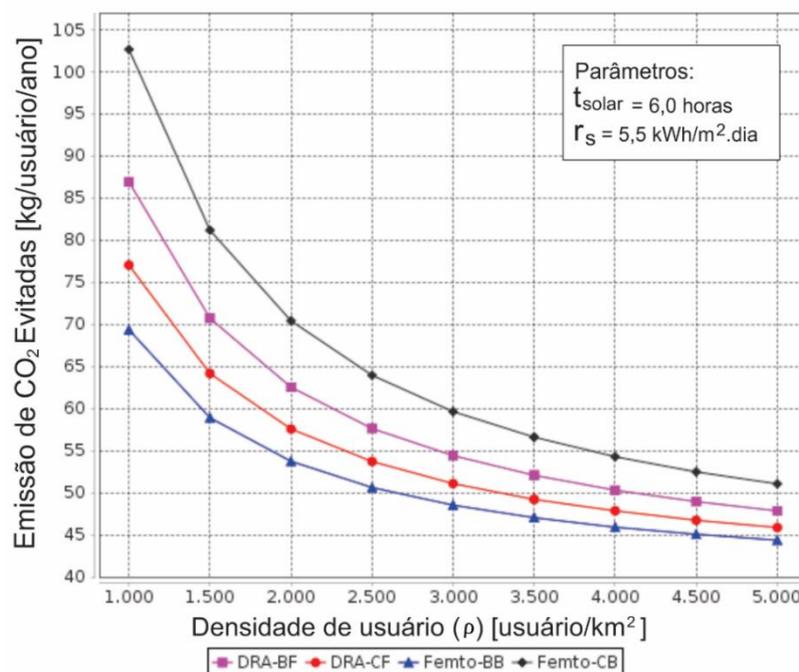


Figura 4.8: Emissões de CO₂ evitadas em função da densidade de usuários. Fonte: Elaborada pela autora.

Adicionalmente, uma análise sobre o Custo Total de Aquisição do Sistema Fotovoltaico (TCO_{FV}) em função da densidade de usuários é apresentado na *Figura 4.9*. Observa-se que um crescimento linear da densidade de usuário móveis afeta de modo similar a composição do TCO Fotovoltaico. Assim, apesar de neste contexto, o valor do custeio de energia elétrica ser afetado pelo aumento da densidade de usuários, o objetivo desta análise é demonstrar a correlação de crescimento observada com o TCO_{FV} .

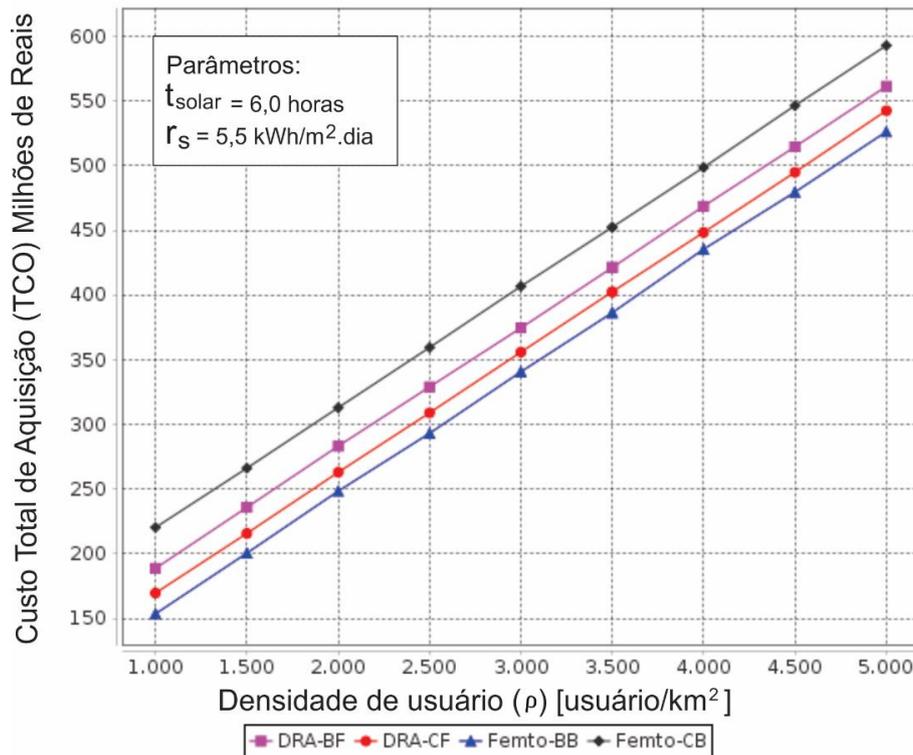


Figura 4.9: Custo Total de Aquisição do Sistema Fotovoltaico em Função da densidade de usuários. Fonte: Elaborada pela autora.

Por fim, a Figura 4.10 apresenta o valor economizado por usuário em função da densidade populacional de usuários da rede móvel heterogênea (usuários/km²), conforme representado pela Eq. (28). Observa-se um comportamento não-linear e decrescente da economia esperada por usuário, apesar do crescimento linear da densidade de usuários, o que sugere que o Custo Total de Aquisição (TCO_{FV}) varia proporcionalmente em conjunto com a densidade de usuários (conforme exposto pela *Figura 4.9*). Assim, quanto maior a população em uma determinada área, mais divisão haverá do valor total do empreendimento entre os utilizadores das redes móveis heterogêneas. Justificando como os investimentos em aquisição e instalação de equipamentos (CAPEX) tendem a diminuir, conforme a densidade de usuários se amplia.

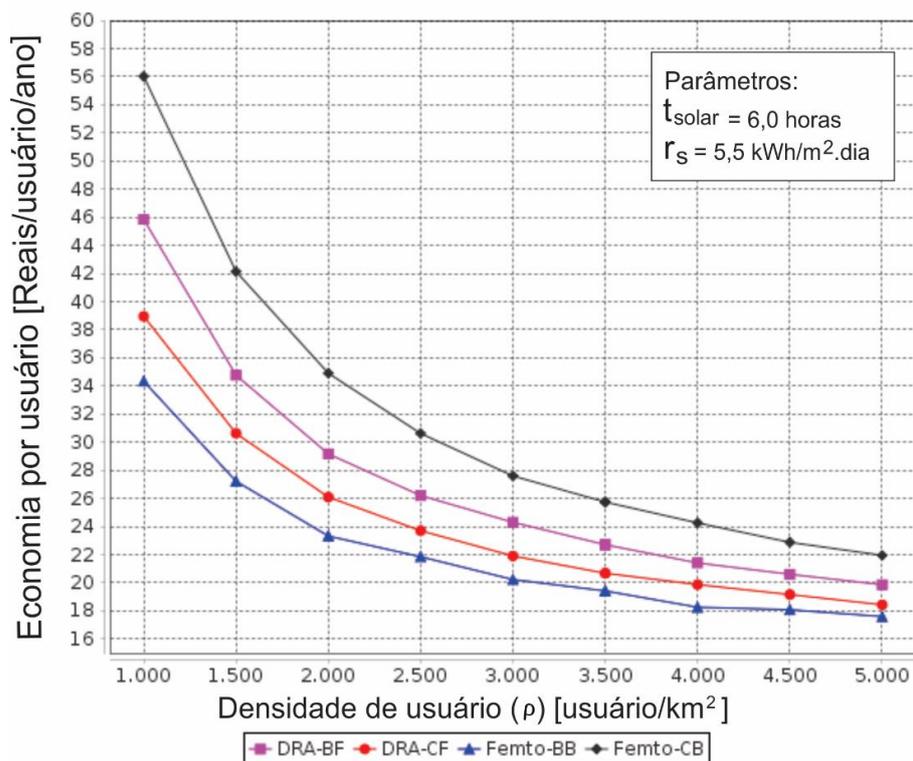


Figura 4.10: Economia por usuário em função da densidade de usuário. Fonte: Elaborada pela autora.

