



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

CARMELA SOUZA OLIVEIRA

SISTEMAS FOTOVOLTAICOS APLICADOS EM CENÁRIO DE REDE 5G

DM: 05/2020

UFPA/ITEC/PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2020

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

CARMELA SOUZA OLIVEIRA

**SISTEMAS FOTOVOLTAICOS APLICADOS EM CENÁRIO DE REDE
5G**

UFPA/ITEC/PPGEE
Belém-Pará-Brasil

2020

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

CARMELA SOUZA OLIVEIRA

**SISTEMAS FOTOVOLTAICOS APLICADOS EM CENÁRIO DE REDE
5G**

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 Telecomunicações.

UFPA/ITEC/PPGEE
Belém-Pará-Brasil
2020

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

“SISTEMAS FOTOVOLTAICOS APLICADOS EM CENÁRIO DE REDE 5G”

AUTORA: CARMELA SOUZA OLIVEIRA

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 TELECOMUNICAÇÕES.

APROVADA EM 31/01/2020

BANCA EXAMINADORA:

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

Prof. Dr. Diego Lisboa Cardoso
(Avaliador Interno - PPGEE/UFPA)

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

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe, Domingas Souza e ao meu pai, Sukarno H. de Oliveira, por todo carinho e amor, além de toda paciência durante toda a minha vida até este momento. Agradeço por serem as melhores pessoas do mundo e por serem os melhores pais que alguém pode ter. Agradeço, também, ao meu irmão Robson Oliveira, por sempre estar presente em minha vida e por ajudar sempre que pode.

Agradeço ao meu orientador, professor João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa e à Marcela Alves de Souza, pelo empenho e dedicação empregados para o desenvolvimento deste trabalho e pela paciência, atenção e compreensão comigo.

Agradeço ao meu grupo de amigos, por todos os momentos juntos, todas as risadas, todo carinho e por serem pessoas maravilhosas. Queria agradecer imensamente, pois, sem eles, nada seria possível.

E por fim, agradeço a todos aqueles que de alguma forma me apoiaram e me incentivaram para concluir meus objetivos.

*“Ao verme que primeiro roeu as frias carnes do meu
cadáver dedico como saudosa lembrança estas
memórias póstumas”*

(Machado de Assis – Memórias Póstumas de Brás Cubas)

RESUMO

Com a implantação da próxima geração de redes móveis, é estimado um significativo aumento no consumo de dados e, analogamente, um substancial impacto no consumo energético. Com este cenário, é interessante pensar em fontes alternativas que possam suprir essa demanda energética e adicionalmente mitigar maiores impactos ambientais. Com base nesta perspectiva econômica e ambiental, este trabalho propõe a utilização de um sistema fotovoltaico como estratégia para a potencialização do consumo de energia de forma menos agressiva ao meio ambiente. Os experimentos realizados avaliam a viabilidade da proposta a partir da implantação em duas arquiteturas *RAN* (*Radio Access Network*) que podem ser empregadas à nova geração (5G). Os resultados demonstram a viabilidade financeira na implantação de um sistema fotovoltaico, quando comparada a fontes convencionais de geração de energia.

Palavras-chave: 5G; *RAN*; *Redes Móveis*; *Sistema Fotovoltaico*.

ABSTRACT

With the deployment of the next generation of mobile networks, a significant increase in data consumption is estimated and, consequently, a substantial impact on energy consumption. In light of this scenario, it is interesting to think of alternative sources that can meet this energy demand and additionally act to mitigate greater environmental impacts. Based on this economic and, above all, environmental perspective, this work proposes the use of a photovoltaic system as a strategy for the potentialization of energy consumption in a less aggressive way to the environment. The experiments carried out evaluate the viability of the proposal from the implementation in two RAN (Radio Access Network) architectures that can be employed to the new generation (5G). The results demonstrate the financial viability in the installation of photovoltaic system when compared to conventional sources of power generation.

Keywords: 5G, RAN, Mobile Networks, Photovoltaic System.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Projeção do tráfego de dados no período de 2017 - 2022.....	15
Figura 1.2 - Crescimento global de dispositivos e conexões.	16
Figura 1.3 – Principais países em instalações fotovoltaicas e sua capacidade total instalada em 2017.	19
Figura 2.1– Arquitetura RAN distribuída.....	27
Figura 2.2 – Arquitetura RAN totalmente centralizada.	28
Figura 2.3 – Arquitetura em anel DWDM.	30
Figura 2.4 – Mapa de irradiação solar média anual do Brasil e da Europa.....	33
Figura 2.5 – Dias com diferentes valores de HSP em conformidade com os perfis de radiação solar diária.....	34
Figura 2.6 – Insolação diária média anual.....	35
Figura 2.7 – Camadas de um módulo fotovoltaico.	38
Figura 3.1 – Calculo do número de manutenções realizadas nos equipamentos do SF.	50
Figura 4.1 – Projeção de consumo energético das arquiteturas.....	56
Figura 4.2 – TCO fotovoltaico em função da irradiação solar.....	57
Figura 4.3 - TCO fotovoltaico em função da densidade de usuário.....	58
Figura 4.4 –Custo das concessionárias de energia em função da densidade de usuário.	59
Figura 4.5 – TCO em função da variação do preço do painel fotovoltaico.....	60
Figura 4.6 - TCO em função da variação da eficiência do painel fotovoltaico.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela – 2.1 Eficiência confirmadas de células.	32
Tabela – 3.1 Exemplo de cálculo para três tipos de equipamentos.	46
Tabela – 4.1 Parâmetros do consumo energético.	53
Tabela – 4.2.Parâmetros do sistema fotovoltaico.	55
Tabela – 4.3 Valores de referência para o custo associado ao consumo de energia a partir da concessionária.....	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

4G	Redes Móveis de quarta geração
5G	Redes Móveis de quinta geração
AE	<i>Access Edge</i>
a-Si:H	<i>Hydrogenated Amorphous Silicon</i>
BBU	<i>Baseband Unit</i>
BS	Estação Base
CAGR	<i>Compound Annual Growth Rate</i>
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i>
CC	Corrente Contínua
CIGS	<i>Cooper Indium Gallium Selenide</i>
CdTe	<i>Cadmium Telluride</i>
CO ₂	Dióxido de carbono
CRAN	<i>Centralized Radio Access Network</i>
c-Si	<i>Crystalline silicon</i>
CZTS	<i>Copper Zinc tin Sulfide</i>
CZTSSe	<i>Copper Zinctin Sulfur-Selenium Alloy</i>
DRAN	<i>Distributed Radio Access Network</i>
DSSC	<i>Dye Sensitized Solar Cells</i>
DWDM	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i>
EB	<i>Exabyte</i>
EVA	Ethylene-vinyl acetate
FDD	<i>Frequency Division Duplex</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
GaAs	<i>Gallium Arsenide</i>
GB	<i>Gigabytes</i>
GHz	Gigahertz

GW	Gigawatt
HetNets	<i>Heterogeneous Networks</i>
HSS	<i>Home Subscriber Server</i>
HSP	Horas de Sol Plena
Inp	<i>Indium Phosphide</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
kWh	Quilowatt hora
LTE	Long Term Evolution
M2M	<i>Machine-to-Machine</i>
Mbps	<i>Megabits por Segundo</i>
ME	<i>Metro Edge</i>
MHz	Megahertz
MME	<i>Mobility Management Entity</i>
MN	<i>Metro Node</i>
MW	Megawatt
MIMO	<i>Multiple Inputs, Multiple Outputs</i>
OADM	<i>Optical Add-Drop Multiplexer</i>
OPEX	<i>Operational Expenditure</i>
PDN-GW	<i>Packet Data Node Gateway</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RAN	<i>Radio Access Network</i>
RRH	<i>Remote Radio Head</i>
RRU	<i>Remote Radio Unit</i>
SF	Sistema Fotovoltaico
SFCR	Sistema Fotovoltaico Conectado a Rede
SFH	Sistema Fotovoltaico Híbrido
SFI	Sistema Fotovoltaico Isolado

S-GW	<i>Serving Gateway</i>
SIN	Sistema Interligado Nacional
TCO	<i>Total Cost of ownership</i>
UHD	<i>Ultra High Definition</i>
UV	<i>Ultraviolet</i>
WSS	<i>Wavelength Selective Switching</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. Justificativa	18
1.2. Objetivos	19
1.3. Trabalhos Correlatos	20
1.4. Organização do Trabalho	24
2. REFERENCIAL TEÓRICO	25
2.1. Redes 5G	25
2.1. Arquiteturas de Rede Móvel	27
2.3. Rede de Transporte.....	29
2.4. Sistema Fotovoltaico	31
2.4.1. Radiação Solar.....	33
2.4.2. Aplicações de Sistemas Fotovoltaicos	35
2.5. Principais Componentes de Sistemas Fotovoltaicos	36
2.5.1. Módulos fotovoltaicos.....	37
2.5.2. Inversores	38
3. MODELAGEM MATEMÁTICA.....	40
3.1. Demanda de Tráfego	40
3.2. Modelos de Consumo de Energia.....	41
3.2.1 Rede de Rádio	41
3.2.2 Rede Ótica de Transporte.....	43
3.3 Dimensionamento do sistema fotovoltaico	45
3.3.1 Levantamento do Recurso Solar.....	45
3.3.2 Escolha da Aplicação Fotovoltaica;	45
3.3.3 Levantamento Adequado de Demanda e Consumo de Energia Elétrica	46
3.3.4 Geração de Energia Fotovoltaica	47
3.3.5 Custo Total de Aquisição	48

3.3.6	Economia Monetária do Usuário.....	50
4.	RESULTADOS.....	52
4.1	Estudo de Caso	52
4.2	Resultados Obtidos.....	55
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

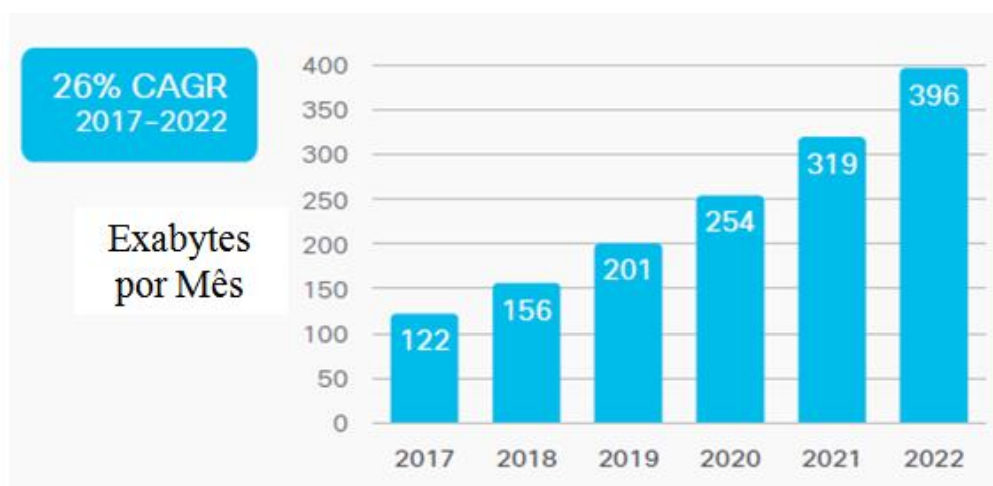
1. INTRODUÇÃO

A quinta geração de redes móveis (5G) é definida como o padrão para próxima geração de comunicações móveis, esta permitirá a conectividade para uma ampla gama de aplicativos e casos de uso. Para isso os recursos do acesso sem fio devem ser muito melhores quando comparados com as versões anteriores (Ericsson, 2016).

A implantação de novas interfaces sem fio, baseada em transmissão massiva de múltiplas antenas, deverá ter um impacto significativo na complexidade da rede móvel, resultando em um maior consumo de energia (Fiorani, 2016a), principalmente, quando considerada a crescente demanda por qualidade de serviço e o aumento do tráfego de dados em cenários atuais.

De acordo com a previsão da Cisco em 2018 há uma projeção do tráfego IP (*Internet Protocol*) global para quase o triplo de 2017 a 2022. Em 2017 o tráfego IP geral foi de 122 EB (Exabyte) por mês e deve crescer para 396 EB por mês até 2022 tendo uma taxa composta anual de crescimento (CAGR - *Compound Annual Growth Rate*) de 26% como visto na Figura 1.1 (Cisco, 2018).

Figura 1.1: Projeção do tráfego de dados no período 2017-2022.

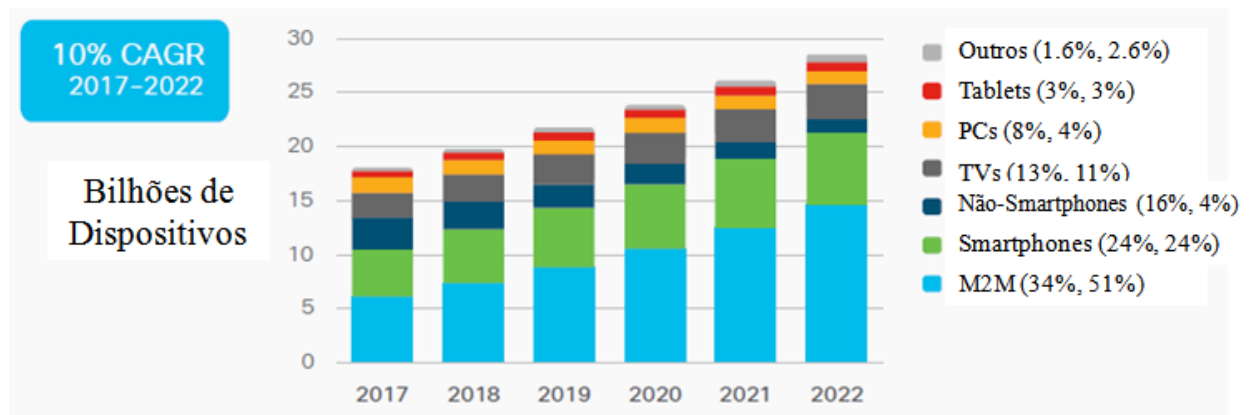


Fonte: (CISCO, 2018).

Ainda de acordo com a Cisco, a cada ano, vários novos dispositivos, em diferentes formatos, com maior capacidade e inteligência são introduzidos e adotados no mercado, em termos globais, os dispositivos e as conexões estão crescendo mais rapidamente do que a população e os usuários da internet, representando, respectivamente, um CAGR 10%, 1,0% e 7%.

As conexões M2M (*Machine to Machine*) serão a categoria que mais crescem, aumentando quase 2,4 vezes durante o período de previsão, com CAGR de 19%, até 2022. Diante disso, até 2022, as conexões M2M representarão 51% do total de dispositivos e conexões conforme apresentado pela *Figura 1.2*

Figura 1.2: Crescimento global de dispositivos e conexões 2017-2022



Fonte (Cisco, 2018)

Este aumento no volume de tráfego e dispositivos acaba gerando um aumento no consumo de energético o que pode deixar as soluções habituais de fornecimento de energia elétrica economicamente não atrativas levando em consideração as tarifas e o volume de despesas operacionais necessárias para a operação da rede (Souza, 2016).

No contexto brasileiro, por exemplo, nos últimos anos tem-se observado diversos processos de realinhamentos tarifários criado pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). O sistema de bandeiras tarifárias sinaliza o custo real da energia gerada e indicam se haverá ou não acréscimo no valor da energia a ser repassada ao consumidor final, em função das condições de geração de eletricidade, que inclui principalmente a questão climática (ANEEL, 2015).

O sistema de bandeiras tarifárias é dividido nas seguintes modalidades:

- Bandeira verde: condições favoráveis de geração de energia. A tarifa não sofre nenhum acréscimo;
- Bandeira amarela: condições de geração menos favoráveis. A tarifa sofre acréscimo de R\$ 0,01343 para cada quilowatt-hora (kWh) consumido;
- Bandeira vermelha - Patamar 1: condições mais custosas de geração. A tarifa sofre acréscimo de R\$ 0,04169 para cada kWh consumido.
- Bandeira vermelha - Patamar 2: condições ainda mais custosas de geração. A tarifa sofre acréscimo de R\$ 0,06243 para cada kWh consumido.

Como exemplo podemos utilizar o ano de 2019 (ANEEL, 2019a) (ANEEL, 2019b) a bandeira tarifária em julho de 2019 foi amarela, com custo de R\$ 1,50 para cada 100 quilowatts-hora consumidos, já em novembro de 2019 a bandeira foi vermelha (patamar 1) com custo de R\$ 4,169 para cada 100 kWh consumidos. Isso se dá pelo fato de que julho é um mês típico da estação seca nas principais bacias hidrográficas do SIN (Sistema Interligado Nacional). A previsão hidrológica para o mês sinaliza vazões abaixo da média histórica e tendência de redução dos níveis dos principais reservatórios.

Novembro, ao contrário de julho, se caracteriza pelo início do período úmido das principais bacias hidrográficas do SIN, porém, nos últimos anos, o regime de chuvas regulares nessas regiões tem sido significativamente abaixo quando comparado ao padrão histórico. A previsão hidrológica para o mês de novembro também apontava vazões afluentes aos principais reservatórios abaixo da média, o que repercute diretamente na capacidade de produção das hidrelétricas, elevando os custos relacionados ao risco hidrológico.