4.4 Análise de Sensibilidade

Nesta seção é apresentada uma análise de sensibilidade do Custo Total de Aquisição do Sistema Fotovoltaico (TCO_{FV}), que foi conduzida com o objetivo de validar os resultados obtidos. Nesta análise, foram selecionados parâmetros de custo que impactam no valor do TCO_{FV} . Estes parâmetros foram variados de -30% à +30%, para que o impacto na composição final do TCO_{FV} possa ser avaliado (Farias *et al.*, 2016). É importante destacar que nesta análise de sensibilidade não foi considerada a opção de variação tecnológica dos equipamentos fotovoltaicos, como a utilização de outras tecnologias alternativas ao Silício Policristalino, pois além da inerente variação do valor do equipamento, dados como potência nominal, eficiência e tempo de garantia e vida útil seriam alterados, tornando o processo de análise mais complexo.

Assim, o primeiro parâmetro avaliado foi o custo unitário do painel fotovoltaico, que influencia diretamente na composição do $CAPEX_{FV}$ e conseqüentemente no TCO_{FV} , uma vez que este equipamento é principal do sistema fotovoltaico, e possui o maior quantitativo de equipamentos dimensionados. Adicionalmente quanto maior o valor unitário do painel fotovoltaico, maior são

os custos com a manutenção dos mesmos, e desta forma o $OPEX_{FV}$ sofre variação, conforme o preço do painel fotovoltaico é alterado.

Assim, conforme a *Figura 4.11*, observa-se que a variação de 70 a 130% (-30% à +30%) do custo unitário do painel fotovoltaico, implica em considerável variação TCO_{FV} .

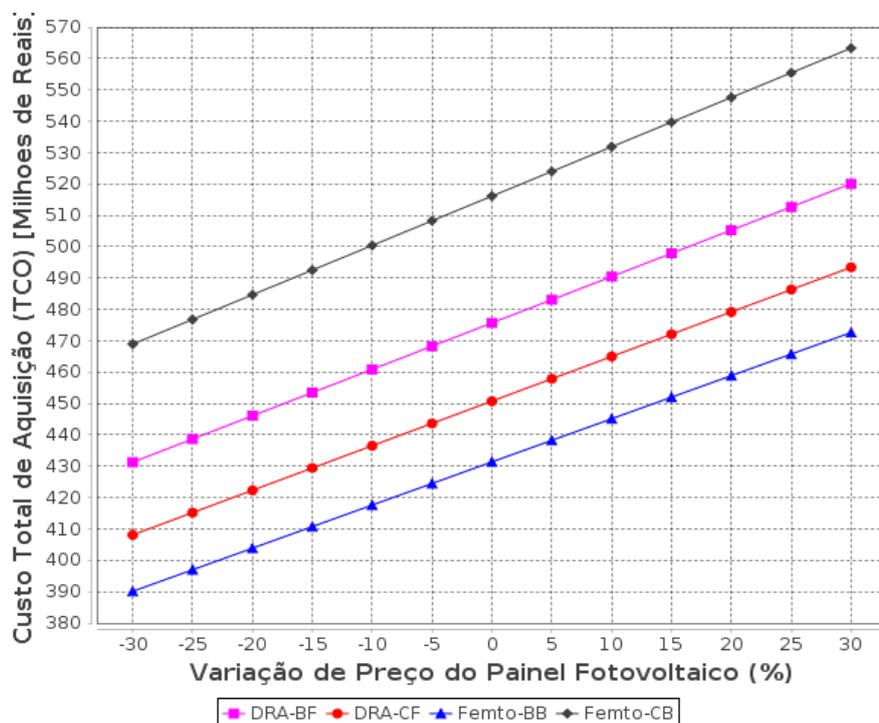


Figura 4.11: Custo Total de Aquisição em função da variação de preço do painel fotovoltaico. Fonte: Elaborada pela autora.

No caso da arquitetura Macro+Femto-CB, o TCO_{FV} sofreu variação aproximada de 20% (R\$ 100.000.000,00), o que mesmo considerando o pior caso (aproximadamente R\$ 565 Milhões de Reais), ainda seria inferior ao valor de referência de R\$ 591,72 Milhões de Reais para o custeio de energia elétrica a partir da concessionária, conforme a *Tabela 4.1*. As demais arquiteturas também apresentam a mesma proporção de variação (20%), além de também de possuírem o TCO_{FV} abaixo do valor de custeio apresentado na *Tabela 4.1*, mesmo considerando a variação de preço de 30%.

Adicionalmente, outro parâmetro considerado foi o preço do aluguel por m^2 dos telhados de prédios para instalação dos painéis fotovoltaicos, conforme Eq. (25). Esta variação foi considerada pois o preço considerado do aluguel do m^2 , mesmo considerando as áreas de coberturas de prédios, possui uma grande variação de valores, considerando-se o mercado imobiliário brasileiro como exemplo.

Assim como o parâmetro anterior, a variação de preço de -30% à +30% provocou uma variação considerável no valor do TCO_{PV} , ainda maior que no parâmetro variado na *Figura 4.11*. Conforme exposto pela *Figura 4.12*, a variação sofrida pela arquitetura Macro+Femto-CB, por exemplo, foi de aproximadamente 45% (R\$ 190.000.000,00). Porém neste caso, conforme os valores apresentados na *Tabela 4.1*, observa-se que o limite de variação do preço do aluguel do m^2 de telhados é de aproximadamente 25%, pois a partir deste valor o custeio financeiro da energia elétrica proveniente da concessionária passa a ser mais vantajoso em relação à utilização do sistema fotovoltaico, já que as despesas com aluguel sofreram variação positiva.