Esses cenários requerem o aumento da geração termelétrica, o que influencia no aumento do preço da energia e nos custos relacionados ao risco hidrológico, sendo essas duas variáveis as que determinam a cor da bandeira a ser acionada.

Além do fator econômico, tem-se também o fator ambiental, embora o cenário brasileiro seja privilegiado, já que a sua matriz elétrica é composta principalmente por fonte considerada não poluente, grande parte do mundo é altamente dependente de fontes não renováveis e potencialmente poluidoras, como o petróleo, carvão mineral, gás natural, entre outros, somando 65,1% do total da matriz elétrica mundial (EPE, 2019).

Apesar da energia hidráulica, mais utilizada no Brasil, ser considerada uma energia limpa, pois, é uma fonte de energia renovável e não poluente, existem vários problemas relacionados a este recurso, como a expropriação de comunidades, desmatamento e perda do equilíbrio do ecossistema (Sousa, 2000). Além do risco de passar por problemas como no ano de 2015, quando ocorreu uma forte crise na disponibilidade de energia causada pela seca histórica nos reservatórios das hidrelétricas, mostrando que este cenário de forte dependência de uma determinada fonte de energia pode ser problemático.

Diante disso, no contexto atual cujas ações adquirem responsabilidades ambientais e grande parte do mundo ainda é altamente dependente de fontes consideradas não renováveis, e potencialmente poluidoras (EPE, 2019), estratégias de redes móveis com baixo impacto ambiental se tornam atrativas já que as redes móveis são o maior contribuinte para o consumo de energia das redes de comunicação e espera-se que o seu impacto aumente devido ao crescimento exponencial do tráfego móvel previsto (Fiorani, 2016b).

Desse modo, a energia solar surge como uma alternativa, visto que é uma energia que utiliza uma fonte renovável, mas com reduzido impacto com a possibilidade de aplicá-lo em qualquer meio habitacional (urbano ou rural), neste caso instalado em edifícios residenciais, utilizando sua própria cobertura ou fachada.

1.1. Justificativa

Considerando o cenário mundial onde grande parte é dependente de energia não renovável que geram grande impacto ambiental, a energia fotovoltaica se torna uma opção muito atrativa, pois em esfera ambiental tem baixo impacto ambiental, pois é uma energia limpa, renovável e sustentável, não emite gases, líquidos ou sólidos durante a operação. Tem alta confiabilidade, baixa manutenção, além de ser uma forma de geração distribuída e silenciosa, além de ser uma fonte de energia inesgotável (Tolmasquim, 2016) (ANEEL, 2005).

Apesar dos benefícios, existem aspectos limitantes quanto ao uso desta tecnologia, uma das restrições técnicas é a baixa eficiência dos sistemas de conversão de energia, o que torna necessário o uso de grandes áreas para a captação de energia em quantidade suficiente para que o empreendimento se torne economicamente viável. Porém se comparada com a energia hidráulica, considerada uma energia renovável, a limitação de espaço torna-se uma restrição não grave uma vez que esta requer grandes áreas que são inundadas (ANEEL, 2005).

Outro aspecto limitante é o financeiro, por ser uma tecnologia relativamente nova a fabricação dos painéis ainda é reduzida tornando um SF (Sistema Fotovoltaico) relativamente caro. Porém esse panorama já evoluiu muito com os anos e tende a evoluir mais ainda com as novas tecnologias e principalmente com a expansão do uso.

A nível global, a utilização da tecnologia fotovoltaica tem aumentado nos últimos anos, após um desenvolvimento global limitado em 2014 e um crescimento lento de 25% em 2015, o mercado continuou crescendo. A China, considerada o principal mercado consumidor desta tecnologia, seu desenvolvimento fotovoltaico, entre os anos de 2016 e 2017, corresponde a quase 54% da capacidade instalada total em 2017 crescendo de 15,2 GW (Gigawatt) em 2015, para 34,4 GW em 2016 e para 53GW em 2017. Outros mercados também cresceram, Austrália (1,25 GW), Coréia (1,2 GW), Paquistão, cerca de 800 MW (Megawatt), Taiwan (523MW) e Tailândia (251MW) são agora mercados fotovoltaicos estabelecidos (IEA, 2018).

No ano de 2017, 29 países passaram a marca GW em relação à capacidade instalada de energia fotovoltaica. A Alemanha, que liderava o ranking há anos, perdeu sua posição de

liderança em 2015 e agora ocupa a quarta posição (42 GW), com o Japão em terceiro (49 GW) e os EUA em segundo (51GW) como visto na figura abaixo (IEA, 2018),.

Figura 1.3: 10 (dez) Principais Países em Instalações Fotovoltaicas e sua Capacidade Total Instalada em 2017

1		China	131 GW
2		USA	51 GW
3		Japan	49 GW
4		Germany	42 GW
5		Italy	19,7 GW
6		India	18,3 GW
7		UK	12,7 GW
8		France	8 GW
9		Australia	7,2 GW
10		Spain	5,6 GW

Fonte: (IEA, 2018)

Desse modo, considerando o aumento do tráfego de dados o consumo de energia por parte das operadoras de rede móvel tende a aumentar causando 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 (Souza, 2016).

Assim, com o objetivo de suprir a demanda energética e diminuir as despesas da operadora de rede móvel com o custeio da mesma provinda da concessionária e diminuir o impacto ambiental causado, propõe-se o uso de sistemas fotovoltaicos conectados à rede urbana, que tem baixo custo de manutenção e baixo impacto ambiental.

1.2. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal apresentar um estudo de viabilidade técnico econômica, para utilização de sistema fotovoltaico em arquiteturas de redes capazes de sustentar a alta demanda de tráfego de um sistema 5G.

Como objetivos específicos pode-se destacar:

- Aplicar a metodologia descrita em (Souza, 2016) com o objetivo de suprir a demanda energética, comparando resultados para arquiteturas de rádio centralizada e distribuídas.
- Realizar uma análise geral sobre a importância da utilização de uma energia limpa destacando as vantagens da mesma;

- Abordar conceitos relativos ao uso de sistemas fotovoltaicos, destacando parâmetros e questões importantes que influenciam diretamente para um melhor aproveitamento do sistema, parâmetros como recurso solar disponível, opções de instalação, e equipamentos que podem ser utilizados, são alguns abordados.
- Realizar um comparativo do custo de aquisição do sistema fotovoltaico com o custeio de energia elétrica proveniente de concessionárias.

1.3. Trabalhos Correlatos

A crescente conscientização mundial com a questão energética também se vê refletida na comunidade acadêmica, com o desenvolvimento de estudos que visam mitigar, ou mesmo, melhorar o consumo de energia. Para isso, pesquisas optam por usar a técnica de economia de energia para reduzir o consumo médio de energia da rede, conforme é apresentado em (Fiorani, 2016b), (Fiorani, 2016a); (Tombaz *et. al.*, 2014) e (Liu, Natarajan e Xia, 2016), ou utilizar técnicas nas quais o objetivo não está especificamente na diminuição do consumo, mas sim, em suprir a necessidade da demanda energética da rede com uso de fontes de energias alternativas (Han e Ansari, 2016), (Wang *et. al.* 2017), (Zhang *et al*, 2015), (Liu *et. al.*, 2014) e (Souza, 2016).

Em (Fiorani, 2016b) é apresentada uma metodologia para avaliação do consumo de energia da arquitetura de rede móvel, levando em consideração os segmentos de rádio e transporte. São propostas arquiteturas de implantação de redes móveis baseadas em diferentes tecnologias de rádio e transporte, como *macro cells*, *small cells*, micro-ondas, cobre ou fibra, avaliando qual cenário apresenta a melhor solução em termos de eficiência energética.

De acordo com os resultados, a melhor opção de arquitetura, depende diretamente do tráfego exigido pela área. Para tráfego de dados menores, soluções baseadas apenas no uso de *macro cells* com *backhaul* baseado em fibra são uma opção mais viável, enquanto que para demanda de tráfego mais alta redes heterogêneas com arquitetura baseada em macro e *small* possuem melhor eficiência energética. Porém, a utilização de *small cells* depende das tecnologias adotadas no *backhaul*, pois, pra uma inplantação de rede heterogênea a arquitetura de transporte desempenha um papel fundamental no seu consumo energético. Embora o trabalho tenha feito uma análise sobre estratégias para redes móveis avaliando o consumo energético, o mesmo não considerou a utilização de fontes de energias renováveis.

Já em (Fiorani, 2016a) é utilizada a técnica de redução do nível de consumo de energia utilizando arquiteturas voltadas para rede 5G e fazendo uma análise de desempenho energético das arquiteturas *RAN*, cada uma utilizando uma opção diferente para dividir as

funções de processamento da banda base, com a finalidade de instigar as escolhas futuras das operadoras de rede móveis. Os resultados mostram que, com o LTE (*Long Term Evolution*), o consumo de energia da rede de transporte representa uma pequena parcela do consumo total de energia da rede, logo, as arquiteturas de rádio totalmente centralizadas são opções mais viáveis em comparação com as arquiteturas distribuídas convencionais. Por outro lado, com interfaces de rádio 5G avançadas, as arquiteturas centralizadas precisam ser projetadas adequadamente para oferecer um bom desempenho energético. Apesar de mostrar resultados satisfatórios, o trabalho não avalia a utilização de fontes renováveis de energia para o funcionamento do sistema.

Em (Tombaz *et. al.*, 2014) é mostrado que uma solução promissora para o aumento do consumo de energia das redes de acesso sem fio causado pela crescente demanda por dados móveis é o conceito de redes heterogêneas. Porém, o consumo energético advindo do backhaul, torna-se significativo e pode limitar as vantagens de implantações das mesmas. Estão, este artigo tem como objetivo avaliar o impacto do backhaul sobre o consumo de energia das redes de acesso sem fio, considerando diferentes demandas de tráfego de dados. Para a análise, foram consideradas três arquiteturas de backhaul que combinam diferentes tecnologias para a rede de acesso tais como: cobre, fibra e micro-ondas. Os resultados mostram que, para a implantação de *small cells* o backhaul pode atingir 50% do consumo de energia de uma rede de acesso sem fio. Porém, as arquiteturas híbridas de backhaul que combinam fibra e microondas apresentam desempenho economicamente satisfatório. No entanto, o trabalho não avalia o uso de energia renovável para alimentação das arquiteturas, além de não considerar um cenário voltado para redes 5G.

(Liu, Natarajan e Xia, 2016), tem como objetivo otimizar a eficiência energética com a introdução de vários níveis de profundidade do sono. Usando o modelo de rede celular heterogênea baseada em geometria estocástica que deriva probabilidade de cobertura, taxa média alcançável e eficiência energética de *small cells*, Uma maneira de melhorar a eficiência é desligar as *small cells* ou mantê-las no modo de economia de energia, preservando a qualidade de serviço (QoS – *Quality of Service*) do usuário final. Duas formas de políticas de modo de repouso são utilizadas: aleatória e estratégica, os resultados da simulação confirmam a eficácia do método com melhorias de aproximadamente 30% na eficiência energética utilizando política de suspensão aleatória e pode ser melhorada ainda mais em 15% com política de suspensão estratégica. Entretanto, o trabalho não faz uso de energia renovável para alimentação das arquiteturas.

Dentre os trabalhos que se baseiam em suprir a necessidade da demanda energética da rede com uso de fontes de energias alternativas, (Han e Ansari, 2016) propõe o aprovisionamento de fontes de uma energia renovável para a alimentação das BSs de uma rede heterogênea (HetNet - *Heterogeneous Networks*) atendendo aos requisitos de qualidade de serviço da rede e minimizando a despesa de capital (CAPEX – *Capital Expenditure*) da implantação do sistema.

A solução de aprovisionamento de energia consiste em em dois algoritmos, um de balanceamento de carga de tráfego com reconhecimento de custo de provisão e outro de dimensionamento do sistema de energia binária. Dada a carga equilibra a carga de tráfego entre BSs com base nos requisitos de QoS e nos custos de provisão. O consumo de energia dos MBSs é calculado com base em suas cargas de tráfego. O segundo algoritmo otimiza os tamanhos dos painéis solares e as capacidades da bateria para MBSs individuais com base na demanda e consumo energético das mesmas. Os resultados fornecem orientações para o planejamento e implantações de rede da perspectiva do fornecimento de energia renovável nas redes celulares, porém, não considera despesas operacionais (OPEX - *Operational Expenditure*) e não considera um cenário de rede de quinta geração.

(Wang *et. al.* 2017) estudou-se o problema da minimização do custo de energia elétrica em redes heterogêneas alimentadas por fontes híbridas de energia. O estudo propõe algoritmos heurísticos para obter soluções aproximadas, abordando os problemas de minimização total de energia e alocação de energia verde. Os resultados da simulação demonstram que a solução proposta pode reduzir significativamente o custo total de energia em comparação com outros dois algoritmos de mesmo nível. No entanto, o trabalho não analisou fatores que influenciam na produtividade de fontes renováveis de energia e não aplicou o estudo para cenários de rede 5G.

(Zhang *et al.*, 2015) propõe um algoritmo de associação de usuários para compensações de consumo de energia e balanceamento de carga entre as BSs da HetNet que são alimentadas por fontes de energia renovável. O algoritmo considera o consumo de energia da BS e a carga de tráfego de usuários e a energia renovável disponível das estações base para compensações de carga de energia, assim, o problema de otimização define-se em encontrar a melhor configuração ou topologia de usuários na rede, para que exista uma proporção que apresente o menor consumo de energia, porém, esse não considera uma fonte de energia específica.

Em (Liu *et. al.*, 2014) os autores propõem a associação adaptativa de usuários em redes heterogêneas com intuito de minimizar os gastos energéticos reduzindo o consumo dos

equipamentos de rádio no cenário, onde todas as BSs são totalmente alimentadas por energia renovável. Para isso, primeiramente, foi proposto um algoritmo *offline* ideal, em que o método de gradiente de decisão é usado para obter a solução de associação de usuário, consistindo na avaliação do número de equipamentos de usuários na HetNets e a quantidade de recursos usados para servir os mesmos. O segundo algoritmo proposto foi de associação de usuários *online* que é capaz de tomar decisões a partir da associação de usuários e se baseia em dados de redes remanescentes. Neste trabalho foi constatado que ao utilizar algoritmo *online* há um bom equilíbrio na alocação de recursos, porém, o *offline* tem maior desempenho quando comparado a níveis globais. Sendo assim, combinar a os algoritmos com a utilização de fontes renováveis mostrou-se com grande potencial para eficiência energética e ambiental em HetNets. No entanto, apesar deste trabalho ressaltar o potencial do sistema fotovoltaico na alimentação de equipamentos em HetNets, o mesmo não apresenta avaliação técnica e econômica para o sistema, assim como não destaca um cenário ao qual o estudo foi projetado.

Já em (Souza, 2016) é feita uma avaliação técnico-econômica relacionada à implantação de um sistema fotovoltaico no contexto de HetNet, considerando o consumo energético de quatro arquiteturas com o intuito de complementar as necessidades energéticas, diversificar a matriz energética e mitigar o volume de emissões de CO₂ na atmosfera terrestre. São consideradas despesas com aquisição e instalação de equipamentos fotovoltaicos (CAPEX) assim como despesas de manutenção e operação (OPEX). Os resultados demonstram viabilidade na adoção do sistema fotovoltaico quando comparado a fontes convencionais de geração de energia, bem como, sustentabilidade ambiental considerável através da redução nas emissões de CO₂, porém, o trabalho não utiliza um cenário 5G para avaliações.

Dentre os trabalhos citados, (Fiorani, 2016a) e (Souza, 2016) foram utilizados como base para esta dissertação. Em (Fiorani, 2016a) são considerados diferentes distribuições de RAN observando qual seria a opção mais viável em termos energéticos em um cenário 5G, porém, o trabalho não considera o uso de uma fonte de energia renovável. Em (Souza, 2016) é considerada uma fonte de energia renovável, mas o cenário utilizado não é voltado para a rede 5G.

Diante disso, este estudo visa abordar as lacunas apresentadas em ambos os trabalhos, implementando uma abordagem que combina as duas estratégias, desta forma avaliar em termos econômicos os custos de implantação de um sistema fotovoltaico em um cenário de rede 5G.

1.4. Organização do Trabalho

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

- O Capítulo 2 apresenta o referencial teórico necessário para o desenvolvimento deste trabalho, são abordados conceitos sobre arquiteturas de redes móveis e sistema fotovoltaico.
- O Capítulo 3 apresenta os modelos matemáticos utilizados para estimar a geração de energia elétrica usando o sistema fotovoltaico, mostrando os modelos para os cálculos do consumo energético das arquiteturas utilizadas e o Custo Total de Propriedade (TCO – *Total Cost of Ownership*) do sistema fotovoltaico.
- O Capítulo 4 realiza o estudo de caso e uma discussão sobre os resultados obtidos.
- O Capítulo 5 discute as conclusões do trabalho e as propostas de trabalhos futuros.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Redes 5G

A quinta geração de redes móveis (5G) terá grande contribuição nesse momento onde o acesso à informação e compartilhamento de dados estará disponível em qualquer lugar e a qualquer hora para qualquer pessoa (Ericsson, 2016).

O aspecto mais desafiador para as redes 5G é suportar uma ampla variedade de casos de uso em uma era onde tudo está conectado. Para algumas aplicações, como o vídeo de definição ultra alta (UHD - *Ultra High Definition*) e a realidade aumentada, é necessário que exista uma comunicação em alta velocidade e alta capacidade, no entanto para outras, como a Internet das Coisas (IoT - *Internet of Things*) e veículos autônomos, é necessário que os serviços sejam ultraconfiáveis e de baixa latência (Li *et al*, 2017).

Sendo assim, a quinta geração precisa atender, rigorosamente, alguns requisitos como alta velocidade, baixa latência, escalabilidade e flexibilidade, maior cobertura, segurança e eficiência espectral (ITU, 2018) (Queiroz *et al*, 2016) (Hossain e Hasan, 2015).

- Alta velocidade: Manutenção de transmissão de altas taxas de dados em redes celulares extremamente densas. Para tal, diversas tecnologias estão sendo testadas para serem aplicadas nas redes 5G com intuito de suprir as necessidades de bilhões de usuários que requerem grande volume de dados a todo momento.
- Baixa latência: A baixa latência é uma das principais características no contexto de redes 5G para garantir a qualidade de serviço necessária para aplicações em tempo real. Sendo assim, latências próximas a 1 milissegundo (ms) são ideais para essas aplicações como transmissão de mensagens por robôs de monitoramento de pacientes e veículos autônomos.
- Escalabilidade e flexibilidade: A rede 5G deve ser capaz de atender um grande número de usuários com diferentes perfis que podem requisitar ao mesmo tempo diversos serviços, portanto, a rede deve suportar uma demanda escalável de usuários.
- Maior cobertura: A quinta geração de redes móveis precisa ter disponibilidade, ou seja, é preciso que haja rede disponível quando e onde for necessário tendo assim uma maior área de cobertura.
- Segurança: Considerando que um dos requisitos para a rede 5G seja a baixa latência, e considerando a densificação da rede e o aumento dos requisitos provindos do 5G, os problemas de segurança se tornam mais complexos visto que uma autenticação, por exemplo, que é uma operação essencial nas redes móveis, atualmente necessita de

algumas centenas de milissegundos o que é incompatível com o requisito de baixa latência. Então, são necessários mecanismos de segurança que não causem tanto impacto à latência.

- Eficiência espectral.

No que diz respeito à eficiência espectral, as novas antenas vão incorporar a tecnologia conhecida como MIMO (*Multiple Input, Multiple Output*) massivo, que permite que vários transmissores e receptores transfiram mais dados ao mesmo tempo, logo, a fim de ampliar ainda mais a capacidade de tráfego e permitir a largura de banda de transmissão necessária para suportar taxas de dados muito altas (Cisco).

A tecnologia 5G inclui espectros não utilizados no 4G, isso inclui espectros abaixo de 6GHz e espectros em faixas de frequências mais altas (toda a faixa de frequência de até aproximadamente 100 GHz é considerada nesta fase).também foi desenvolvida para combinar tecnologias sem fio licenciadas e não licenciadas, o que adiciona largura de banda para os usuários (Ericsson, 2015).

O MIMO massivo é uma tecnologia evolutiva da tecnologia MIMO, o sistema utiliza matrizes de algumas centenas de antenas que atendem simultaneamente a dezenas de terminais no mesmo recurso de frequência e tempo (Larsson *et al.*, 2014). É uma tecnologia que tira proveito de várias antenas no transmissor e/ou receptor que pode melhorar substancialmente a taxa de transferência, a capacidade e a cobertura da rede sem exigir largura de banda adicional (Foschini e Gans, 1998).

Desse modo, a implantação de novas interfaces sem fio 5G baseadas em transmissão massiva de múltiplas frequências e *beamforming*, que é capacidade de direcionar energia de rádio através do canal de rádio em direção a um receptor específico, deverá ter um impacto significativo na complexidade e no consumo de energia da rede de transporte (Fiorani, 2016a).

Em termos de tecnologias de acesso por rádio, os sistemas 5G incluirão interfaces de rádio LTE que são compatíveis com versões anteriores.

De acordo com (Alcatel-Lucent, 2009) LTE é o padrão de comunicação para tecnologia móvel, a arquitetura atual de rede de telefonia móvel composta pela rede de acesso por rádio e pelo núcleo da rede (CN - *Core Network*) é composto principalmente por:

- MME (*Mobility Management Entity*): Gerencia o acesso a rede e autentica o usuário na rede além da sinalização entre nós do CN para mobilidade entre redes de acesso;
- HSS (*Home Subscriber Server*): Servidor que armazena os dados dos usuários.

- S-GW (*Serving Gateway*): *Gateway* de serviço, responsável pela conexão da rede de acesso com o núcleo de rede, transporta os dados entre usuários e outras redes.
- PDN-GW (*Packet Data Node Gateway*): *Gateway* de pacote diretamente relacionado à qualidade de serviço.

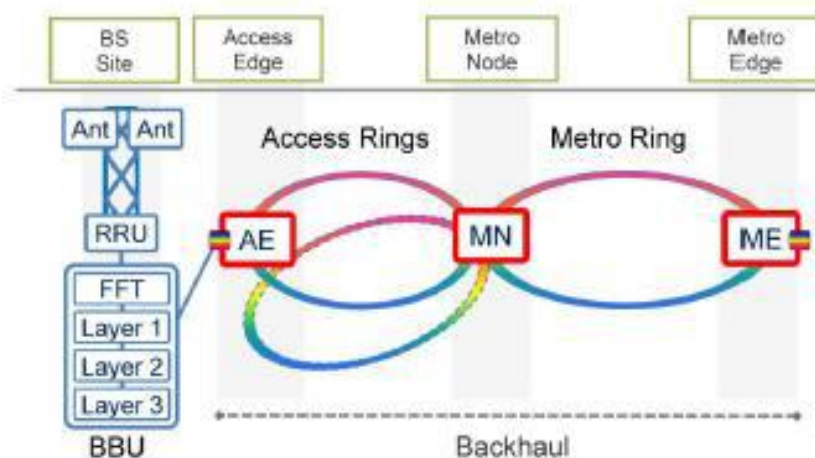
A rede de acesso por rádio LTE será responsável pela transmissão dos dados, ou seja, a comunicação entre os usuários e o núcleo da rede.

2.1. Arquiteturas de Rede Móvel

Considerando um sistema 5G e tendo LTE como interface de rádio, será descrito a seguir duas arquiteturas com diferentes distribuições da RAN que são aplicáveis a esse cenário.

A Figura 2.1 mostra uma RAN distribuída que é a arquitetura de rede de acesso tradicional, representa uma arquitetura RAN convencional na qual, cada estação base (BS) é composta por unidade de banda base (BBU - *Baseband Unit*) e de unidades de rádio remotas (RRU - *Remote Radio Unit*) (Souza, D., 2018).

Figura 2.1: Arquitetura RAN Distribuída



Fonte: (Fiorani, 2016a)

No *uplink*, a RRU realiza o processamento do sinal de rádio e gera as amostras de (I/Q) digitalizadas, que são transmitidos à BBU usando links frontais de curto alcance. A BBU aplica a transformada rápida de Fourier (FFT - *Fast Fourier transform*) no sinal de rádio digitalizado gerado nas RRU's para converter as amostras de (I/Q) do domínio do tempo para o domínio da frequência. Posteriormente, esses dados passam por processamento de camada física (camada 1), camada de controle de acesso médio (camada 2) e camada de rede (camada 3). Quando esta fase termina, os dados processados são transportados entre a BS e o ME

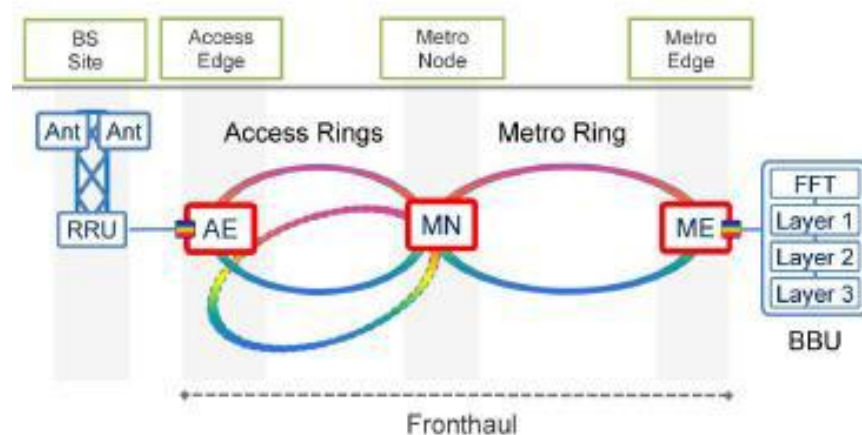
(*Metro Edge*) através de enlaces ópticos. Na direção do *downlink*, as mesmas funções são executadas na ordem inversa (Fiorani, 2016a).

O RRU é conectado a BBU através de um link digital que pode utilizar os protocolos eCPRI (*Enhanced Common Public Radio Interface*), OBSAI (*Open Base Station Architecture Initiative*) ou ORI (*Open Radio Equipment Interface*) para transportar os dados digitalizados de rádio.

Nesse modelo, cada Estação Base possui todas as funções de banda base. Colocar as funções de banda de base na BS tem implicações na rede de rádio, torna-se mais desafiador fornecer uma coordenação de rádio rígida, ou seja, não suporta esquemas complexos de coordenação que são empregados para aumentar o controle e capacidade da rede de acesso, pois esses esquemas requerem uma alta capacidade, uma latência muito baixa (Institute, C. M. R, 2011) o que pode causar um impacto negativo no desempenho da rede de rádio, especialmente se grandes ganhos forem esperados da coordenação de rádio. Além disso, os recursos de processamento de banda base são distribuídos e não podem ser compartilhados entre diferentes BSs (Fiorani, 2016a).

A representação de uma RAN centralizada é mostrada na Figura 2.2 e representa uma arquitetura RAN totalmente centralizada, ou seja, as funções e operações de banda base são movidas da RAN, normalmente onde ficam as torres, para serem executados por equipamentos centralizados, alocados em locais que agregam/centralizam o processamento da rede (Simeone *et al.*, 2016), dessa forma um grande grupo de RRH (*Remote Radio Heads*) pode ser atendido de forma eficiente (Checko *et al.*, 2015).

Figura 2.2: Arquitetura RAN Totalmente Centralizada



Fonte: (Fiorani, 2016a)

Assim como em (Fiorani, 2016a) foi assumido *fronthaul* digital, como resultado, a rede de transporte transporta os dados digitalizados do domínio do tempo I/Q entre RRUs e BBUs (isto é, tráfego de *fronthaul*) usando protocolos padrão tais como CPRI.

Os benefícios da RAN com a centralização do processamento da estação base incluem:

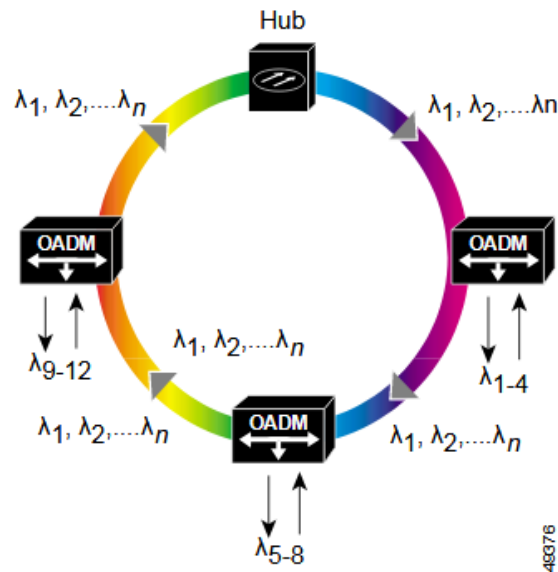
- Redução no Custo do Aluguel de Espaços: Os locais utilizados são reduzidos para funcionar apenas os equipamentos de rádio remoto RRH (Andrade *et al.*, 2015);
- Diminuição do Consumo Energético: Com o compartilhamento dos recursos tem-se a economia de custos, pois, energia em redes móveis é utilizada com amplificadores de potência, que fornecem energia para as RRH, BBU e ar-condicionado (Souza, P., 2018);
- Capacidade: tecnologias de transmissão e recebimento mais avançadas, como o processamento cooperativo multiponto, podem ser implementadas usando a infraestrutura RAN, levando as melhorias de capacidade de rede notáveis (Souza, D., 2018).

Apesar dos benefícios, em certas configurações, o modo puramente centralizado pode não ser próprio para suportar a demanda de novos serviços e evoluções na rede. Considerando esse modo, os enlaces do *fronthaul* podem saturar rapidamente devido à quantidade de dados enviados para serem processados pelas unidades centralizadas (Souza, P., 2018). Além disso, nos RRHs implantados para RAN, o sinal ocorre ao longo de muitos quilômetros (Checko *et al.*, 2014), o que ocasiona atraso de transmissão que precisa ser monitorado.

2.3. Rede de Transporte

Nesse trabalho, ambas as arquiteturas (distribuída e centralizada) tem sua rede de transporte baseada em interconexões de anéis ópticos de multiplexação por divisão de comprimento de onda (DWDM - *Dense Wavelength Division Multiplexing*), a conexão entre os dispositivos e consequentemente o meio onde haverá tráfego de informações tem a topologia em anel interligados por fibra óptica como mostrado na Figura 2.3.

Figura 2.3: Arquitetura em anel DWDM



Fonte: (Cisco, 2000)

O DWDM é um sistema que multiplexa múltiplos comprimentos de onda que serão transmitidos através de uma única fibra óptica, ou seja, há a transmissão, através de fibras ópticas, de um grande número de comprimentos de onda da portadora simultaneamente e cada um modulado com altas taxas de transmissão digital (Ahumada *et al.*, 2014).

No sistema DWDM, no lado da transmissão tem-se lasers com comprimentos de onda precisos e estáveis que deve fornecer luz estável dentro de uma largura de banda estreita e específica que transporta os dados digitais, modulados como um sinal analógico. Tem-se também os multiplexadores ópticos que combinam os sinais recebidos, como os sistemas DWDM enviam sinais de várias fontes por uma única fibra, o multiplexador obtém os comprimentos de onda ópticos e os converge em um feixe. No lado de recebimento são encontrados fotodetectores e desmultiplexadores ópticos, que separa os componentes da luz para que possam ser detectados discretamente. A desmultiplexação deve ser feita antes que a luz seja detectada, porque os fotodetectores são dispositivos inerentemente de banda larga que não podem detectar seletivamente um único comprimento de onda.

Em transmissão por fibra óptica, efeitos da interferência ou degradação ou mesmo perda do sinal óptico devem ser considerados, então, para minimizar esses efeitos podem ser feitos controles de variáveis como espaçamento entre canais, tolerância do comprimento de onda e níveis de potência do laser. No que diz respeito a multiplexação e desmultiplexação pode haver alguma perda inerente associada, essa perda depende do número de canais, mas

pode ser mitigada com amplificadores ópticos, que aumentam todos os comprimentos de onda de uma só vez sem conversão elétrica.

O principal trabalho das fibras ópticas é orientar as ondas de luz com um mínimo de perda de sinal. As fibras ópticas são compostas por finos fios de dois tipos diferentes de vidro em camadas, chamados núcleo e revestimento, que podem transmitir luz a cerca de dois terços da velocidade da luz no vácuo. A diferença entre os índices de refração dos dois materiais faz com que a maior parte da luz transmitida permaneça dentro do núcleo. Duas ou mais camadas de revestimento protetor ao redor do revestimento garantem que o vidro possa ser manuseado sem danos.

Sobre as arquiteturas de rede, essas são baseadas em muitos fatores, entre eles a topologia. Hoje, as principais topologias na implantação são ponto a ponto e anel. Nesse trabalho a topologia em anel é utilizada, o anel de fibra pode conter apenas quatro canais de comprimento de onda e, normalmente, menos nós que canais. Esse tipo de configuração pode ser implantada com um ou mais sistemas DWDM ou podem ter uma estação central e um ou mais nós OADM (Multiplexador Óptico Add/Drop) como na Figura 2.1.

No nó do hub, o tráfego se origina, é encerrado e gerenciado, e a conectividade com outras redes é estabelecida. Nos nós OADM, os comprimentos de onda selecionados são descartados e adicionados, enquanto os outros passam de forma transparente (canais expressos). Dessa maneira, as arquiteturas de anel permitem que os nós no anel forneçam acesso a elementos de rede, como roteadores, comutadores ou servidores, adicionando ou eliminando canais de comprimento de onda no domínio óptico.

2.4. Sistema Fotovoltaico

Energia Solar Fotovoltaica é a energia resultante do processo de conversão da energia proveniente do sol em energia elétrica (Rüther, 2004). O sol é uma fonte de energia inesgotável e limpa sendo hoje uma das alternativas energéticas mais promissoras para prover a energia necessária ao desenvolvimento humano (Cresesb, 2006). A conversão da energia solar em eletricidade ocorre de modo silencioso, sem emissão de gases, não necessitando de operador para o sistema (Torres, 2012).