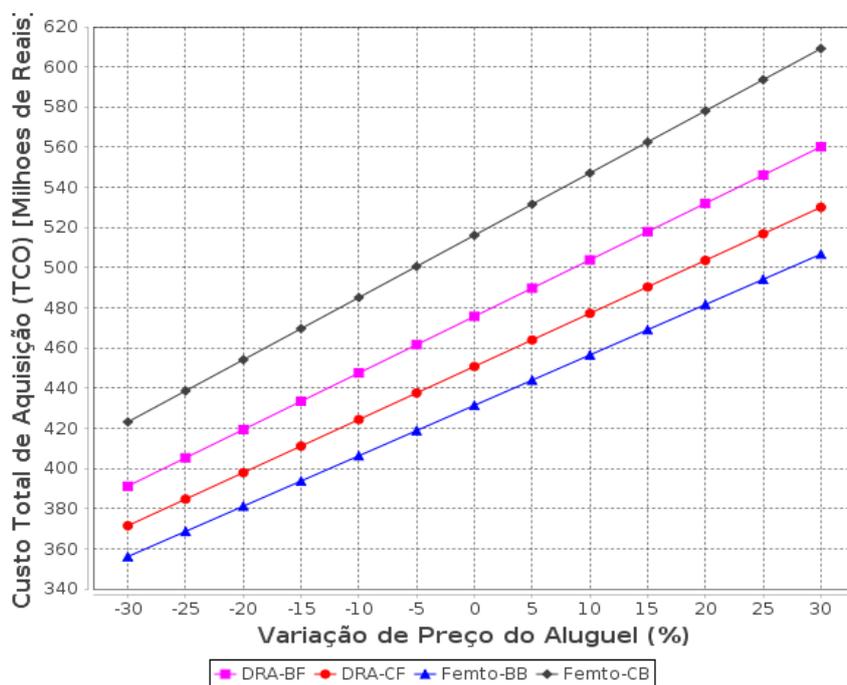


Figura 4.12: Custo Total de Aquisição em função da variação de preço do aluguel. Fonte: Elaborada pela autora.

Com relação à arquitetura Macro+DRA-BF este valor limítrofe de aumento é de aproximadamente 20%, enquanto que, 15 e 10% para as arquiteturas Macro+DRA-CF e Macro+Femto-BB, respectivamente. Remete-se essa escala de valores, ao consumo de energia de cada uma das arquiteturas, uma vez que a arquitetura Macro+Femto-CB é que possui o maior consumo energético, seguida pelas arquiteturas Macro+DRA-BF, Macro+DRA-CF e Macro+Femto-BB, nesta ordem. Assim, o aumento no preço do aluguel impacta fortemente nas arquiteturas que tendem a consumir menos energia, e de modo inverso as arquiteturas que mais consomem energia.

Adicionalmente, outro equipamento que teve seu custo analisado por meio desta análise de sensibilidade foi o inversor, conforme a *Figura 4.13*. Esta variação foi considerada pois conforme se observa no mercado de inversores, há uma grade diversidade de fabricantes, modelos,

valores de potência nominal e eficiência, ou ainda o tempo de garantia oferecido. Esta diversidade implica em grande variação nos preços dos inversores, cujo equipamento já apresenta um valor unitário bem acima dos demais equipamentos (R\$ 20.000,00). Assim, de modo similar ao parâmetro anterior, a variação de preço foi delimitada dentro do intervalo de -30% a +30%, ocasionando um comportamento crescente mais suave, do que a observada nos cenários anteriores.

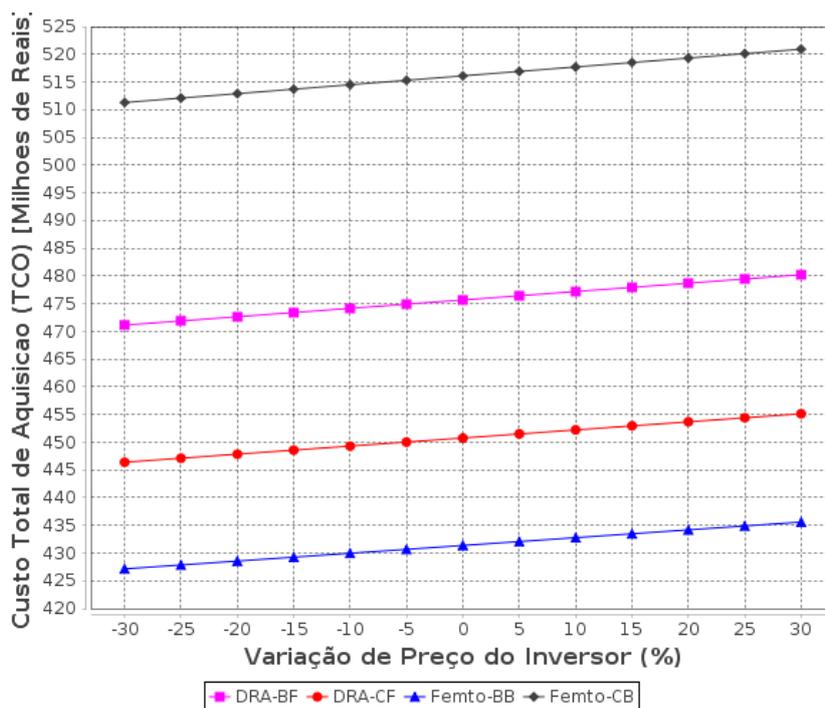


Figura 4.13: Custo Total de Aquisição em função da variação de preço do inversor. Fonte: Elaborada pela autora.

Ainda assim, a variação média observada para todas as arquiteturas foi de aproximadamente 2% (R\$ 11.000.000,00), o que não representa impeditivo de adoção do sistema fotovoltaico, uma vez que seu Custo Total de Aquisição, neste cenário, consolida-se como mais vantajoso em relação ao custeio financeiro de energia por parte da concessionária de energia elétrica.

4.5 Conclusões do Capítulo

Neste capítulo é apresentado o estudo de caso realizado, bem como discussões sobre os resultados obtidos. Observa-se que a partir do volume de consumo energético das arquiteturas HetNet, a arquitetura que apresenta maior consumo energético é a Macro+Femto-CB, enquanto

a que apresenta menor consumo é a Macro+Femto-BB. Porém este volume de energia elétrica, somada ao valor da tarifa de energia elétrica faz com que a adoção do sistema fotovoltaico seja mais vantajosa, uma vez que o TCO do sistema fotovoltaico fica em níveis equivalentes ou inferiores ao custeio de energia por parte da concessionária de energia elétrica.

Adicionalmente, evidenciam-se vantagens econômicas quanto à implantação de sistemas fotovoltaicos para regiões do planeta em que a radiação solar incidente é superior à 5,0 kWh/m².dia, como em regiões de clima tropical, onde possui-se maior disponibilidade do recurso solar ao longo do ano. Tais vantagens econômicas se mostraram expressivas quando projetadas aos usuários finais da rede heterogênea.

Outra observação obtida, foi que o aumento na densidade de usuários da rede móvel implica no comportamento do Custo Total de Aquisição do Sistema Fotovoltaico (TCO_{FV}), de modo à aumentá-lo de forma linear, porém de forma a reduzir proporcionalmente a economia financeira do usuário e as emissões de CO₂ por usuário.