A energia solar é uma energia não poluente e não necessita de extensas linhas de transmissão e distribuição o que possibilita a instalação de sistemas de diferentes potências, também pode ser integrada as edificações no meio urbano podendo ser instalada em telhados ou lajes. Além disso, por ser um sistema estático, possui uma baixa taxa de manutenção, juntamente com um alto grau de confiabilidade do sistema (Rüther, 2004).

A conversão fotovoltaica acontece no dispositivo denominado célula solar fotovoltaica, todas as células solares requerem um material absorvente de luz que esteja presente na estrutura celular para absorver fótons e gerar elétrons livres através do efeito fotovoltaico. A luz solar ao atingir uma célula, fornece energia suficiente a alguns elétrons para aumentar seu nível de energia e, portanto, libertá-los e assim saltar a banda de valência para a banda de condução. Uma barreira de potencial embutido na célula atua sobre esses elétrons para produzir uma voltagem, que por sua vez é usada para conduzir uma corrente através de um circuito (Parida *et al.*, 2011).

As células solares podem ser confeccionadas por diversas tecnologias, tais como, filmes finos de CdTe (telureto de cádmio), CIGS (disseleneto de cobre índio e gálio), a-Si: H (silício amorfo hidrogenado), c-Si (silício microcristalino), Si-fitas (silício crescido em fitas), multijunção de alta eficiência, DSSC11(células baseadas em corantes) ou polímeros.

As células fotovoltaicas comerciais são fabricadas à base de silício, pois, apresenta melhor rendimento, em comparação com outros materiais, pode ser constituída de silício amorfo, cristais monocristalinos ou policristalinos (Sampaio *et al.*, 2019)(Green *et al.*, 2013).

A eficiência de conversão das células fotovoltaicas, ou seja, o parâmetro que representa o quão efetivo é o processo de conversão da irradiação solar em energia elétrica, varia conforme o material e tecnologia empregada (Pinho e Galdino, 2014) (Sampaio *et al.*, 2019). A Tabela 2.1 apresenta as maiores eficiências construídas de células fotovoltaicas.

Tabela 2.1 Eficiências confirmadas de células. Fonte (Green *et al.*, 2018).

Tecnologia	Classificação	Eficiência (%)
Silício	Monocristalino	26.7 ± 0.5
	Policristalinos	22.3 ± 0.4
III-V	GaAs (filme fino)	29.1 ± 0.6
	GaAs (policristalino)	18.4 ± 0.5
	InP (monocristalino)	24.2 ± 0.5
Calcôgenico filme fino	CIGS	22.9 ± 0.5
	CdTe	21.0 ± 0.4
	CZTSSe	11.3 ± 0.3
	CZTS	10.0 ± 0.2
Silício amorfo/microcristalino	Amorfo	10.2 ± 0.3
	microcristalino	11.9 ± 0.3
Perovskite	-	20.9 ± 0.7
Sensibilizadas por corante	-	11.9 ± 0.4
Organica	-	11.2 ± 0.3

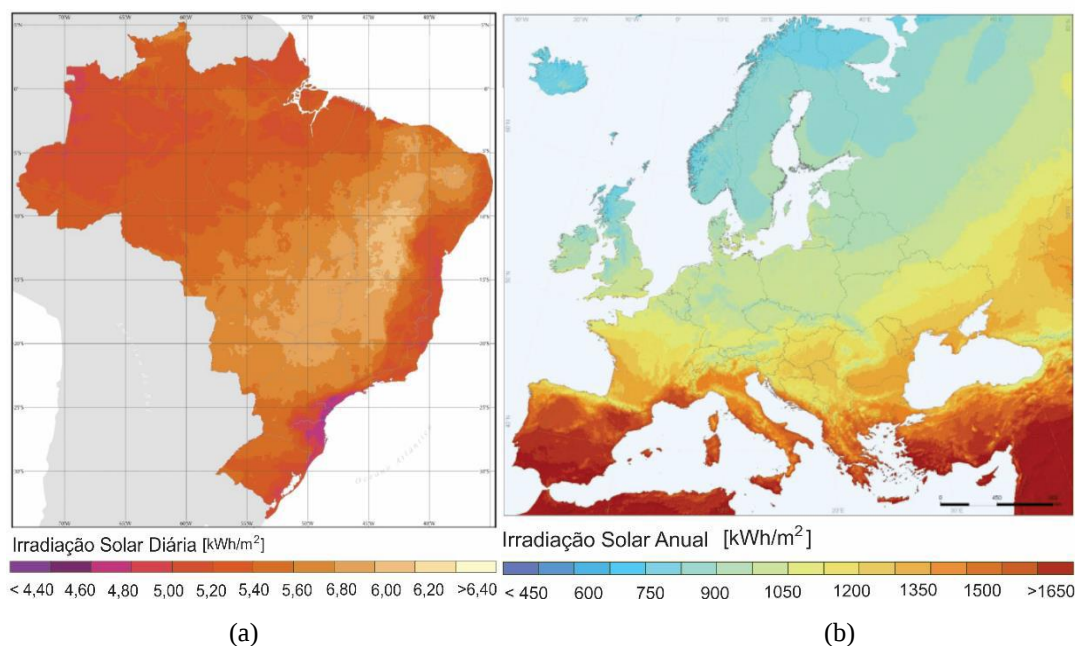
Um dos agentes que impulsionou o desenvolvimento dessa tecnologia foi a corrida espacial, pois, essa era a forma mais adequada e segura para fornecer energia para equipamentos eletrônicos no espaço, levando em consideração que essa era necessária por longos períodos de tempo. (Cresesb, 2006).

2.4.1. Radiação Solar

Radiação solar é como se chama a energia emitida pelo sol e que se propagam em forma de ondas eletromagnéticas. Irradiação solar é uma determinada quantidade de radiação solar por unidade de área, ou seja, a quantidade de radiação que incide em uma superfície integrada durante um intervalo de tempo especificado, normalmente uma hora ou um dia. A radiação solar é uma fonte energética inesgotável e pode ser convertida em outras fontes de energia através de sua captação, como a energia elétrica. (Hickel, 2017) (Rüther, 2004).

Um dos meios de captação e conversão da radiação em energia são os projetos de sistemas fotovoltaicos, para isso, normalmente, é necessária uma irradiação de no mínimo 3 a 4 kWh/ (m². dia) valores estes disponíveis para quase todas as zonas entre os trópicos. Como esses dados são importantes para o desenvolvimento de aplicações de tecnologias para converter a energia proveniente do sol em energia elétrica, as Figuras 2.4 (a) e (b) apresentam mapas com a irradiação média anual do Brasil e de países da Europa respectivamente (Souza, 2016) (Pinho e Galdino, 2014).

Figura 2.4: Mapa de irradiação solar média anual do Brasil e da Europa.



Fonte: (Pereira *et al.*, 2006) e (IET, 2012).

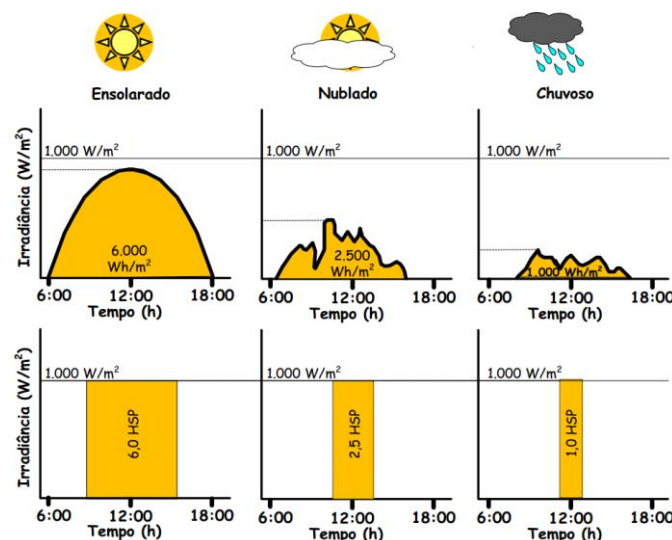
As Figuras 2.4 (a) e (b) mostram que o Brasil tem um grande potencial fotovoltaico principalmente quando comparado a países da Europa, como a Alemanha, onde a geração fotovoltaica é largamente utilizada (Pinho e Galdino, 2014).

Apesar de a radiação solar ser considerada uma variável fundamental, há outras variantes consideradas importantes para a viabilidade do sistema fotovoltaico como a quantidade de HSP (horas de sol pleno), ou seja, o número de horas em que a irradiância solar deve manter-se inalterável e igual a 1 kWh/m^2 . Mesmo que a localidade não tenha grande diversificação na duração da luz solar, é necessário ajustar a orientação do coletor ou módulo fotovoltaico em conformidade com a latitude do local, para que haja um melhor aproveitamento da energia emitida pelo sol (Souza, 2016) (Pinho e Galdino, 2014).

A Figura 2.5 ilustra o significado desse conceito para três dias com diferentes perfis de irradiância o qual é utilizado para determinar o tamanho do gerador fotovoltaico, ou a potência pico da instalação. Considerando-se que ao nível da superfície terrestre a irradiância solar máxima situa-se em um nível de 1 kW/m^2 , ou seja, 1 HPS é a energia recebida durante uma hora com essa irradiância (Pinho *et al.*, 2008).

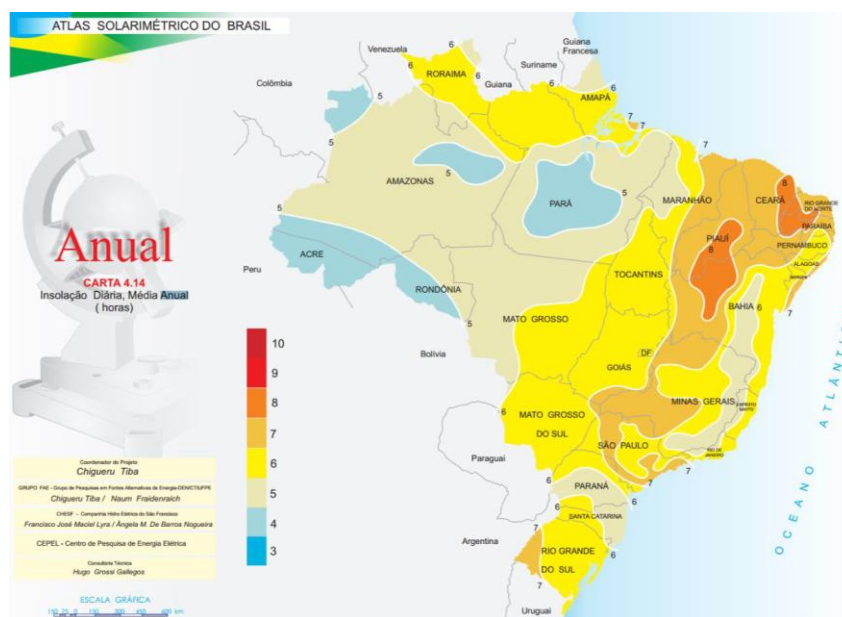
O Brasil, por ser um país localizado em sua maior parte na região intertropical, possui grande potencial de energia solar durante quase todo o ano e em todo o seu território, o número de horas de sol por dia varia entre 4 a 8 horas, média diária anual, de acordo com a região geográfica conforme Figura 2.6.

Figura 2.5: Dias com diferentes valores de HSP, em conformidade com os perfis de radiação solar diária.



Fonte: (Pinho *et al.*, 2008).

Figura 2.6: Insolação diária média anual.



Fonte: (Tiba, 2000).

2.4.2. Aplicações de Sistemas Fotovoltaicos

Ao escolher a aplicação de sistema fotovoltaica que deve ser utilizada é necessário saber que as opções dependem da aplicabilidade e/ou da disponibilidade dos recursos energéticos. Os Sistemas Fotovoltaicos podem ser divididos em duas categorias principais: SFI (sistemas fotovoltaicos isolados) e SFCR (sistemas fotovoltaicos conectados à rede), onde, o SFI, seja ele puramente fotovoltaico ou híbrido necessita de algum tipo de armazenamento (Pinho e Galdino, 2014). Sendo assim, os SFI podem ser classificados como:

- **Sistemas Fotovoltaicos Domésticos Isolados ou Autônomos:** São sistemas que atendem as demandas de energia de comunidades isoladas que não estão conectadas à rede elétrica de serviços públicos. Eles fornecem energia para cargas de baixa potência como a iluminação (IEA, 2010).
- **Sistemas Fotovoltaicos não Domésticos Isolados:** Atendem as demandas de energia de comunidades isoladas sendo a geração compartilhada em um grupo limitado que estão geograficamente próximas umas das outras (Manrique, 2015) (Urbanetz Junior, 2010). Foram a primeira aplicação comercial para sistemas fotovoltaicos terrestres, fornecem energia para aplicações, como telecomunicações, bombeamento de água, refrigeração de vacinas e auxílios à navegação, nessas aplicações em que pequenas quantidades de eletricidade têm um valor alto, tornando os custos fotovoltaicos competitivos comercialmente com outras pequenas fontes geradoras (IEA 2010).

Os sistemas isolados são compostos por painel fotovoltaico, banco de baterias para o armazenamento e fornecimento da energia gerada nos períodos nos quais não há insolação, controlador de carga que é o aparelho eletrônico que faz o controle e monitoramento da carga e/ou descarga do banco de baterias e inversor responsável por converter a corrente contínua (CC), proveniente do painel fotovoltaico ou do banco de baterias, em corrente alternada (CA), utilizada para a alimentação de aparelhos elétricos e eletrônicos (Lamberts *et al.*, 2010).

No que diz respeito aos SFCR, esses podem ser subdivididos em:

- **Sistemas Fotovoltaicos Centralizados Conectados à Rede Elétrica:** Esse sistema funciona como uma central elétrica centralizada onde a energia fornecida não está associada a um consumidor. Funciona como uma usina geradora convencional sendo necessário transmitir a energia gerada até o consumidor final fazendo uso de linhas de transmissão para isso (Rüther *et al.*, 2005) (IEA, 2010) (Lamberts *et al.*, 2010).

- **Sistemas Fotovoltaicos Distribuídos Conectados à Rede Elétrica:** Nesse sistema o consumidor está conectado a rede convencional podendo assim utilizar a mesma para complementar a quantidade de energia demandada por sua edificação quando o sistema fotovoltaico não é suficiente quando há um aumento de consumo, nesse caso, ou ainda vender a concessionária a energia excedente gerada pelo SF caso a energia gerada não seja totalmente consumida. Nesses casos 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 (ABNT, 2005) (Rüther, 2004) (IEA, 2010).

Diferente dos sistemas isolados, os sistemas conectados a rede não necessitam banco de baterias, ou seja, acumuladores de energia, pois a energia gerada por esses sistemas são consumidas diretamente pelos consumidores, ou introduzida diretamente na rede convencional (Pinho e Galdino, 2014).

Os sistemas fotovoltaicos híbridos incluem uma fonte de energia auxiliar para complementar e auxiliar a principal fonte de energia (fotovoltaica). A fonte auxiliar pode ser baseada em energia renovável, como geradores eólicos e mini-hidrelétricos, ou pode se baseada em uma fonte não renovável como é o caso de um gerador baseado em combustíveis fósseis como diesel, gasolina e gás. Geralmente, esse tipo de sistema inclui baterias para responder a possíveis e curtos períodos de baixa irradiação (Aguilera *et. al.*, 2011).

2.5. Principais Componentes de Sistemas Fotovoltaicos

Um sistema de geração fotovoltaica básico é constituído por módulos fotovoltaicos e inversores.

2.5.1. Módulos fotovoltaicos

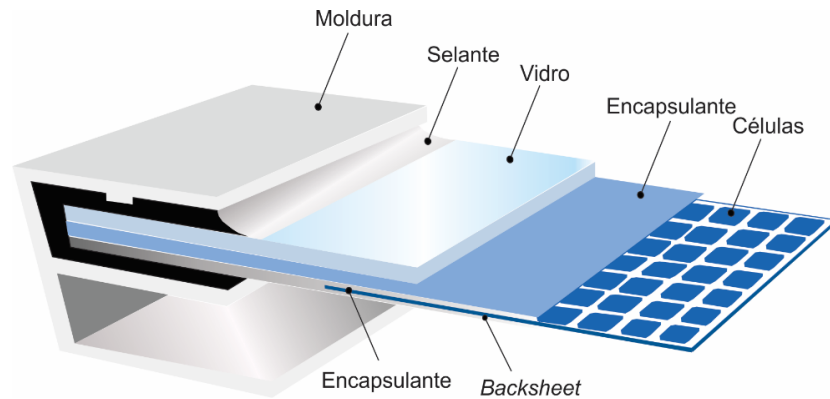
O módulo fotovoltaico é o conjunto de células ligadas em série. As células solares convertem de forma direta a energia do sol em energia elétrica, é componente essencial para a geração fotovoltaica, porém, como a célula sozinha tem baixa tensão e baixa corrente de saída são utilizadas em conjunto, interligadas eletricamente sendo necessárias 36, 60 e 72 células, ligadas em série para formar o módulo de modo a fornecer uma saída única de tensão e corrente (Pinho e Galdino, 2014) (Rüther, 2004).

Quando um módulo é exposto à radiação solar apresenta em seus terminais uma tensão contínua. Os valores de tensão, corrente e potência são especificados pelo fabricante e são medidos sob determinadas condições, denominadas “condições padrão de referência para ensaio”, sendo que a potência normalmente especificada em CC (corrente contínua) é dada pela soma da potência nominal dos módulos individuais (ABNT 15, 2006 apud LAMBERTS *et al.*, 2010 p.50) (Rüther, 2004).

Módulos fotovoltaicos são projetados para operar entre 25 e 30 anos de modo satisfatório sob influências climáticas diversas, sendo essas, sol, chuva, neve, granizo, vento, entre outros. Para isso, um módulo fotovoltaico é constituído por diversas camadas que proporciona suporte estrutural e proteção contra danos mecânicos e os agentes ambientais (Tolmasquim, 2016) (Zilles *et al.*, 2012) (Rüther, 2004), tais como:

- **Moldura de Alumínio:** Parte estruturante do módulo adiciona robustez e garante que o mesmo permaneça íntegro independente da circunstância;
- **Selante:** Impede a entrada de gases e umidade e protege o interior da placa solar de vibrações e choques mecânicos;
- **Vidro:** O vidro para essa fabricação é ultrapuro, com baixo teor de ferro, revestido com uma camada antirreflexiva e age protegendo as células e condutores do ambiente;
- **Encapsulante:** 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;
- **Backsheet:** Está situado na parte de trás do módulo, protegendo a célula fotovoltaica de componentes externos e agindo como um isolante térmico.

Figura 2.7: Camadas de um módulo fotovoltaico.



Fonte: (Tolmasquim, 2016).

2.5.2. Inversores

Os inversores têm como principal função transformar corrente contínua em corrente alternada, pois, os módulos solares fotovoltaicos geram energia elétrica em corrente contínua e a rede elétrica pública está em corrente alternada. (Torres, 2012)

Além disso, outras funções do inversor em SFCR (Sistema Fotovoltaicos Conectados a Rede) são rastreamento do ponto máximo de potência (MPPT), onde o sistema é capaz de fazer ajustes para manter os módulos fotovoltaicos operando perto do seu ponto de maior potência, que varia de acordo com a radiação solar incidente, desconexão e isolamento, no caso de os níveis de corrente, tensão e frequência não estarem dentro da faixa aceitável dos padrões da rede elétrica ou também do lado CC, o inversor deve desconectar o arranjo fotovoltaico da rede. O mesmo vale para quando a rede não estiver energizada, ou seja, o inversor deve isolar o gerador fotovoltaico da rede com o objetivo de evitar acidentes com operadores (Pereira e Gonçalves, 2008).

Os inversores podem ser classificados em dois tipos (Torres, 2012):

- Comutados pela rede elétrica, onde o sinal da rede é utilizado para sincronizar o inversor com a rede;
- Auto-comutados, onde um circuito eletrônico no inversor controla e sincroniza o sinal.

Para SFCR os inversores podem ser classificados como (Tolmasquim, 2016) (Pinho e Galdino, 2014):

- Inversores Centrais: 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;
- Microinversores: Tem a finalidade de atender módulos fotovoltaicos individualmente, potencializando a produção de cada um.
- *String*: Mais utilizados em instalações de microgeração, são inversores monofásicos compatíveis apenas com instalações de microgeração de até 10 kWp
- *Multistring*: Podem ser monofásicos ou trifásicos, 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.

Por serem equipamentos pequenos e silenciosos, a instalação pode ser feita na parte interna da edificação, ou podem ser instalados junto aos módulos fotovoltaicos, na estrutura do suporte. (Lisita Júnior, 2005), nesse ultimo caso, deve-se considerar que as condições externas podem interferir na vida útil do equipamento ou mesmo ocorrer a probabilidade de falhas, mesmo cumprindo o grau de proteção IP 6518. (IST; DGS; UE, 2004) (Torres, 2012).

3. MODELAGEM MATEMÁTICA.

Esse trabalho usará a metodologia descrita em (Souza, 2016) para dimensionar um sistema fotovoltaico capaz de suprir a demanda energética de arquiteturas em um cenário 5G. Sendo assim, este capítulo apresenta um detalhamento dos modelos matemático das arquiteturas de redes móveis, usados para avaliar o consumo energético das mesmas, apresentado em (Fiorani, 2016a) e o modelo matemático para o dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos.

3.1. Demanda de Tráfego

O trabalho utiliza 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, 2016b), a demanda média de tráfego móvel [Mbps/km²] pode ser obtida conforme a Eq. (1):

Esse comportamento da demanda de tráfego tende a manter-se crescente ao longo do tempo/anos, desse modo, é necessário obter uma previsão da mesma para o período em análise de acordo com o cenário utilizado, pois, o tráfego influencia a arquitetura e o consumo de energia da mesma.

Ao prever a demanda de tráfego, a primeira etapa é definir o tipo de cenário entre os setores urbanos, suburbanos e rurais. Neste caso, um modelo foi desenvolvido para o cenário urbano. As principais entradas são: área, população, número de assinantes de telefonia móvel, os tipos de usuários, (ou seja, definido como intenso ou ordinário), e a taxa de penetração dos diferentes dispositivos, nesse caso, tablets, smartphones e laptops (Farias, 2016).

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

onde ρ é a densidade populacional na área analisada, α porcentagem de usuários ativos, k é o tipo de terminal utilizado, nesse caso serão usados três tipos de terminais tablet, PC e smartphone, r_k é a taxa de dados média e s_k é a fração de assinantes que utilizam certo tipo k de terminal.

Em média, presume-se que um usuário de PC vai gerar duas e oito vezes mais tráfego de dados do que um tablet e um usuário do smartphone, respectivamente, no que diz respeito aos tipos de usuários, as necessidades de capacidade de um usuário comum são 1/8 dos de um usuário pesado (Auer *et al.*, 2010). Então, a taxa média diária de procura de dados para o terminal k [Mbps] pode ser definida como:

$$r_k = \frac{[hr_k^{pesado} + (100 - h)r_k^{comum}]}{45000} \quad (2)$$

onde h é a porcentagem de assinantes que são classificados como usuário pesados, r_k^{pesado} [MB / hora] é a taxa de dados média de um usuário pesado por hora e r_k^{comum} [MB / hora] é a taxa de dados média de um usuário comum por hora.

O número de estações base macro pode ser calculado pela equação:

$$N_{macro} = \frac{\rho A (1 - \eta) \alpha}{N_{ativo / macro}} \quad (3)$$

Onde A é a área e é dado em [km²], $N_{ativo / macro}$ é o número de usuários ativos que podem ser servidos por uma macro BS dado por:

$$N_{ativo / macro} = \frac{C_{macro}}{\bar{r}} \quad (4)$$

Em que C_{macro} é a capacidade máxima de transmissão de uma macro BS e $\bar{r}$ é o requisito de taxa de dados média por usuário ativo.

3.2. Modelos de Consumo de Energia

O consumo total de energia de uma determinada arquitetura, seja DRAN ou CRAN, é a soma da energia consumida no rádio e na rede de transporte. De forma análoga a (Fiorani, 2016a) o consumo das arquiteturas seguem abaixo.

3.2.1 Rede de Rádio

Para avaliar o consumo de energia de uma BS LTE de referência, usamos o modelo de potência EARTH. No modelo, o consumo total de energia de uma BS, quando ativa, é dividido em duas partes: consumo de energia inativa, ou seja, a energia consumida pela BS quando não há transmissão ($P_{tx} = 0$) e consumo de energia dependente da carga de tráfego.

O consumo de energia de uma BS LTE é expresso como:

$$P_{BS}^{LTE} = N_{TRX} \times \begin{cases} \Delta_p P_{tx} + P_0 & \text{if } P_{tx} > 0 \\ \delta P_0 & \text{if } P_{tx} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

onde P_{tx} , N_{TRX} e Δ_p são respectivamente, a potência de transmissão, número de transceptores, porção do consumo de energia dependente da potência de transmissão devido a perdas no alimentador e amplificador de potência e P_0 é o consumo de energia devido ao resfriamento do local ativo e ao processamento do sinal.

O modelo apresentado na Eq. (6) é válido para a arquitetura distribuída (A1) apresentada, assim, o consumo total de energia de uma rede LTE com certo número de BSs (N_{BS}) em A1 será dado por:

$$P_{tot}^{A1} = N_{BS} \times P_{BS}^{LTE} \quad (6)$$

Para a arquitetura centralizada (A2), C-RAN, o consumo de energia foi modelado considerando ganho de empilhamento, ganho de *pooling* e ganho de resfriamento. As economias através do empilhamento são modeladas com um número reduzido de BBUs no hotel BBU, considerando a taxa de superdimensionamento que é normalmente empregada na arquitetura convencional (A1) denotada como $\zeta = \frac{C_{BBU}}{C_{A1}}$, onde C_{BBU} e C_{A1} representam a capacidade de banda base e requisito de capacidade de uma BS em A1, respectivamente.

Considerando o fato de que o consumo de BBU vale $\theta\%$ do consumo do site, ou seja, $P_{BBU} = P_{BS}^{LTE} \times \theta / 100$ em A1, o consumo de energia do site e o hotel BBU para A2 serão dados como:

$$P_{BS}^{A2} = P_{BS}^{LTE} \times (1 - \theta / 100) \quad (7a)$$

$$P_{BBUHotel}^{A2} = \left[\frac{N_{BS}}{\zeta} \right] \times P_{BBU} \quad (7b)$$

Então, considerando apenas o ganho de empilhamento, o consumo de energia de A2 é dado por:

$$P_{tot}^{A2} = N_{BS} \times P_{BS}^{A2} + P_{BBUHotel}^{A2} \quad (8)$$

O uso de BBUs centralizadas mais poderosas e eficientes em A2 para reduzir ainda mais o consumo total de energia do hotel da BBU, é chamado de *pooling*. Isso também otimizará o uso da BBU alocando dinamicamente os recursos da BBU para um número muito maior de BSs considerando as variações de carga na rede.

Para essa modelagem, consideram-se novas BBUs com capacidade τ vezes maior, ou seja, $C_{BBU}^{new} = \tau \times C_{BBU}$ e ξ vezes mais consumo de energia, ou seja, $P_{BBU}^{new} = \xi \times P_{BBU}$. Sob estas suposições, enquanto o consumo de energia do site permanece o mesmo (P_{BS}^{A2}), o consumo de energia do hotel BBU será significativamente reduzido, o que pode ser expresso como:

$$P_{BBUHotel}^{A2} = \left[\frac{N_{BS}}{\tau \times \zeta} \right] \times P_{BBU}^{new} \quad (9)$$

A economia de resfriamento se deve ao fato de que o hotel BBU incorporando várias BBUs será resfriado por um sistema com maior eficiência no uso de energia, não haverá um resfriamento para cada BS e sim um centralizado para o hotel BBU onde essas já tem uma maior eficiência.

Com a hipótese de que o resfriamento representa $\phi\%$ do consumo do site e o hotel da BBU utiliza ρ de resfriamento mais eficiente, o consumo de energia do site e do hotel da BBU para A2 será:

$$P_{BS}^{A2} = P_{BS}^{LTE} \times (1 - (\phi + \theta) / 100) \quad (10a)$$

$$P_{BBUHotel}^{A2} = \left[\frac{N_{BS}}{\tau \times \zeta} \right] \times P_{BBU}^{new} + P_{cooling} \quad (10b)$$

Com

$$P_{cooling} = (N_{BS} \times P_{BS}^{LTE} \times \phi / 100) / \rho \quad (11)$$

Então o consumo total será:

$$P_{tot}^{A2} = N_{BS} \times P_{BS}^{A2} \times P_{BBUHotel}^{A2} \quad (12)$$

3.2.2 Rede Ótica de Transporte

Como já mostrado neste trabalho, assumimos uma arquitetura de rede de transporte baseada na interconexão de anéis ópticos DWDM análogo a (Fiorani, 2016a).

O consumo de energia da rede de transporte é obtido adicionando os valores da energia consumida por cada componente ativo nas bordas de acesso (EAs), MNs e na borda ME. Em termos de equipamento de transmissão, considerou-se duas opções de hardware, o primeiro refere-se a *transceivers* DWDM conectáveis que podem ser instalados diretamente no rádio (por exemplo, BBU e RRU) e / ou no equipamento de comutação. A segunda opção refere-se a *transponders* DWDM externos que requerem uma interface óptica adicional para serem montados no equipamento onde estão instalados.

Em termos de equipamentos de comutação a serem usados em cada MN, também se considerou duas opções, o primeiro é baseado em comutação óptica, nesse caso, o consumo de energia nos MNs deriva dos WSSs usados para interconectar anéis de acesso e metro. A segunda opção é baseada na comutação de pacotes, neste caso, o consumo de energia nos MNs deriva dos *switches Ethernet* e dos *transceivers/transponders* necessários para transmitir e receber os sinais óticos.

No caso de comutação óptica (OS) e *transceivers* conectáveis (P), o consumo total de energia da rede de transporte de ambas as arquiteturas pode ser obtido usando a seguinte fórmula:

$$P^{OS;P} = \left[\frac{C}{R_{tr}} \right] \cdot N_{BS} \cdot \left(2 \cdot P_{tr} + \frac{P_w}{N_w} \right) \quad (13)$$

onde C é o requisito de capacidade de transporte de uma BS nas arquiteturas já definido anteriormente, R_{tr} é a taxa de transmissão dos *transceivers* nos EAs e no ME, P_{tr} é o consumo de energia de uma *transceiver* operando a taxa R_{tr} , N_{BS} é o número de BSs na rede de rádio, P_w é o consumo de energia de uma porta WSS e N_w é o número de comprimentos de onda por fibra.

Para comutação óptica (OS) e *transponders* externos (E) o consumo total de energia da rede de transporte na arquitetura é dado por:

$$P^{OS;E} = \left[\frac{C}{R_{tp}} \right] \cdot N_{BS} \cdot \left(2 \cdot (P_{tp} + P_{gr}) + \frac{P_w}{N_w} \right) \quad (14)$$

onde R_{tp} é a taxa de transmissão dos *transponders* utilizados nos EAs e no ME, e P_{tp} e P_{gr} são o consumo de energia de um *transponder* e de uma interface óptica adicional operando na taxa R_{tp} .

No caso de comutação de pacotes (PS) e *transceptores* conectáveis (P) é dado por:

$$P^{PS;P} = \left[\frac{C}{R_{tr}^A} \right] \cdot N_{BS} \cdot (2 \cdot P_{tr}^A + P_s^A) + \max \left(M_{MN}, \left[\frac{C}{R_{tr}^M} \cdot N_{BS} \right] \right) \cdot (P_s^M + 2 \cdot P_{tr}^M) \quad (15)$$

onde R_{tr}^A é a taxa dos transceptores usados nos acessos, P_{tr}^A é o consumo de energia de um transceptor operando na taxa R_{tr}^A , P_s^A é o consumo de energia de uma porta de switch Ethernet operando na taxa R_{tr}^A , M_{MN} é o número de MNs no transporte de rede, R_{tr}^M é a taxa dos transceptores usados no anel de metro, e P_{tr}^M e P_s^M são os valores de consumo de energia de um transceptor e de uma porta de comutador Ethernet, ambos operando na taxa R_{tr}^M .

E para comutação de pacotes (PS) e *transponders* externos (E) pode ser calculado usando:

$$P^{PS;E} = \left[\frac{C}{R_{tp}^A} \right] \cdot N_{BS} \cdot (2 \cdot (P_{tp}^A + P_{gr}^A) + P_s^A) + \max \left(M_{MN}, \left[\frac{C}{R_{tr}^M} \cdot N_{BS} \right] \right) \cdot (P_s^M + 2 \cdot (P_{tr}^M + P_{gr}^M)) \quad (16)$$

onde P_{gr}^A e P_{gr}^M são o consumo de energia de uma interface adicional operando na taxa R_p^A e R_p^M , respectivamente.

3.3 Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico

O dimensionamento de um sistema fotovoltaico é a adequação da energia radiante recebida do sol pelos módulos fotovoltaicos e a necessidade de suprir certa demanda de energia elétrica (Pinho e Galdino, 2014). Ele engloba desde avaliar o consumo total de energia requerido pelo sistema até dimensionar o TCO_{FV} (custo total de propriedade do sistema fotovoltaico), nesse caso, conectado à rede urbana e assim como em (Souza, 2016) está dividido em 05 (cinco) fases, que estão especificadas a seguir.

3.3.1 Levantamento do Recurso Solar

A primeira fase para o dimensionamento de um sistema fotovoltaico é avaliar do potencial energético solar do local do projeto, ou seja, busca quantificar a radiação solar global incidente sobre o painel fotovoltaico (Pinho e Galdino, 2014).

De acordo com as coordenadas geográficas (latitude e longitude) da região onde o projeto será instalado deve-se consultar fontes de dados solarimétricos disponíveis como:

- Estações Automáticas do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia)
- Estações Solarimétricas do SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais).
- Programa SunData para cálculo de irradiação solar diária mensal do CEPEL (Centro de Pesquisa de Energia Elétrica).
- Dados de satélite meteorológicos do site SWERA (Solar and Wind Energy Resource Assessment).
- Atlas Brasileiro de Energia Solar–2006, publicado pelo INPE.
- Programa Radiasol –Laboratório de Energia Solar –UFRGS.

Pois, 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 (Souza, 2016).