Baseando-se na análise de sensibilidade realizada, os parâmetros considerados afetam diretamente o valor do Custo Total de Aquisição, porém o principal parâmetro foi o preço do aluguel do m² de telhados para instalação das placas fotovoltaicas. Adicionalmente foi concluído que a variação de preço do inversor pouco influenciou o valor do Custo Total de Aquisição, fazendo com que o mesmo ficasse abaixo dos valores de referência associados ao custeio de energia por parte da concessionária de energia elétrica.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme as tendências dos últimos anos, as redes de telecomunicações e tecnologia da informação têm sido responsáveis por parcelas cada vez mais significativas do consumo global de energia elétrica e por conseguinte emissão de CO₂ (e outros gases nocivos) na atmosfera, que se traduzem em efeitos negativos cada vez maiores ao meio ambiente. Neste sentido, as redes de telecomunicações como maiores contribuintes do consumo de energia elétrica, necessitam de alternativas que diversifiquem sua matriz energética a favor de tecnologias limpas, sustentáveis e viáveis financeiramente.

Assim, este trabalho buscou realizar uma avaliação técnico-econômica quanto à adoção de sistemas fotovoltaicos aplicados à redes móveis heterogêneas, onde o custo total de aquisição do sistema fotovoltaico, assim como a estimativa de emissões de CO₂ evitadas, subsidia a tomada de decisão quanto à utilização de tais estruturas.

Este trabalho utiliza um conjunto de arquiteturas de redes móveis heterogêneas, com variadas opções de tecnologias de rádio e transporte, para melhor avaliar opções de implantação e melhor aproximar-se de uma demanda energética real de rede móvel, utilizando inclusive uma projeção futura da demanda de dados móvel para os próximos anos, que traduz-se em um perfil crescente de consumo de energia elétrica da rede móvel, que deve ser alimentado pelas estruturas fotovoltaicas.

Assim, no corpo desta dissertação são discutidos um conjunto de modelos matemáticos que realizam o dimensionamento do sistema fotovoltaico com base no consumo energético das redes móveis heterogêneas utilizadas. Tais modelos matemáticos contemplam fases como o levantamento do recurso solar disponível, a escolha da aplicação fotovoltaica e o levantamento do volume de energia elétrica necessária ao funcionamento da rede móvel, bem como o volume de energia elétrica gerado efetivamente pelo sistema fotovoltaico e a estimativa de emissões de CO₂ evitadas.

Porém, como principal temática do Capítulo 3, há modelos matemáticos que caracterizam o custo total de aquisição do sistema fotovoltaico. Despesas com aquisição e instalação de equipamentos fotovoltaicos são considerados ($CAPEX_{FV}$), que variam de acordo com o contexto de utilização, como demanda energética necessária, intensidade de radiação solar ou horas de sol pleno disponíveis. São consideradas também despesas de manutenção e operação do sistema fotovoltaico ($OPEX_{FV}$), que incluem tempos e processos de garantia dos equipamentos envolvidos, limpeza, tarifas de energia elétrica ou mesmo aluguel de áreas físicas para posicionamento dos equipamentos fotovoltaicos.

A partir dos modelos matemáticos e estudo de caso considerados, evidenciam-se viabilidade de implantação de estruturas fotovoltaicos no contexto de redes móveis heterogêneas, especialmente: (i) Quanto maior for o consumo energético de uma dada arquitetura, maior será a margem de viabilidade, dado que o TCO fotovoltaico tende a possuir um valor inferior ao que seria pago de energia elétrica; e (ii) Quando a implantação de sistemas fotovoltaicos for realizada em regiões do planeta cuja radiação solar incidente seja superior à 5,0 kWh/m².dia, como em regiões de clima tropical, onde se possui maior disponibilidade e menor variabilidade do recurso solar ao longo do ano. Tal viabilidade de implantação se mostra expressiva quando projetadas aos usuários finais da rede heterogênea sob forma financeira ou mesmo na redução de emissões de CO₂ *per capita*.

Adicionalmente, outra análise obtida, foi que o aumento linear na densidade de usuários da rede móvel implica no aumento do custo total de aquisição do sistema fotovoltaico, de modo à aumentá-lo também de forma linear, porém de maneira a reduzir de modo inversamente proporcional a expectativa de economia financeira do usuário ou ainda as estimativas de emissões de CO₂ por usuário.

Este trabalho também realiza uma análise de sensibilidade, de modo a criar um intervalo de variação positiva e negativa dos custos de alguns equipamentos fotovoltaicos, tais como painéis, inversores e aluguel, para melhor identificar qual o limite máximo de variação que pode ser considerado, ou mesmo qual equipamento tem maior influência na composição final do custo total de aquisição do sistema fotovoltaico.

5.1 Contribuições da Dissertação

As principais contribuições desta Dissertação são descritas a seguir:

- Realização de um estudo pioneiro por meio da elaboração de modelos analíticos que estima o consumo energético de HetNets, além do dimensionamento, aquisição e implantação de sistemas fotovoltaicos aplicados ao contexto de redes móveis heterogêneas. Este modelo genérico possibilita sua reprodução facilmente para qualquer localidade, desde que sejam respeitados os requisitos mínimos para efetiva geração de energia;
- A proposta deste trabalho possui flexibilidade e completude ao abranger diversos itens de custo para o cálculo do TCO fotovoltaico, tornando a abordagem abrangente, porém com componentes realistas, podendo ser inclusive ampliada, com a modificação ou inserção de novos equipamentos em diversos cenários;

- A realização de um amplo estudo sobre tecnologias fotovoltaicas por meio do qual, questões como radiação, intensidade e disponibilidade solar foram discutidas, bem como as principais características e componentes de sistemas fotovoltaicos conectados à rede urbana;
- Realização de um estudo técnico sobre redes móveis heterogêneas, de modo a considerar suas principais características, tipos de estação base ou diferentes tipos de tecnologias de *backhaul*. Algumas opções de arquiteturas de redes móveis heterogêneas são revisadas onde seus componentes são detalhados para o processo de dimensionamento da estrutura fotovoltaica;
- Por intermédio dos resultados obtidos foi possível determinar a viabilidade de implantação de estruturas fotovoltaicas no âmbito de HetNets, considerando diversos tipos de despesas de capital e operacional, em detrimento do custeio de energia elétrica a partir da rede convencional de energia;
- A análise de sensibilidade realizada pode apresentar quais equipamentos influenciam mais diretamente na composição de custos do TCO fotovoltaico e qual o limite de variação máxima a ser suportado por alguns equipamentos;
- Divulgação de trabalho apresentado à outros pesquisadores por meio de conferência internacional e submissão à periódico, porém ainda em processo de avaliação:
 - SOUZA, M. A., FARIAS, F. S., COSTA, J. C. W. A., CARDOSO, D. L. *Technical Economic Analysis of Photovoltaic Systems in Heterogeneous Mobile Networks*. Artigo completo aceito no *7th International Conference on Sustainable Energy Information Technology (SEIT 2017)*, Madeira Portugal, a ser disponibilizado em formato digital no *Procedia Computer Science*.
 - SOUZA, M. A., FARIAS, F. S., COSTA, J. C. W. A., CARDOSO, D. L. *Using Photovoltaic Systems in HetNets: Fiction of Reality?*. Artigo completo submetido ao IEEE Latin America (**aguardando avaliação**).

5.2 Dificuldades Encontradas

O desenvolvimento deste trabalho foi desafiador, uma vez que a sua realização completa exigiu o conhecimento de diversas áreas e tarefas relacionadas à: Computação, no que tange à programação e a necessidade de reimplementar todos os modelos matemáticos de

redes móveis e do dimensionamento do sistema fotovoltaico; Engenharia Elétrica, já que se trata de um problema aplicado à diversificação de matriz energética, no qual é preciso ter um olhar mais sensível e especializado, a fim de apontar se os resultados se aproximam da realidade do sistema estudado; e Matemática, visto que todas as conclusões tomadas foram obtidas por meio de modelagens analíticas. Entre as dificuldades encontradas durante a realização deste trabalho, destacam-se:

- Estudo aprofundado sobre o trabalho de (Fiorani *et al.*, 2016), que envolveu a análise de todos os conceitos apresentados além da implementação de todos os modelos matemáticos presentes em tal trabalho;
- Houve necessidade de grande investimento de tempo para uso de ferramentas de programação como MATLAB e Java, para a correta implementação de todos os modelos matemáticos e gráficos gerados nesta dissertação;
- A realização do estado arte sobre sistemas fotovoltaicos, radiação solar e sobre o funcionamento de cada um dos componentes que frequentemente são utilizados neste contexto, para um adequado processo de caracterização do custo total de aquisição;
- Houve também dificuldade quanto ao processo de desenvolvimento dos modelos matemáticos deste trabalho, de modo a achar uma forma de modelá-los da maneira mais objetiva e simples possível, além de corresponder com a forma de funcionamento no mundo real.

5.3 Trabalhos Futuros

Como possíveis desdobramentos deste trabalho, há a necessidade de examinar diversas questões que necessitam de análises complementares sob a forma de trabalhos futuros, e que dentre as quais destacam-se:

- Implementação de modelagem que simule a variação espaço-temporal dos usuários da rede móvel e assim considerar o efeito desta variação no consumo de energia da rede móvel;
- Considerar o efeito da temperatura na taxa de desempenho dos painéis fotovoltaicos, uma vez que a influência do calor pode aumentar ou reduzir a produtividade dos painéis fotovoltaicos;

- Considerar variação de custos, inflação e correções financeiras em todos os itens que compõem o dimensionamento, tais como: aumento na tarifa de energia elétrica, depreciação contábil dos equipamentos, custo de oportunidade, etc;
- Desenvolver modelos matemáticos que realizem estimativas de emissões evitadas de outros gases potencialmente nocivos ao meio ambiente, que também estão associados ao consumo a partir da matriz de energia elétrica convencional, como o Metano (CH_4), o Dióxido de Nitrogênio (NO_2) e o Óxido Nitroso (N_2O);
- Considerar a utilização do painel sob o plano inclinado ou a adoção de um sistema que movimente o eixo do painel fotovoltaico em direção ao Sol, aumentando assim a exposição solar e otimizando a eficiência do sistema, porém com custo inicial possivelmente elevado, o que precisa ser corretamente avaliado; e

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIDIN, A. N. Z.; ABDULLAH, J.; ASROKIN, A.; CHUAH, T. C.; JENU, M. Z. M.; HASHIM, N.; AZIS, S. A. A.; NORHAN, N. **G.fast channel modelling based on copper cable characteristics** Proceedings - 5th IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering, ICCSCE 2015. **Anais...**2016

ABNT. **Norma NBR 5410 - Instalações Elétricas de Baixa Tensão**, 2005.

ADAM, R. S. **Princípios Do Ecoedifício: Interação Entre Ecologia, Consciência e Edifício**. [s.l.] Editora Ground, 2001.

AGYAPONG, P. K.; IWAMURA, M.; STAEHLE, D.; KIESS, W.; BENJEBBOUR, A. Design considerations for a 5G network architecture. **IEEE Communications Magazine**, v. 52, n. 11, p. 65–75, 2014.

AMERICAN CHEMICAL SOCIETY. **Química para um Futuro Sustentável**. [s.l.] McGraw Hill Brasil, 2016.

ANEEL. **Resolução Normativa n. 414/2010**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/ren-414>>. Acesso em: 23 set. 2016.

_____. **Resolução Normativa n. 482/2012**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 2 mar. 2017a.

_____. **ANEEL regulamenta medidores eletrônicos**. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output_Noticias.cfm?Identidade=5903&id_area=90>. Acesso em: 2 mar. 2017b.

_____. **Ranking Nacional de Tarifas Energéticas**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/informacoes-tecnicas/-/asset_publisher/CegkWaVJWF5E/content/id/14484019>. Acesso em: 23 fev. 2017.

ANG, B. W.; SU, B. Carbon emission intensity in electricity production: A global analysis. **Energy Policy**, v. 94, p. 56–63, 2016.

ANSON, M. J. P.; FABOZZI, F. J.; JONES, F. J. **The Handbook of Traditional and Alternative Investment Vehicles: Investment Characteristics and Strategies**. [s.l.] Wiley, 2010.

AUER, G.; BLUME, O. EARTH Project D2.3 - Energy efficiency analysis of the reference systems, areas of improvements and target breakdown. **Energy Aware Radio and Network Technologies (EARTH), INFISO-ICT-247733, ver. 2.0. [Online]. Available: <http://www.ict-earth.eu/>**, 2012.

BARTOLI, G.; FANTACCI, R.; LETAIEF, K. B.; MARABISSI, D.; PRIVITERA, N.; PUCCI, M.; ZHANG, J. Beamforming for small cell deployment in LTE-advanced and beyond. **IEEE Wireless Communications**, v. 21, n. 2, p. 50–56, 2014.

BC. **Relatório de Inflação – Junho 2015**. 2. ed. Brasília: [s.n.].

BHUSHAN, N.; LI, J.; MALLADI, D.; GILMORE, R.; BRENNER, D.; DAMNJANOVIC, A.; SUKHAVASI, R. T.; PATEL, C.; GEIRHOFER, S. Network densification: The dominant theme for wireless evolution into 5G. **IEEE Communications Magazine**, v. 52, n. 2, p. 82–89, 2014.

BOUABDALLAH, N.; PERROS, H.; PUJOLLE, G. **A cost-effective traffic aggregation scheme in all-optical networks** GLOBECOM - IEEE Global Telecommunications Conference. **Anais...**2005

BRANDER, A. M.; SOOD, A.; WYLIE, C.; HAUGHTON, A.; LOVELL, J.; REVIEWERS, I.; DAVIS, G. **Electricity-specific emission factors for grid electricity** *Ecometrica*. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://ecometrica.com/assets/Electricity-specific-emission-factors-for-grid-electricity.pdf>>.