3.3.2 Escolha da Aplicação Fotovoltaica

Essa fase define quais tecnologias fotovoltaicas melhor se adequam ao cenário de utilização é considerado o tipo de sistema que será utilizado, sistemas isolados ou conectados

à rede, se há necessidade ou não de armazenamento, a disponibilidade dos recursos energéticos, o custos de aquisição, operação e manutenção, área de instalação, dimensão do sistema, entre outros parâmetros. Basicamente, a escolha baseia-se nas características da carga e na disponibilidade de recursos energéticos (Souza, 2016) (Pinho e Galdino, 2014).

Todas as características influenciam diretamente no custo total de propriedade do sistema fotovoltaico, nesse caso, a preferência de não utilizar armazenamento de energia elétrica pode ser vantajoso dado os consideráveis preços de baterias estacionárias, ou tecnologias similares, que variam conforme a capacidade de armazenamento a ser instalada (Souza, 2016).

3.3.3 Levantamento Adequado de Demanda e Consumo de Energia Elétrica

Após obter a demanda energética das arquiteturas de redes móveis consideradas neste trabalho, é possível estimar o consumo médio diário e a partir dele, pode-se calcular quanto cada arquitetura requer de energia para seu funcionamento.

Supondo que os equipamentos estarão em regime de funcionamento 24h por dia como na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 Exemplo de cálculo para três tipos de equipamentos.

Carga	Potência (W)	Horas de utilização por dia	Consumo Médio Diário (KWh)
Equipamento1	15	24	0,36
Equipamento 2	60	24	1,44
Equipamento 3	10	24	2,4

O resultado da diferença entre o consumo de energia elétrica total de uma arquitetura (Con_{Total}) e o consumo mínimo franqueado de energia proveniente da concessionária de energia elétrica é a energia mínima necessária para o funcionamento de uma dada arquitetura (E_{Min}) e é dada conforme Eq. 17.

$$E_{Min} = Con_{Total} - (N_{Med} \cdot Con_{Grig}^{Min}) \quad (17)$$

Onde N_{Med} e Con_{Grig}^{Min} representam o número de medidores de energia elétrica utilizados em uma dada arquitetura e o consumo diário mínimo franqueado 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 ($N_{Inv} = N_{Med}$).

3.3.4 Geração de Energia Fotovoltaica

A geração total de energia elétrica do sistema fotovoltaico (E_{gen}) é a energia necessária para atender para tender a demanda energética da arquitetura de rede fazendo uso do consumo mínimo requerido pelas concessionárias. Pode ser expressa pela Eq. (18)

$$E_{gen} = N_{Inv} \cdot E_{Inv} \quad (18)$$

Onde N_{Inv} representa o número de inversores necessários para alimentar uma dada arquitetura e pode ser calculado através da Eq. 19.

$$N_{Inv} = \left\lceil \frac{Con_{Total}}{E_{Inv}} \right\rceil \quad (19)$$

Onde E_{Inv} é o volume de energia gerado diariamente por um inversor e é expresso pela Eq. (20):

$$E_{Inv} = \eta_{Inv} N_{Inv}^P E_P \quad (20)$$

onde η é 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. (21).

$$N_{Inv}^P = \left\lceil \frac{P_{Inv}^{Input} t_{solar}}{E_P} \right\rceil \quad (21)$$

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. (22):

$$E_P = A_P \eta_P r_s tx_{loss} \quad (22)$$

onde A_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 tx_{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].

3.3.5 Custo Total de Propriedade

Nesta fase é feita a análise do TCO_{FV} associado à adoção de um sistema fotovoltaico no cenário de redes móveis. O TCO_{FV} é dado pela soma do custo de aquisição do sistema e do custo de manutenção e operação do sistema, expresso pela Eq. (23).

$$TCO_{FV} = CAPEX_{FV} + OPEX_{FV} \quad (23)$$

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, 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.

3.3.5.1 CAPEX: Custo dos Equipamentos e Instalação

O $CAPEX_{FV}$ se refere aos custos de aquisição e instalação de equipamentos, tais como módulos, inversores e Kits de Instalação. Os custos associados ao processo de instalação dos equipamentos são calculados com base no montante financeiro associado à aquisição dos mesmos (Souza, 2016).

Assim, o $CAPEX_{FV}$ pode ser descrito pela Eq. (24).

$$CAPEX_{FV} = (1 + tx_{install}) C_{equip} \quad (24)$$

onde $tx_{install}$ e C_{equip} representam a taxa de instalação e custo inicial de aquisição dos equipamentos fotovoltaicos, respectivamente esse ultimo pode ser calculado conforme a Eq. (25):

$$C_{equip} = \sigma [N_p (C_p^{Unit} + C_{Kit}^{Unit}) + N_{Inv} C_{Inv}^{Unit}] \quad (25)$$

onde N_p representa o número de painéis fotovoltaicos 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 é a taxa de depreciação do custo de equipamentos e varia no intervalo de [0,6;1], pois, toda tecnologia acaba sofrendo essa depreciação e barateamento do processo seja por evolução tecnológica ou mesmo popularização da mesma.

3.3.5.2 OPEX: Custo de Operação e Manutenção

O $OPEX_{FV}$ geralmente acontece de forma anual, sendo essa as despesas de operação e manutenção da estrutura fotovoltaica. 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 (Souza, 2016).

Assim, pode ser descrito pela Eq. (26).

$$OPEX_{FV} = C_M + N_{Med} (C_{Med} + Con_{Grid}^{Min} C_{purchass}^{kWh}) + N_p A_p C_{m2}^{rent} \quad (26)$$

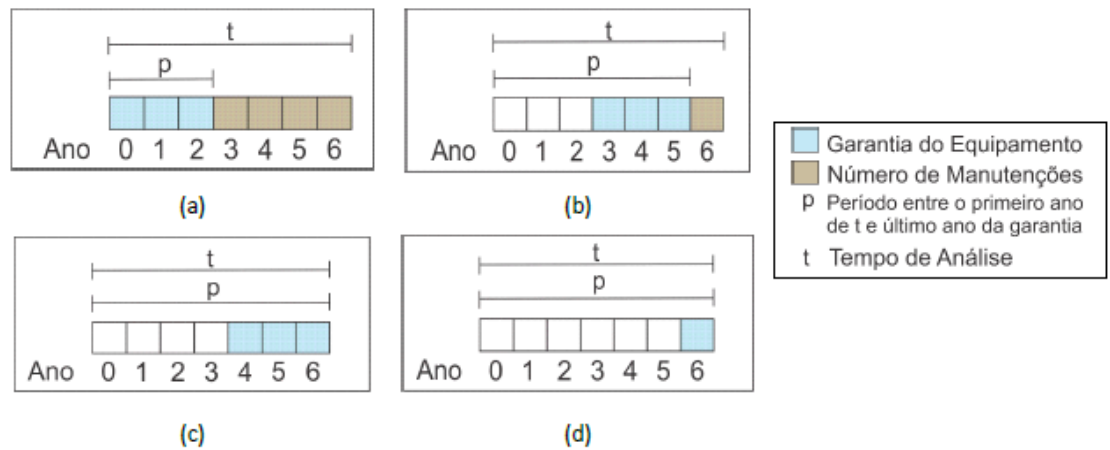
onde C_M , N_{Med} , C_{Med} , Con_{Grid}^{Min} , $C_{purchass}^{kWh}$ e C_{m2}^{rent} representam, respectivamente, o custo de manutenção da estrutura fotovoltaica, o número de medidores bidirecionais, o custo de instalação de cada medidor, o consumo mínimo de energia da rede convencional de energia 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. 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. (27).

$$C_M = tx_M [N_p (C_p^{Unit} N_{MP} + C_{Kit}^{Unit} N_{MK}) + N_{Inv} C_{Inv}^{Unit} N_{MI}] \quad (27)$$

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. 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.

A forma de calcular a quantidade de manutenções aos quais os kits e inversores estarão sujeitos está ilustrada pela Figura 3.1.

Figura 3.1: Cálculo do número de manutenções realizadas nos equipamentos do SF.



Fonte: (Souza, 2016)

De acordo com a Figura 3.1, a variável t representa o período de análise (anos), no qual será considerada a avaliação de viabilidade do uso dos equipamentos fotovoltaicos, t 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, 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.

Em compensação, 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.

3.3.6 Economia Monetária do Usuário

A economia monetária do usuário advém da energia elétrica gerada de forma excedente (E_{Extra}) pelo sistema fotovoltaico, a qual é vendida à concessionária (Souza, 2016).

Porém, para gerar-se economia financeira para o usuário final, é relevante considerar taxas de importação e exportação de energia da rede e para a rede elétrica convencional, onde a exportação ocorre do usuário para a concessionária e a importação ocorre da concessionária para o usuário.

Na tarifa de exportação de energia para a rede não há impostos a serem contabilizados, pois, não há transmissão, distribuição, encargos e tributos referentes ao fornecimento de energia ao consumidor. Porém, na tarifa de importação esses impostos são adicionados a conta final do usuário (Souza, 2016).

É importante ressaltar que cada país vem gerando suas próprias normas e prescrições, para a interligação de sistemas fotovoltaicos à rede, sendo assim necessário entendê-las ao fazer um projeto.

Desse modo, essa energia extra pode ser descrita como:

$$E_{Extra} = E_{gen} - E_{Min} \quad (28)$$

E a economia monetária do usuário (AS_{User}), incluindo as taxas necessárias, pode ser descrita conforme a Eq. (29):

$$AS_{User} = \frac{[E_{Extra} C_{sale}^{kWh} + Con_{Total} C_{purchase}^{kWh}] - CAPEX_{FV}}{\rho \cdot A} \quad (29)$$

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).

4. RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados da análise realizada sobre o Custo Total de Propriedade do Sistema Fotovoltaico em relação à adoção de um sistema fotovoltaico no cenário de rede 5G.

4.1 Estudo de Caso

Para o estudo de caso deste trabalho foi considerado um cenário urbano típico com uma área residencial de 100 (cem) km², com densidade populacional variável de 1.000 (mil) a 5.000 (cinco mil) usuários por km², são considerados 10.000 (dez mil) prédios residenciais uniformemente distribuídos.

É válido ressaltar que este trabalho utiliza interfaces de rádio LTE, pois, estas serão capazes de sustentar a alta intensidade do tráfego de dados que caracteriza um cenário 5G. Portanto, para a configuração da rede móvel, foi definido um sistema LTE de divisão de frequência (FDD - *Frequency Division Duplex*) LTE com uma estrutura MIMO 2 × 2, operando a 2,6 GHz, com largura de banda de 20 MHz. O sistema LTE é atendido por BS de três setores, a antena utilizada é uma macro padrão com inclinação elétrica e / ou mecânica e com ganho de 18 dBi (Fiorani, 2016a).

Como já discutido no capítulo 2, em termos de equipamento de transmissão, duas opções de hardware foram consideradas; o primeiro refere-se a transceptores DWDM conectáveis, que podem ser instalados no rack de equipamentos de rádio e / ou no equipamento de comutação. A segunda opção diz respeito a transponders DWDM externos, que exigem que uma interface óptica adicional seja instalada no equipamento em que estão instalados. E em relação aos equipamentos de comutação a serem utilizados em cada MN, também foram consideradas duas opções: a primeira, baseada na comutação óptica; e o segundo, baseado na comutação de pacotes.

Este trabalho considera um período de análise de 10 anos sob o período de 2020 até 2030, onde as implantações das estruturas fotovoltaicas são analisadas considerando um perfil de consumo de energia crescente de acordo com o aumento da demanda de tráfego de dados esperado para os próximos anos nas redes móveis.

No cenário proposto, é adotado o perfil de geração urbana distribuída, no qual o sistema fotovoltaico conectado à rede pública deve ser aplicado no edifício, considerando os telhados dos edifícios como o local de instalação dos painéis fotovoltaicos. Além disso, é importante destacar que os experimentos utilizaram um incidente de irradiação solar no plano

horizontal (0° N), pois proporcionam um cenário menos favorável de captura de radiação solar, tornando a avaliação do TCO_{FV} mais relevante.

Os dados de consumo foram obtidos através da reprodução dos modelos matemáticos propostos em (Fiorani, 2016a) e apresentados no capítulo 2 deste trabalho. Os parâmetros utilizados para estimar a demanda energética da arquitetura de rede móvel podem ser encontrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Parâmetros do Consumo Energético. Fonte: (Fiorani, 2016a).

Parâmetros	Valores
Consumo de energia (P_0)	130 W
Fator Sleep (δ)	0.84
Taxa de consumo da BBU e refrigeração (θ e ρ)	15% e 10%
Parâmetros novos da BBU (τ e ξ)	5 e 2
Melhor eficiência de refrigeração (ϕ)	2
Transceiver 1G SFP	1.0 W
Transceiver 10G SFP	2.0 W
Transponder (Co) externo 100G CFP	70.0 W
Interface cinza 100G QSFP28	3.5 W
QSFP28 (DD) plugável	4.5 W
Porta WSS	2.2 W
Porta switch ethernet 1G	1.0 W
Porta switch ethernet 10G	4.2 W
Porta switch ethernet 100G	14.0 W
Capacidade da BS para arquitetura distribuída	$C_{A1} = 1.0$ [Gbps]
Capacidade da BS para arquitetura centralizada	$C_{A2} = 7.4$ [Gbps]

Para o estudo de dimensionamento e viabilidade do sistema fotovoltaico, foram considerados os seguintes parâmetros:

- Dados do painel fotovoltaico: possui eficiência energética de 17,2%, com perda anual de energia de 0,5%. Sua infraestrutura física possui uma área de 1,96 m², com uma vida útil de 25 anos e 10 anos de garantia em defeitos de fabricação. Quando usado em condições ideais de insolação, produz 335W, 8.89A e 37.7V em corrente contínua. O custo unitário é parametrizado no valor de R \$ 635,00;

- Dados do inversor: a potência nominal de saída é de 60 kW, possui 97,7% de eficiência, 05 anos de garantia conforme especificações do fabricante e o custo unitário estimado é de R \$ 7.509,18;

- Dados do kit de instalação do painel fotovoltaico: Possui garantia de 12 anos para defeitos. O custo de aquisição associado é de R \$ 204,72 por painel fotovoltaico instalado.

Para o cálculo do TCO_{FV} , também consideramos: o custo de instalação do equipamento fotovoltaico, incluindo projeto de mão de obra e engenharia equivalente a 20% do valor inicial do produto; irradiação solar, variação entre 2,5 e 7,5 kWh / m².dia; e média anual de insolação diária, de 3 a 10 horas / dia, de acordo com (Tiba, 2000) (Pereira, 2006). Semelhante a (Farias, 2016), considerou-se que o custo de aquisição de equipamento fotovoltaico está sujeito a uma depreciação anual fixa de 5%, limitada a 60% do valor original dos produtos, o que simula um barateamento no preço dos equipamentos em função de avanços tecnológicos e popularização de instalações do sistema levando em consideração o crescimento que o mercado fotovoltaico teve e continua tendo. Com relação à importação de eletricidade em KWh, a tarifa tem um custo de R\$ 0,64, considerando os impostos existentes no país (ICMS, PIS / PASEP e COFINS), sem considerar outras contribuições financeiras impostas pelo Estado e pelas concessionárias. Para exportação, a tarifa utilizada foi de R\$ 0,564. Outros parâmetros considerados para o cálculo do TCO_{FV} foram: a taxa de instalação do medidor bidirecional, equivalente a R\$ 300,00, pois essa taxa é cobrada pelas concessionárias; e também o custo do aluguel da área ocupada por painéis fotovoltaicos nos telhados dos edifícios, sob o preço anual de R\$ 53,98 / m².

O trabalho utiliza cinco configurações diferentes, denominadas, nesse trabalho, A, B, C, D e E.

- Configuração A: Arquitetura distribuída utilizando comutação óptica e transceptores conectáveis;
- Configuração B: Arquitetura distribuída utilizando comutação de pacotes e transceptores conectáveis;
- Configuração C: Arquitetura centralizada utilizando comutação óptica e transceptores conectáveis;
- Configuração D: Arquitetura centralizada utilizando comutação de pacote e transponders externos;

- Configuração E: Arquitetura centralizada utilizando comutação de pacotes e transceptores conectáveis.

A Tabela 4.2 mostra todos os parâmetros utilizados neste estudo de caso para o dimensionamento fotovoltaico.