BRASIL. **LEI Nº 13.169, DE 6 DE OUTUBRO DE 2015**. Disponível em:

<http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2015-2018/2015/Lei/L13169.htm>. Acesso em: 10 set. 2016.

CANADIAN SOLAR. **Quardeck MaxPower CS6X-320P 320W Data Sheet**. Disponível em: <<http://www.canadasolar.com/>>. Acesso em: 15 ago. 2016.

CHIA, S.; GASPARRONI, M.; BRICK, P. The next challenge for cellular networks: backhaul. **IEEE Microwave Magazine**, v. 10, n. 5, p. 54–66, 2009.

CISCO. **Cisco Visual Networking Index Global Mobile Data Traffic Forecast Update 2016 2021 White Paper**. Disponível em: <<http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.pdf>>. Acesso em: 20 mar. 2017.

COLDREY, M.; BERG, J. E.; MANHOLM, L.; LARSSON, C.; HANSRYD, J. Non-line-of-sight small cell backhauling using microwave technology. **IEEE Communications Magazine**, v. 51, n. 9, p. 78–84, 2013.

CONSELHO NACIONAL DE POLÍTICA FAZENDÁRIA. **AJUSTE SINIEF 2, DE 22 DE ABRIL DE 2015**. Disponível em: <<https://www.confaz.fazenda.gov.br/legislacao/ajustes/2015/ajuste-sinief-2-15>>. Acesso em: 20 set. 2016.

COOMANS, W.; MORAES, R. B.; HOOGHE, K.; DUQUE, A.; GALARO, J.; TIMMERS, M.; WIJNGAARDEN, A. J. VAN; GUENACH, M.; MAES, J. **XG-fast: The 5th generation broadband** IEEE Communications Magazine. **Anais...**2015

COTA, P.; PAVIČIĆ, T. **New technologies for improvement of characteristics in DSL access networks**2011 Proceedings of the 34th International Convention MIPRO. **Anais...**2011

CRESESB. **Potencial Solar - SunData**. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>>. Acesso em: 12 mar. 2017.

DHILLON, H. S.; YING LI; NUGGEHALLI, P.; ZHOUYUE PI; ANDREWS, J. G. Fundamentals of Heterogeneous Cellular Networks with Energy Harvesting. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, v. 13, n. 5, p. 2782–2797, 2014.

DIEESE. **Comportamento das tarifas de energia elétrica no Brasil. Nota Técnica n.147**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://www.dieese.org.br/notatecnica/2015/notaTec147eletricidade.pdf>>. Acesso em: 21 mar. 2017.

DUFKOVA, K.; BJELICA, M.; MOON, B.; KENCL, L.; BOUDEC, J.-Y. LE. **Energy savings for cellular network with evaluation of impact on data traffic performance**2010 European Wireless Conference (EW). **Anais...**2010Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5483431>>

FARIAS, F.; FIORANI, M.; TOMBAZ, S.; MAHLOO, M.; WOSINSKA, L.; COSTA, J. C. W. A.; MONTI, P. Cost- and energy-efficient backhaul options for heterogeneous mobile network deployments. **Photonic Network Communications**, v. 32, n. 3, p. 422–437, 2016.

FARIAS, F. S. **Designing cost-efficient transport solutions for fixed and mobile broadband access network**. [s.l.] Universidade Federal do Pará, 2016.

FARIAS, F. S.; MONTI, P.; VASTBERG, A.; NILSON, M.; COSTA, J. C. W. A.; WOSINSKA, L. **Green backhauling for heterogeneous mobile access networks: What are the challenges?**2013 9th International Conference on Information, Communications Signal Processing. **Anais...**2013

FELIX, H. S.; OLIVEIRA DUARTE, A. M. DE. **FTTH - GPON access networks: Dimensioning and optimization**2013 21st Telecommunications Forum Telfor, TELFOR 2013 - Proceedings of Papers. **Anais...**2013

FGV ENERGIA. **Recursos Energéticos Distribuídos**. [s.l.] FGV Energia, 2016.

FIORANI, M.; TOMBAZ, S.; FARIAS, F. S.; WOSINSKA, L.; MONTI, P. Joint Design of Radio and

Transport for Green Residential Access Networks. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 34, n. 4, p. 812–822, 2016.

FIPE. **Índices Comentados: Índice Fipezap – Índice de Preços de Imóveis Anunciados – Localização Residencial**. Disponível em: <<http://www.fipe.org.br>>. Acesso em: 14 mar. 2017.

FLOOR, K.; KNMI.; BILT), K. N. M. I. (DE. **Weerkunde: meteorologie voor iedereen**. [s.l.] Elmar, 2004.

FRAUNHOFER ISE. **Photovoltaics Report**. Disponível em: <<https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>>. Acesso em: 2 mar. 2017.

FRIANÇA, A. C. S.; DAL PINO, E.; SODRÉ JR, L.; JATTENCO-PEREIRA, V. **Astronomia Uma Visão Geral do Universo**. 2 Ed. 3 Re ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2008.

FU, R.; CHUNG, D.; LOWDER, T.; FELDMAN, D.; ARDANI, K.; FU, R.; CHUNG, D.; LOWDER, T.; FELDMAN, D.; ARDANI, K. U.S. Solar Photovoltaic System Cost Benchmark: Q1 2016. **NREL/TP-6A20-66532**, 2016.

GE, X.; CHENG, H.; GUIZANI, M.; HAN, T. 5G wireless backhaul networks: Challenges and research advances. **IEEE Network**, v. 28, n. 6, p. 6–11, 2014.

GENESIS. **DSL Rings**. Disponível em: <<http://www.genesistechsys.com/products/dsl-rings>>. Acesso em: 9 abr. 2017.

GREEN, M. A.; EMERY, K.; HISHIKAWA, Y.; WARTA, W.; DUNLOP, E. D. Solar cell efficiency tables (version 39). **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 20, n. 1, p. 12–20, 2012.

GREEN, M. A.; EMERY, K.; HISHIKAWA, Y.; WARTA, W.; DUNLOP, E. D.; LEVI, D. H.; HO-BAILLIE, A. W. Y. Solar cell efficiency tables (version 49). **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 25, n. 1, p. 3–13, 2017.

GREENPEACE; GWEC; SOLARPOWER EUROPE. **Energy Revolution: A Sustainable World Energy Outlook 2015** Wind Energy. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://www.greenpeace.org/international/en/publications/Campaign-reports/Climate-Reports/Energy-Revolution-2012/>>.

GRAF. **Física 2: Física Térmica e Óptica Vol. 2**. São Paulo: EDUSP, 1993.

HAN, T.; ANSARI, N. Provisioning Green Energy for Base Stations in Heterogeneous Networks. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 65, n. 7, p. 5439–5448, 2016.