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

Equipamento	Valor	Referência
Potência Nominal do Inversor	60 kW	Número do Modelo: Ongrid 60 k BG60KTR UM Marca: Invt
Tempo de Garantia do Inversor	05 Anos	
Eficiência do Inversor	97,7%	
Custo Unitário do Inversor	R\$ 7.509,18	
Tempo de Garantia do Pannel Fotovoltaico	10 Anos	(Neosolar Energia)
Área do Pannel	1,96 m ²	
Eficiência do Pannel	17,2%	
Taxa de Perda de Desempenho do Pannel Fotovoltaico	0,5%	
Custo Unitário do Pannel	R\$ 635,00	
Tempo de Garantia dos Kits de Instalação	12 anos	(Neosolar Energia)
Preço Unitário do Kit de Instalação	R\$ 204,72	
Irradiação Solar	2,5 a 7,5 kWh/m ² . dia	(Tiba, 2000)
Duração Solar Média	3 a 10 horas/dias	(Pereira <i>et al.</i> , 2006)
Consumo mínimo da Rede de energia Elétrica por Medidor	100 kWh a.a.	(ANEEL)
Custo de Compra do kWh	R\$ 0,564/kWh	(ANEEL)
Custo de Custo de Venda do kWh	R\$ 0,64/kWh	(Nakabayashi, 2014)
Custo do Aluguel do Telhado/m ²	R \$ 53,98 a.a/ m ²	(FIPE)
Custo de Instalação do Medidor Bidirecional	R\$ 300,00	(Nakabayashi, 2014)
Taxa de Instalação de Equipamentos	20%	(Roy <i>et al.</i> , 2012) (Fu <i>et al.</i> , 2016)
Taxa de Depreciação do Preço de Compra dos Equipamentos Fotovoltaicos	5% a.a.	(Farias, 2016)
Taxa de Manutenção dos Equipamentos	1% a.a.	(Nakabayashi, 2014)

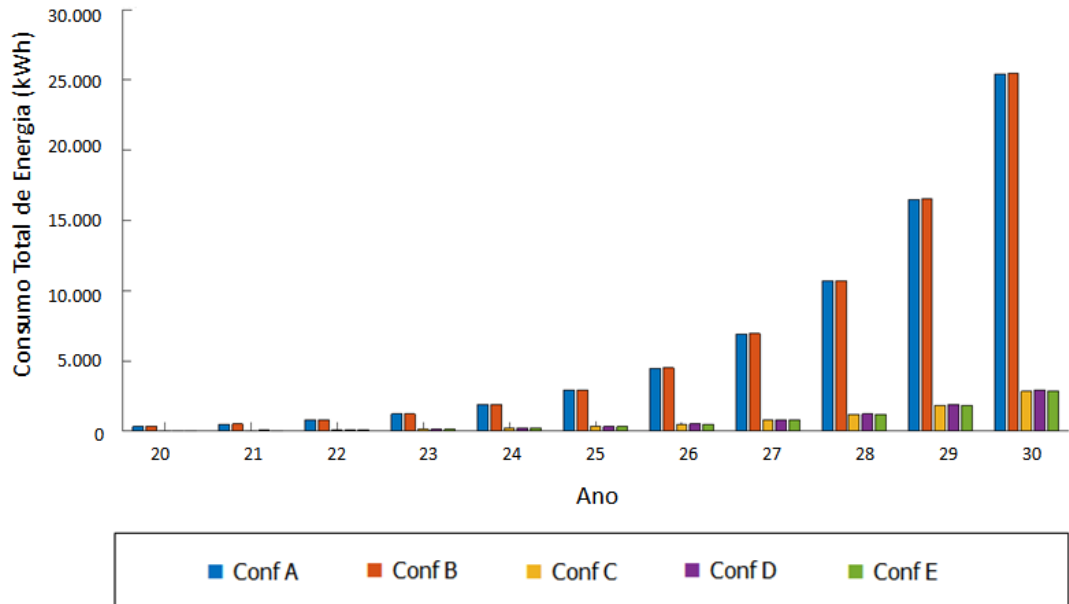
4.2 Resultados Obtidos

Essa seção apresenta a análise dos resultados baseado no caso de estudo apresentado

A partir das características apresentadas foi possível obter a projeção para o consumo energético em (kWh) esperado pelas arquiteturas de redes móveis apresentadas no referido trabalho as quais são apresentadas na Figura 4.1. Observa-se que todas as arquiteturas

possuem crescimento exponencial de consumo de energia elétrica variando em função das projeções de tráfego de dados móveis esperadas para os próximos anos.

Figura 4.1: Projeção de consumo energético das arquiteturas apresentadas.



Fonte: Elaborado pela autora.

Dentre as arquiteturas apresentadas, as arquiteturas centralizadas apresentam o menor consumo energético e as arquiteturas distribuídas apresenta maior consumo. Esse comportamento ocorre pelo fato de que as arquiteturas centralizadas possuem ganhos de empilhamento, ou seja, economia de energia devido à necessidade de menos BBUs para atender ao mesmo número de BSs, além de ganhos com a utilização de BBUs mais poderosas e eficientes em termos de energia e ganho de refrigeração com o compartilhamento de recursos, tornando-a mais eficiente quando comparada às arquiteturas distribuídas. É importante destacar que para este trabalho não foram considerados reajustes das tarifas de energia elétrica.

De acordo com o consumo energético das arquiteturas, a Tabela 4.3 apresenta os valores de custo monetário com energia elétrica proveniente da concessionária de energia para cada arquitetura, expresso em Reais (R\$), utilizado como referência para avaliação do sistema fotovoltaico.

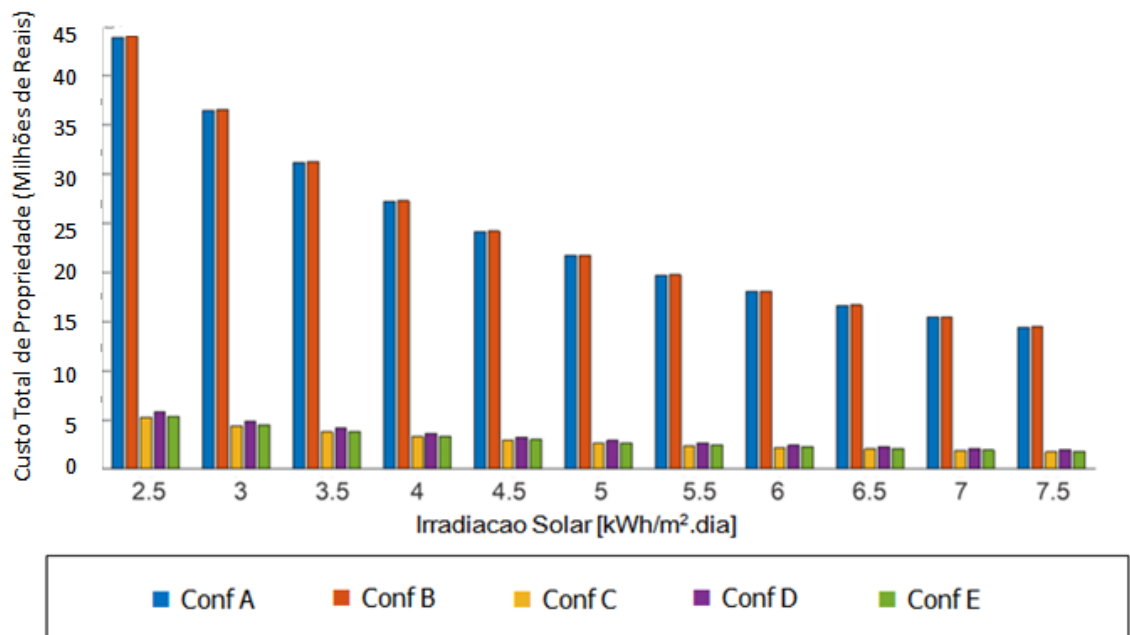
Tabela 4.3: Valores de referência para o custo associado ao consumo de energia a partir da concessionária. Fonte: Elaborada pela autora.

Arquitetura	Valor (Milhões de R\$)
Configuração A	67,4
Configuração B	67,6
Configuração C	8,32
Configuração D	9,15
Configuração E	7,27

Assim, para o sistema fotovoltaico ser considerado vantajoso é necessário que Custo Total de Propriedade seja inferior aos valores apresentados na Tabela 4.1, caso contrário, a utilização da energia elétrica proveniente da concessionária seria a opção mais vantajosa financeiramente.

A irradiação solar é um dos parâmetros mais relevantes para o estudo, pois demonstra a eficácia e a viabilidade do sistema para uma condição que varia de acordo com a localização. A Figura 4.2 mostra o custo total de propriedade do sistema fotovoltaico em função da irradiação solar. Utilizou-se a densidade de usuários, no valor de 3.000 usuários/km², e a duração solar média (t_{solar}) com valor de 6,0 horas.

Figura 4.2: TCO fotovoltaico em função da irradiação solar

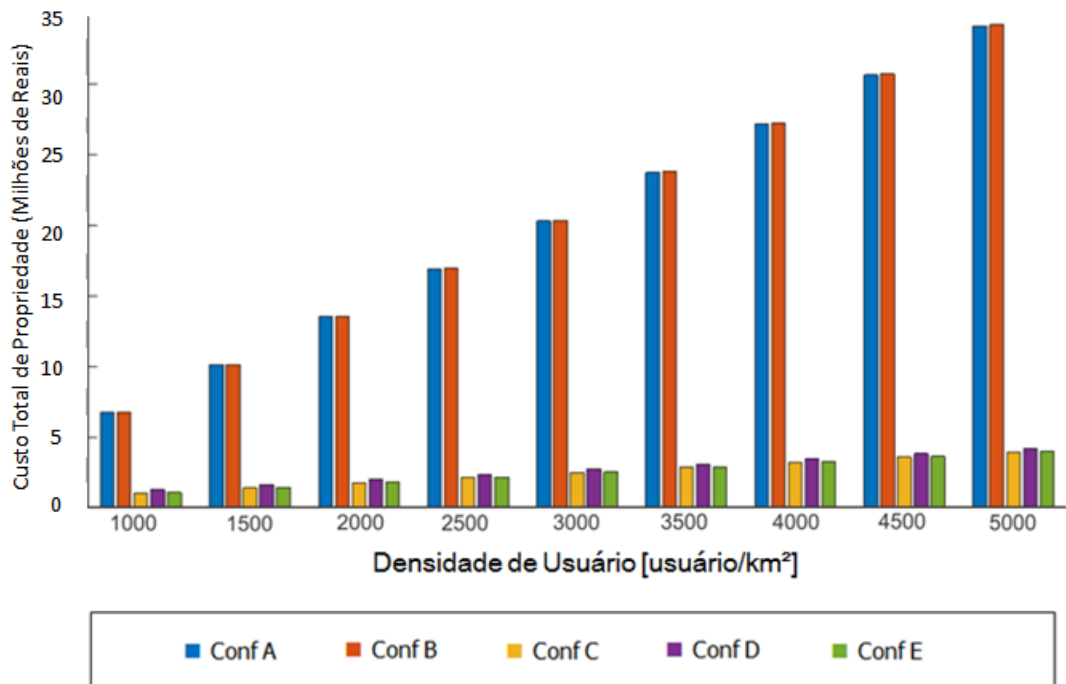


Fonte: Elaborado pela autora.

A partir da Figura 4.2, é evidenciado que as vantagens econômicas são maiores em locais com maior irradiação solar, pois há maior disponibilidade deste recurso. O custo para implantar um sistema fotovoltaico, na situação menos vantajosa, ou seja, onde a irradiação é de 2,5 kWh / m², varia de aproximadamente R \$ 5 milhões para configurações usando arquitetura centralizada a aproximadamente R \$ 45 milhões para configurações usando arquitetura distribuída, sendo esses custos inferiores ao custeio de energia elétrica que varia de 8,32 à 67,6 Milhões de Reais (R\$), conforme Tabela 4.1.

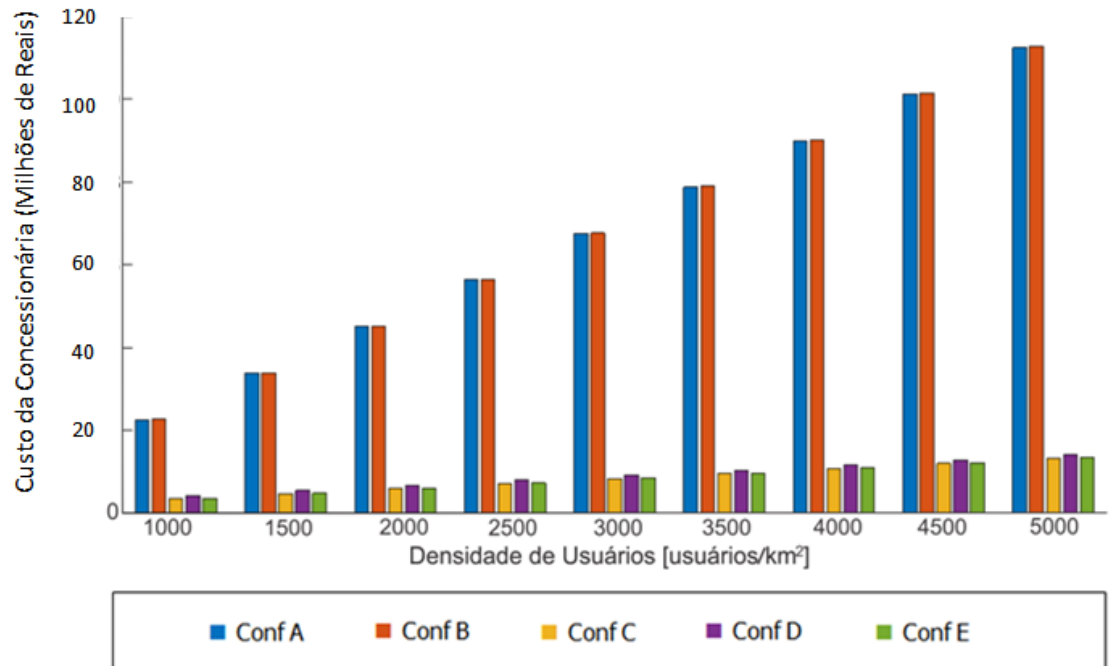
As Figuras 4.3 e 4.4 mostram, respectivamente, o TCO_{FV} e o custo das concessionárias de energia em função da densidade do usuário. Nesse caso, a medida que a densidade de usuários se amplia, aumenta também a quantidade de equipamentos necessários para atender à demanda de energia, o que afeta diretamente o custo de aquisição e operação do sistema. Por sua vez, com o aumento da densidade, demanda e consumo de energia, os custos das concessionárias também tendem a crescer.

Figura 4.3: TCO Fotovoltaico em Função da Densidade do Usuário



Fonte: Elaborada pelo autora.

Figura 4.4: Custo das Concessionária de Energia em Função da Densidade de Usuário



Fonte: Elaborada pelo autora.

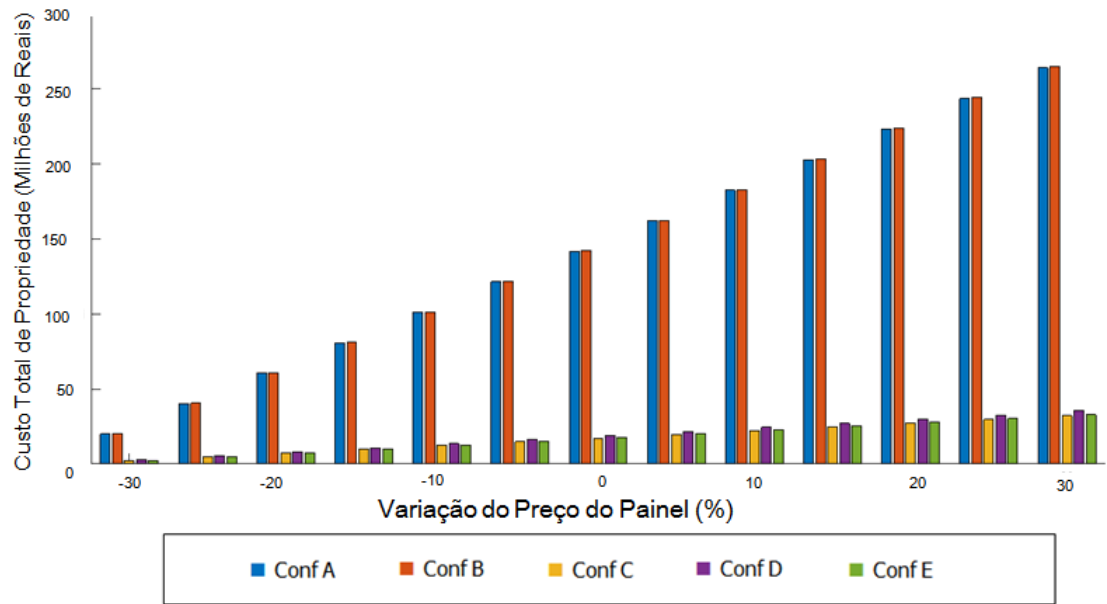
Quando comparados, os custos pelas concessionárias de energia é superior ao custo de instalação e operação do sistema fotovoltaico, o que significa que o sistema é eficiente em termos financeiros, além de ser uma energia não poluente. O gráfico 4.3 também mostra que o sistema fotovoltaico é vantajoso quando comparado aos valores de referência dado pela Tabela 4.1.

Uma análise de sensibilidade do Custo Total de Propriedade do Sistema Fotovoltaico também foi feita. O primeiro parâmetro avaliado foi o custo unitário do painel fotovoltaico, pois, este influencia diretamente no $CAPEX_{FV}$ e consequentemente no TCO_{FV} (Farias *et al.*, 2016). Foi escolhido por ser o equipamento principal do sistema fotovoltaico, além de ser o equipamento que possui maior quantidade no sistema.

O preço do painel foi variado -30% à +30%. É importante destacar que nesta análise de sensibilidade não foi considerada a opção de variação tecnológica dos equipamentos fotovoltaicos, pois, dados como potência nominal, eficiência e tempo de garantia e vida útil seriam alterados, tornando o processo de análise mais complexo.

Assim, a Figura 4.5, mostra a variação sofrida pelo custo unitário do painel fotovoltaico que implica em uma variação do TCO_{FV} .