HERON, R.; PESOVIC, A. **TWDM-PON: Taking Fiber to New Wavelengths | Insight | Nokia**. Disponível em: <<https://insight.nokia.com/twdm-pon-taking-fiber-new-wavelengths>>. Acesso em: 18 mar. 2017.

HUAWEI. **Configuration Guide - Interface Management - Suporte a serviços corporativos**. Disponível em: <<http://support.huawei.com/enterprise/docinforeader.action?contentId=DOC1000019445&partNo=10022>>. Acesso em: 13 mar. 2017.

IEA. Technology Roadmap: Solar Photovoltaic Energy. **Technology Roadmap**, p. 60, 2014a.

_____. Technology Roadmap Solar Thermal Electricity. **International Energy Agency (IEA)**, p. 52, 2014b.

_____. CO2 EMISSIONS FROM FUEL COMBUSTION Highlights. **IEA**, v. S/V, n. IEA-STATISTICS, p. 1–139, 2015.

_____. **TRENDS 2016 IN PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS**. [s.l.: s.n.].

_____. Key World Energy Statistics 2016. **Statistics**, p. 80, 2016b.

IET. **Solar radiation and photovoltaic electricity potential country and regional maps for Europe (Africa)**. Disponível em: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/cmmaps/eur_old.htm>. Acesso em: 17 abr. 2017.

INEE. **O que é geração distribuída**. Disponível em: <http://www.inee.org.br/forum_ger_distrib.asp>. Acesso em: 2 mar. 2017.

INVERTER GO. **60KW Grid Tie Inverter three phase Data Sheet**. Disponível em: <<http://www.invertergo.com/>>. Acesso em: 16 ago. 2016.

IPPC. **Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation Final Release**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<papers2://publication/uuid/0BC81413-86DC-4B94-AB18-BF9F04591EEE>>.

JANNUZZI, G. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica no Brasil: Panorama da Atual Legislação**, 2009. (Nota técnica).

JUCÁ, S. C. S.; CARVALHO, P. C. M. **Métodos de dimensionamento de sistema fotovoltaicos: aplicações em dessalinização**. 1. ed. Duque de Caxias: Espaço Científico Livre, 2013.

KARTTUNEN, H.; KRÖGER, P.; OJA, H.; POUTANEN, M.; DONNER, K. J.; FLENBERG, R. T. **Fundamental Astronomy**. [s.l.: s.n.]. v. 27

KELIF, J.-M.; COUPECHOUX, M.; GODLEWSKI, P. A Fluid Model for Performance Analysis in Cellular Networks. **EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking**, v. 2010, n. 1, p. 435189, 2010.

KLIKS, A.; PÉREZ-ROMERO, J.; BOUKHATEM, L.; ZALONIS, A. Technical advances in the design and deployment of future heterogeneous networks. **EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking**, v. 2015, n. 1, p. 153, 2015.

KRAMER, G.; PESAVENTO, G. Ethernet passive optical network (EPON): Building a next-generation optical access network. **IEEE Communications Magazine**, v. 40, n. 2, p. 66–73, 2002.

LEIVA, A.; MACHUCA, C.; BEGHELLI, A.; OLIVARES, R. Migration cost analysis for upgrading WDM networks. **IEEE Communications Magazine**, v. 51, n. 11, p. 87–93, 2013.

LIU, C.; NATARAJAN, B.; XIA, H. Small Cell Base Station Sleep Strategies for Energy Efficiency. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 65, n. 3, p. 1652–1661, 2016.

LOSCHI, H. J. **Compreendendo um Sistema Fotovoltaico**. 1. ed. Baraúna: Editora São Paulo, 2015.

LUO, Y.; ZHOU, X.; EFFENBERGER, F.; YAN, X.; PENG, G.; QIAN, Y.; MA, Y. Time- and wavelength-division multiplexed passive optical network (TWDM-PON) for next-generation PON stage 2 (NG-PON2). **Journal of Lightwave Technology**, v. 31, n. 4, p. 587–593, 2013.

MANRIQUE, A. K. R. **Diretrizes para a sustentabilidade de uma minirrede de sistemas solares fotovoltaicos em uma região isolada da Colômbia**. [s.l.] Universidade Federal do Paraná, 2015.

MARTINO JANNUZZI, G. DE. **Políticas públicas para eficiência energética e energia renovável no novo contexto de mercado: uma análise da experiência recente dos EUA e do Brasil**. [s.l.] Editora Autores Associados, 2000.

MELOROSE, J.; PERROY, R.; CAREAS, S.; LEWANDOWSKI, C. M. 5G: 4G Americas' Recommendations on 5G Requirements and Solutions. **The effects of brief mindfulness intervention on acute pain experience: An examination of individual difference**, v. 1, n. i, 2015.

MONTI, P.; TOMBAZ, S.; WOSINSKA, L.; ZANDER, J. **Mobile backhaul in heterogeneous network deployments: Technology options and power consumption** International

Conference on Transparent Optical Networks. **Anais...2012**

MTVSOLAR. **9.12kW Hybrid Grid-Tied Battery System in Clarke County, Virginia**. Disponível em: <<http://www.mtv-solar.com/9-12kw-hybrid-grid-tied-battery-system-in-clarke-county-virginia/>>. Acesso em: 9 abr. 2017.

NAKABAYASHI, R. **Microgeração Fotovoltaica No Brasil : Condições Atuais e Perspectivas Futuras**. http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/106/106131/tde-26012015-141237/publico/Dissertacao_Renno_vfinal.pdf: Universidade de São Paulo, jan. 2014.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Quadrature Amplitude Modulation (QAM)**. Disponível em: <<http://www.ni.com/white-paper/3896/en/>>. Acesso em: 9 abr. 2017.

NEOSOLAR ENERGIA. **Kit de Montagem Fotovoltaico Thesan para telhado**. Disponível em: <<http://www.neosolar.com.br/>>. Acesso em: 20 ago. 2016.

NOKIA. **Flatten Network Energy Consumption Technology Vision 2020 White Paper**. Disponível em: <<http://resources.alcatel-lucent.com/asset/200273>>. Acesso em: 20 mar. 2017.

ONS. **Histórico da Operação - Energia Armazenada**. Disponível em: <http://www.ons.org.br/historico/energia_armazenada.aspx>. Acesso em: 22 mar. 2017.

PANWAR, N.; SHARMA, S.; SINGH, A. K. A survey on 5G: The next generation of mobile communication. **Physical Communication**, v. 18, p. 64–84, 2016.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L. DE; RÜTHER, R. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 1. ed. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2006.

PERROS, H. G. **Connection-Oriented Networks: SONET/SDH, ATM, MPLS and Optical Networks**. [s.l: s.n.].

PERUZZO, J. **Fronteiras Da Física vol.2**. 1. ed. Irani: Clube dos Autores, 2012.

PILLAI, U. Drivers of cost reduction in solar photovoltaics. **Energy Economics**, v. 50, p. 286–293, 2015.

PINHO, J. T.; BARBOSA, C. F. O.; PEREIRA, E. J. DA S.; SOUZA, H. M. S.; BLASQUES, L. C. M.; GALHARDO, M. A. B.; MACÊDO, W. N. **Sistemas Híbridos Soluções Energéticas para Amazônia**. 22. ed. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. 2. ed. Rio de Janeiro: CEPREL – CRESESB, 2014.

PIRINEN, P. A Brief Overview of 5G Research Activities. **Proceedings of the 1st International Conference on 5G for Ubiquitous Connectivity**, p. 17–22, 2014.

RAVIPRASAD, V.; SINGH, R. K. **Optimal sizing of PV array for critical load with parallel redundant architecture using GA** 2014 First International Conference on Automation, Control, Energy and Systems (ACES). **Anais...2014**

REIS, L. B. DOS. **Geração de energia elétrica**. 2. ed. Barueri: Editora Manole, 2015.

REIS, L. B. DOS; SANTOS, E. C. **Energia elétrica e sustentabilidade: Aspectos tecnológicos, socioambientais e legais**. 1. ed. Tamboré: Editora Manole, 2015.

ROSA, A. **Processos de Energia Renováveis**. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier Brasil, 2016.

ROY, P.; ARAFAT, Y.; UPAMA, M. B.; HOQUE, A. **Technical and financial aspects of solar PV system for city dwellers of Bangladesh where green energy installation is mandatory to get utility power supply** 2012 7th International Conference on Electrical and Computer Engineering. **Anais...2012**

RÜTHER, R. **Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil**. [s.l: s.n.].

SAMS, A. D. **Various approaches to powering Telecom sites** 2011 IEEE 33rd International

Telecommunications Energy Conference (INTELEC). **Anais...2011**

SCHÖNDIENST, T.; VOKKARANE, V. M. Renewable energy-aware grooming in optical networks. **Photonic Network Communications**, v. 28, n. 1, p. 71–81, 2014.

SEYBOTH, K. *et al.* **Renewables 2016 Global Status Report**. [s.l.: s.n.].

SILVA, A. V. R. **Nossa Estrela O Sol**. [s.l.] LIVRARIA DA FISICA, 2006.

SMALL CELL FORUM. Report title: Small cells – what’s the big idea? 2012.

SODA. **SODA - Solar Radiation Data**. Disponível em: <<http://www.soda-pro.com/>>. Acesso em: 2 mar. 2017.

SOH, Y. S.; QUEK, T. Q. S.; KOUNTOURIS, M.; SHIN, H. Energy efficient heterogeneous cellular networks. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 31, n. 5, p. 840–850, 2013.

STINE, W. B.; GEYER, M. Power from the sun. **oemagazine The Monthly Publication of SPIE**, v. 3, n. 4, p. 24, 2001.

STOCKERGY. **Downtown Boston Rooftop Solar**. Disponível em: <<http://stockergy.com/free-stock-images/downtown-boston-rooftop-solar/>>. Acesso em: 9 abr. 2017.

TANG, J.; SO, D. K. C.; ALSUSA, E.; HAMDI, K. A.; SHOJAEIFARD, A. Resource Allocation for Energy Efficiency Optimization in Heterogeneous Networks. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 33, n. 10, p. 2104–2117, 2015.

TELESÍNTESE. **Investimentos em redes de DSL e cabo continuam crescendo na América Latina**. Disponível em: <<http://www.telesintese.com.br/investimentos-em-redes-de-dsl-e-cabo-continua-crescendo-na-america-latina/>>. Acesso em: 9 abr. 2017.

TERNON, E.; AGYAPONG, P.; HU, L.; DEKORSY, A. **Energy savings in heterogeneous networks with clustered small cell deployments**2014 11th International Symposium on Wireless Communications Systems, ISWCS 2014 - Proceedings. **Anais...2014**

TIBA, C. Atlas Solarimétrico do Brasil: Banco de Dados Terrestres. **Atlas Solarimétrico do Brasil**, v. 1, p. 111, 2000.

TIMMERS, M. (ALCATEL-L. B. L.; GUENACH, M. (ALCATEL-L. B. L.; NUZMAN, C. (ALCATEL-L. B. L.; MAES, J. (ALCATEL-L. B. L. G. fast: Evolving the Copper Access Network. **IEEE Communications Magazine**, v. 51, n. August, p. 74–79, 2013.

TIPMONGKOLSILP, O.; ZAGHLOUL, S.; JUKAN, A. The evolution of cellular backhaul technologies: Current issues and future trends. **IEEE Communications Surveys and Tutorials**, v. 13, n. 1, p. 97–113, 2011.

TOLMASQUIM, M. T. **Energia Renovável Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceanica**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2016.

TOMBAZ, S.; MONTI, P.; FARIAS, F.; FIORANI, M.; WOSINSKA, L.; ZANDER, J. **Is backhaul becoming a bottleneck for green wireless access networks?**2014 IEEE International Conference on Communications, ICC 2014. **Anais...2014**

TOMBAZ, S.; MONTI, P.; WANG, K.; VÄSTBERG, A.; FORZATI, M.; ZANDER, J. **Impact of backhauling power consumption on the deployment of heterogeneous mobile networks**GLOBECOM - IEEE Global Telecommunications Conference. **Anais...2011**

URBANETZ JUNIOR, J. **Sistemas Fotovoltaicos conectados a redes de distribuição urbanas: sua influência na qualidade da energia elétrica e análise dos parâmetros que possam afetar a conectividade**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

UTMS. UMTS Forum Report 44 Mobile traffic forecasts. p. 23, 2011.

VENABLES, M. Bring me sunshine. **Engineering Technology**, v. 3, n. 14, p. 56–58, 2008.

WANG, Z. **Research on the application of GPON technologies**Proceedings - 2011

International Conference on Multimedia and Signal Processing, CMSP 2011. **Anais...**2011

WIKIWAND. **Building-integrated photovoltaics**. Disponível em: <http://www.wikiwand.com/en/Building-integrated_photovoltaics>. Acesso em: 4 set. 2017.

YANG, C. B.; LI, J. ; ANPALAGAN, A. . Energy Efficiency Architecture Design for Heterogeneous Cellular Networks. **Wireless Communications and Mobile Computing**, v. 16, n. 12, p. 1588–1602, 2016.

YAU, Y. H.; LIM, K. S. Energy analysis of green office buildings in the tropics—Photovoltaic system. **Energy and Buildings**, v. 126, p. 177–193, 2016.

ZEFREH, M. S.; TODD, T. D.; KARAKOSTAS, G. Energy provisioning and operating costs in hybrid solar-powered infrastructure. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, v. 5, n. 3, p. 986–994, 2014.

ZHANG, T.; XU, H.; LIU, D.; BEAULIEU, N. C.; ZHU, Y. User association for energy-load tradeoffs in hetnets with renewable energy supply. **IEEE Communications Letters**, v. 19, n. 12, p. 2214–2217, 2015.

ZILLES, R.; MACEDO, W.; GALHARDO, M.; OLIVEIRA, S. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.