Figura 4.5: TCO em Função da Variação do Preço do Painel Fotovoltaico

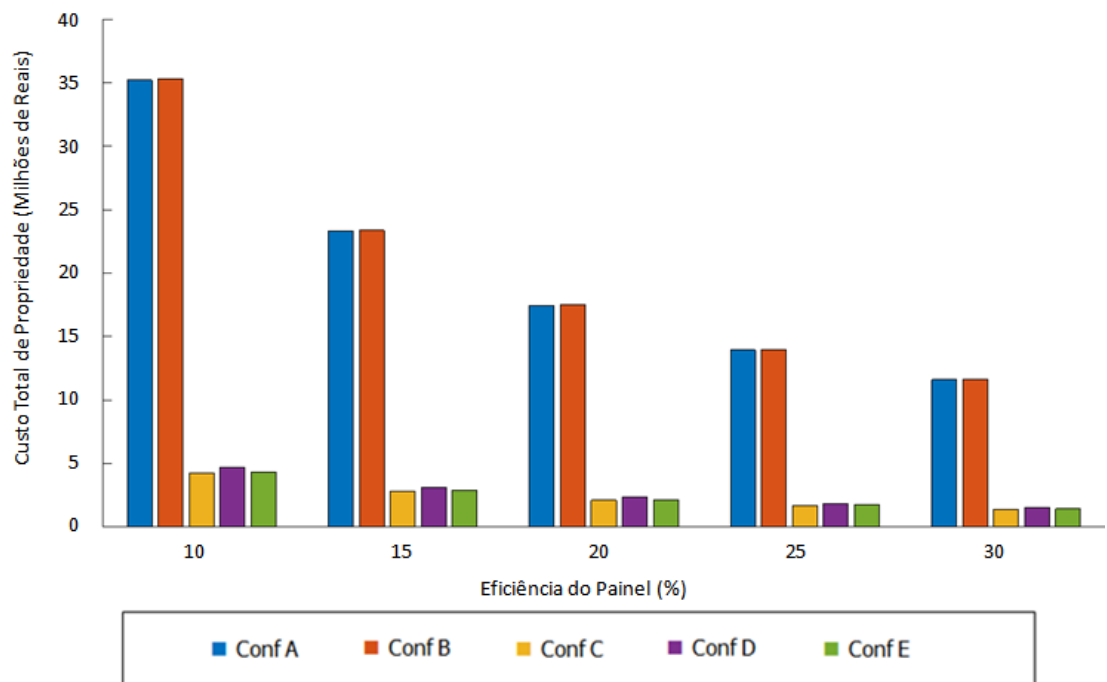


Fonte: Elaborada pela autora.

O segundo parâmetro avaliado foi a eficiência do painel fotovoltaico sendo esta variada de 10% a 30% considerando a Tabela 2.1 onde a célula de silício amorfo tem uma eficiência próxima de 10%, a célula de silício policristalino próxima de 20% e a célula de silício monocristalino ultrapassa os 25%.

Assim, a Figura 4.6, mostra a variação sofrida pela eficiência do painel fotovoltaico que implica em uma variação do TCO_{FV} , pois, este vai influenciar na quantidade de painéis necessários para suprir a demanda energética, o que demonstra a importância sobre a escolha adequada do tipo de painel utilizado. É importante destacar que para essa análise de sensibilidade o preço do painel não sofreu alteração.

Figura 4.6: TCO em Função da Variação da Eficiência do Painel Fotovoltaico



Fonte: Elaborada pela autora.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho apresentou um estudo de viabilidade para a implantação de um sistema fotovoltaico aplicado a um cenário de redes móveis 5G. Para isso, uma análise técnica - econômica foi feita a fim de comparar os custos do sistema fotovoltaico com os custos energéticos tradicionais advindos de concessionárias.

Neste trabalho foram adotadas diferentes configurações de RAN utilizando LTE como interface de rádio e tendo sua rede de transporte baseada em interconexões de anéis ópticos DWDM. Para as redes de acesso sem fio foram adotadas as estações bases do tipo Macro.

Assim, a partir da abordagem apresentada, demonstra-se a viabilidade de implantação de estruturas fotovoltaicas, como solução de geração de energia uma vez que, o custo total para aquisição dos sistemas fotovoltaicos tem um valor inferior ao que seria gasto caso a energia consumida fosse da rede elétrica convencional.

Os resultados também indicam que as condições de insolação da região influenciam diretamente no custo total de propriedade do sistema, mostrando que a implantação de sistemas fotovoltaicos é mais vantajosa se for realizada em regiões do planeta cuja radiação solar incidente seja superior, como em regiões de clima tropical, onde se possui maior disponibilidade e menor variabilidade do recurso solar ao longo do ano, ou seja, quanto melhor e mais propício for o ambiente, melhor vai ser o aproveitamento do recurso e menores serão os custos relacionados ao sistema fotovoltaico.

Assim como a irradiação solar e densidade de usuários também influencia no custo final de implantação do sistema fotovoltaico, pois ela influencia na quantidade de energia demandada e consequentemente na quantidade de equipamentos necessários para atender essa demanda de energia.

Além disso, uma análise de sensibilidade foi realizada considerando o preço do painel fotovoltaico e a eficiência tendo em vista os tipos de tecnologia empregada no painel, visto que esse é o componente principal do sistema. Foi demonstrado que o preço influencia significativamente nos custos do sistema assim como a eficiência também o que demonstra a importância da escolha adequada do tipo de painel que será utilizado.

As contribuições deste trabalho incluem:

- Avaliação econômica sobre o uso do sistema fotovoltaico como fonte energética para alimentação de redes móveis de quinta geração.
- Realização de um estudo sobre a aplicação de diferentes arquiteturas em um cenário de rede 5G, enfatizando dois diferentes tipos de distribuição RAN.

- Realização de um estudo sobre tecnologias fotovoltaicas discutindo conceitos e destacando equipamentos necessários para geração de energia bem como as principais questões e fatores que influenciam na produtividade dos painéis.
- A partir dos resultados, foi possível demonstrar a viabilidade de implantação de estruturas fotovoltaicas no contexto de redes 5G, considerando diversos tipos de despesas de capital e operacional.

Como possíveis desdobramentos desse trabalho se pode destacar:

- Considerar a variável temperatura, pois, a influência do calor pode aumentar ou reduzir a produtividade dos painéis fotovoltaicos.
- Realizar estimativas de emissões evitadas gases potencialmente nocivos ao meio ambiente que estão associados ao consumo a partir da matriz de energia elétrica convencional.
- Utilizar outras alternativas de energia renovável para o estudo;
- Realizar um estudo de viabilidade técnico econômica, para utilização de sistema fotovoltaico em arquiteturas de redes utilizando segmento de rádio baseado na tecnologia de acesso de rádio 5G NR;
- Realiza o estudo para níveis diferentes de distribuição de RAN, fazendo uso de uma RAN parcialmente centralizada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUILERA, Jorge; HONTORIA, Leocadio; MUÑOZ, Francisco José. Dimensionado de sistemas fotovoltaicos autónomos. **Grupo Idea, Departamento de electrónica, Escuela politécnica superior, Universidad de Jaén**, 2011.
- ALCATEL-LUCENT. The LTE Network Architecture. Technical report, Alcatel Lucent, 2009.
- ANDRADE, M. D.; TORNATORE, M.; PATTAVINA, A.; HAMIDIAN, A.; GROBE, K. **Cost models for Base Band Unit (BBU) hotelling: From local to cloud**. In: 2015 IEEE 4th International Conference on Cloud Networking (CloudNet), p. 201–204, Oct 2015.
- ANEEL. **Bandeira Tarifária**. Disponível em: < <https://www.aneel.gov.br/bandeiras-tarifarias>>. 2015. Acesso em: 13 nov. 2019.
- ANEEL. **Bandeira Tarifária**. Disponível em: < https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/em-julho-bandeira-amarela/656877?inheritRedirect=false>. 2019a. Acesso em: 13 nov. 2019.
- ANEEL. **Bandeira Tarifária**. Disponível em: < https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/bandeira-tarifaria-para-novembro-e-vermelha-patamar-1/656877?inheritRedirect=false>. 2019b. Acesso em: 13 nov. 2019.
- ANEEL. **Energia Solar**. Disponível em: < [http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar\(3\).pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar(3).pdf)>. 2005. Acesso em: 05 dez. 2019.
- ANEEL. **Ranking Nacional de Tarifas Energéticas**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/informacoes-tecnicas/-/asset_publisher/CegkWaVJWF5E/content/id/14484019>. Acesso em: 19 maio. 2019.
- 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.
- Auer, G. et al, "Energy efficiency analysis of the reference systems, areas of improvements and target breakdown," INFISO-ICT-247733 EARTH, Deliverable D2.3, EARTH Project, 2010.
- CHECKO, Aleksandra et al. Synchronization challenges in packet-based Cloud-RAN fronthaul for mobile networks. In: **2015 IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW)**. IEEE, 2015. p. 2721-2726.
- China Mobile Research Institute. **C-RAN, The Road Towards Green RAN**. White Paper, Out. 2011 [Online]. Disponível: <<https://pdfs.semanticscholar.org/eea3/ca62c9d5653e4f2318aed9ddb8992a505d3c.pdf>>.
- CISCO. **O que é 5g?**. Disponível em: < https://www.cisco.com/c/pt_br/solutions/what-is-5g.html >. Acesso em: 20 dez. 2019

CISCO. **Cisco Visual Networking Index (VNI) Complete Forecast Update, 2017–2022.** Disponível em < https://www.cisco.com/c/dam/m/en_us/network-intelligence/service-provider/digital-transformation/knowledge-network-webinars/pdfs/1211_BUSINESS_SERVICES_CKN_PDF.pdf>. Acesso em: 20 set. 2019.

CISCO. **Introduction to DWDM Technology.** Disponível em < https://www.cisco.com/c/dam/global/de_at/assets/docs/dwdm.pdf>. Acesso em: 20 Dez. 2019.

CORTES, Robert Ahumada et al. Spectrum allocation algorithms for elastic DWDM networks on dynamic operation. **IEEE Latin America Transactions**, v. 12, n. 6, p. 1012-1018, 2014.

CRESESB. **Tutorial de Energia Solar Fotovoltaica.** Disponível em: < http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&cid=tutorial_solar>. Acesso em: 19 Nov. 2019

DE SOUSA, Wanderley Lemgruber. **Impacto ambiental de hidrelétricas: uma análise comparativa de duas abordagens.** 2000. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

EPE. **Matriz Energética e Elétrica.** Disponível em: < <http://epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 16 julho 2019

Ericsson. **5G radio access.** White Paper, Fev. 2015 [Online]. Disponível: <<http://www.ericsson.com>>.

Ericsson. **5G radio access.** White Paper, Abril. 2016 [Online]. Disponível: <<http://www.ericsson.com>>.

FARIAS, Fabrício de Souza et al. **Designing cost-efficient transport solutions for fixed and mobile broadband access network.** 2016.

FIORANI, Matteo et al. Modeling energy performance of C-RAN with optical transport in 5G network scenarios. **Journal of Optical Communications and Networking**, v. 8, n. 11, p. B21-B34, 2016.

FIORANI, Matteo et al. 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, 2016b

FIPE. **Índices Comentados: Índice Fipezap – Índice de Preços de Imóveis Anunciados – Locação Residencial.** Disponível em: <<http://www.fipe.org.br>>. Acesso em: 19 maio. 2019.

FOSCHINI, Gerard J.; GANS, Michael J. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas. **Wireless personal communications**, v. 6, n. 3, p. 311-335, 1998.

Green, M. A.; Emery, K.; Hishikawa, Y.; Warta, W.; Dunlop, E. D. Solar cell efficiency tables (version 41). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, p. 1-11. v. 21, 2013.

GREEN, Martin A. et al. Solar cell efficiency tables (version 53). **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 27, n. 7, p. 565-575, 2018.

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.

HICKEL, Bernardo Meyer et al. O impacto no desempenho de sistemas fotovoltaicos causado pelo acúmulo de sujeira sobre os módulos FV-metodologia e avaliação através de curvas IxV em campo. 2017. Dissertação. Universidade Federal de Santa Catarina

HOSSAIN, Ekram; HASAN, Monowar. 5G cellular: key enabling technologies and research challenges. **arXiv preprint arXiv:1503.00674**, 2015.

IEA. **Snapshot of Global Photovoltaic Markets**. Disponível em: < http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/statistics/IEA-PVPS_-_A_Snapshot_of_Global_PV_-_1992-2017.pdf>. Acesso em: 15 julho. 2019.

IEA. **TRENDS IN PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS** Survey report of selected IEA countries between 1992 and 2010. Disponível em: http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/statistics/tr_2010_low.pdf>. Acesso em: 15 julho. 2019

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

JÚNIOR, Orlando Lisita. Sistemas fotovoltaicos conectados à rede: Estudo de caso–3 kWp instalados no estacionamento do IEE-USP. **Dissertação. São Paulo**, 2005.

LAMBERTS, Roberto(ed); GHISI, Enedir(ed); PEREIRA, Cláudia Donald(ed); BATISTA, Juliana Oliveira(ed). **Casa Eficiente: Consumo e Geração de Energia**. Florianópolis: UFSC/LabEEE; 2010.

LARSSON, Erik G. et al. Massive MIMO for next generation wireless systems. **IEEE communications magazine**, v. 52, n. 2, p. 186-195, 2014.

Liu, D.; Chen, Y.; Chai, K. e Zhang, T. "Adaptive user association in hetnets with renewable energy powered base stations", Proc. 2014 IEEE Telecommunications Conf. (ICT), pp. 93-97, Maio 2014.

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.

Li, X.; Samaka, M.; Chan, H. A.; Bhamare, D.; Gupta, L.; Guo, C. e Jain, R. "Network slicing for 5g: Challenges and opportunities", IEEE Internet Computing, vol. 21, no. 5, pp. 20-27, 2017.

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.

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_Renryo_vfinal.pdf: Universidade de São Paulo, jan. 2014.

NEOSOLAR ENERGIA. **Kit de Montagem Fotovoltaico Little Plan Light para telhado metálico**. Disponível em: <<http://www.neosolar.com.br/>>. Acesso em: 15 maio 2016.

NEOSOLAR ENERGIA. **Painel Solar Fotovoltaico Yingli YL330P-35b (330Wp)**. Disponível em: <<http://www.neosolar.com.br/>>. Acesso em: 15 maio. 2019

PARIDA, Bhubaneswari; INIYAN, S.; GOIC, Ranko. A review of solar photovoltaic technologies. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 15, n. 3, p. 1625-1636, 2011

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.

PEREIRA, Osvaldo L.S., GONÇALVES, Felipe F. **Dimensionamento de Inversores para Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica: Estudo de Caso do Sistema de Tubarão –SC**. Grupo de Pesquisa em Meio Ambiente, Universalização, Desenvolvimento Sustentável e Energias Renováveis –G-MUDE. In: Revista Brasileira de Energia, Vol. 14, Nº 1, 1º Sem. 2008, pp 25-45.

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 a 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: CEPEL – CRESESB, 2014.

Queiroz, A.; Pina, D.; Mello, E.; Amaral, I.; Kovaleski, P. e Saporito. S. “A 5ª geração de rede sem fio”. Disponível em: <https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel879/trabalhos_vf_2015_2/5G/desafios.html>. Acesso em: 06 de Fev de 2019.

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.].

SAMPAIO, João Alves et al. Silício grau solar: uma revisão das tecnologias de produção. 2019.

SIMEONE, O.; MAEDER, A.; PENG, M.; SAHIN, O.; YU, W. Cloud radio access network: Virtualizing wireless access for dense heterogeneous systems. *Journal of Communications and Networks*, 18(2):135–149, April 2016.

SOUZA, Daniel da Silva et al. Uma análise técnico-econômica para implantação de arquiteturas centralizadas de redes de telefonia móveis. 2018. Dissertação. Universidade Federal do Pará

SOUZA, Marcela Alves de et al. Sistemas fotovoltaicos aplicados em redes móveis heterogêneas. 2016. Dissertação. Universidade Federal do Pará

SOUZA, Phelipe Alves de et al. Rede de acesso virtualizada: alocação e posicionamento de recursos. 2018. Dissertação. Universidade Federal de Goiás.

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

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

TOMBAZ, Sibel; ZHENG, Zhihao; ZANDER, Jens. Energy efficiency assessment of wireless access networks utilizing indoor base stations. In: **2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)**. IEEE, 2013. p. 3105-3110.

TOMBAZ, Sibel et al. Is backhaul becoming a bottleneck for green wireless access networks?. In: **2014 IEEE international conference on communications (ICC)**. IEEE, 2014. p. 4029-4035.

TORRES, Regina Célia. **Energia solar fotovoltaica como fonte alternativa de geração de energia elétrica em edificações residenciais**. 2012. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

Union (ITU). “Setting the Scene for 5G: Opportunities & Challenges”. International Telecommunication. Disponível em: <<https://www.itu.int/en/Pages/default.aspx>>. Acesso em: 05 de jan de 2019

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.

WANG, Bang et al. On minimizing energy consumption cost in green heterogeneous wireless networks. **Computer Networks**, v. 129, p. 522-535, 2017

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