

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

**IMPLANTAÇÃO DE SISTEMA
FOTOVOLTAICO DE BAIXO CUSTO EM
ARQUITETURA DE RÁDIO CENTRALIZADA**

PALINE ALVES SARAIVA

DM 06/2020

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

PALINE ALVES SARAIVA

**IMPLANTAÇÃO DE SISTEMA
FOTOVOLTAICO DE BAIXO CUSTO EM
ARQUITETURA DE RÁDIO CENTRALIZADA**

DM 06/2020

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

PALINE ALVES SARAIVA

**IMPLANTAÇÃO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO DE
BAIXO CUSTO EM ARQUITETURA DE RÁDIO
CENTRALIZADA**

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

Orientador: Diego Lisboa Cardoso

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

2020

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

S243i Saraiva, Paline Alves
Implantação de Sistema Fotovoltaico de Baixo Custo em
Arquitetura de Rádio Centralizada / Paline Alves Saraiva. — 2020.
72 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Diego Lisboa Cardoso
Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal
do Pará, Belém, 2020.

1. Sistema Fotovoltaico. 2. Programação Linear Inteira. 3.
Arquitetura de Rádio Centralizada. I. Título.

CDD 621.31098115

“IMPLANTAÇÃO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO DE BAIXO CUSTO EM ARQUITETURA DE RÁDIO CENTRALIZADA”

AUTORA: PALINE ALVES SARAIVA

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

APROVADA EM: 31/01/2020

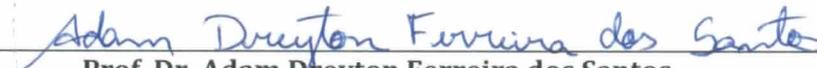
BANCA EXAMINADORA:



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



Prof. Dr. Carlos Renato Lisboa Francês
(Avaliador Interno - PPGEE/UFPA)



Prof. Dr. Adam Dreyton Ferreira dos Santos
(Avaliador Externo - UNIFESSPA)

VISTO:

Prof.ª Dr.ª Maria Emília de Lima Tostes
(Coordenadora do PPGEE/ITEC/UFPA)

Dedico este trabalho à minha mãe, Raimunda Alves de Souza, e ao meu companheiro de vida, Fernando Alves Miranda Santos, que com muito amor, carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

Agradecimentos

Primeiramente a Deus, pela forma grandiosa com que tem abençoado os meus passos e minhas escolhas.

Ao meu Orientador, Prof. Dr. Diego Lisboa Cardoso, pelo apoio e orientação durante esta jornada.

À Marcela Alves de Souza, pelo conhecimento, inspiração e paciência que me impulsionaram a prosseguir nas mais diversas vezes que pensei em desistir.

Ao Hugo Pereira Kuribayashi, pelo conhecimento e auxílio durante o desenvolvimento desse projeto.

Ao Prof. Dr. Adam Dreyton Ferreira dos Santos, pelo auxílio dado para a realização desta pesquisa.

À Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará e a Universidade Federal do Pará, pois possibilitaram a minha formação profissional.

Aos meus pais, Raimunda Alves de Souza e Francisco Ferreira Saraiva Filho, pelo apoio, força e incentivo em todos os meus projetos de vida.

Ao meu companheiro, Fernando Alves Miranda Santos, pelo amor, compreensão e incentivo.

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

*“Os computadores são incrivelmente rápidos, precisos e burros; os homens são
incrivelmente lentos, imprecisos e brilhantes;
juntos, seus poderes ultrapassam os limites da imaginação.
(Albert Einstein)*

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Motivações	3
1.2	Objetivos	5
1.3	Trabalhos relacionados	6
1.4	Organização da Dissertação	10
2	Referencial Teórico	12
2.1	Considerações Iniciais	12
2.2	Quinta Geração de Redes Móveis	12
2.3	Arquitetura de Rádio Centralizada	13
2.3.1	Dimensionamento de Rádio	14
2.4	Sistema Fotovoltaico	15
2.4.1	Componentes do Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede	16
2.4.1.1	Módulo Fotovoltaico	16
2.4.1.2	Inversor	18
2.4.1.3	Medidor Bidirecional	19
2.4.1.4	Cabeamento	19
2.4.2	Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico	20
2.5	Custo Total de Propriedade	21
2.5.1	Despesas de Capital	22
2.5.2	Despesas de Operação	22
2.5.3	Economia Financeira do Usuário	23
2.6	Programação Linear Inteira	23
2.7	Considerações do Capítulo	26
3	Metodologia	27
3.1	Considerações Iniciais	27
3.2	Fase 1: Levantamento do Consumo de Energia da CRA	28
3.3	Fase 2: Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico	30
3.4	Fase 3: Formulação ILP do Sistema Fotovoltaico	32
3.5	Fase 4: Avaliação de emissão de CO_2 evitadas	33
3.6	Fase 5: Avaliação do TCO	34
3.7	Considerações do Capítulo	35
4	Estudo de Caso e Análise de Resultados	36
4.1	Considerações Iniciais	36

4.2	Estudo de Caso	36
4.3	Resultados	40
4.3.1	Avaliação de Custos	41
4.3.2	Avaliação Ambiental	45
4.4	Considerações do Capítulo	46
5	Considerações finais	47
5.1	Contribuições da Dissertação	48
5.2	Dificuldades Encontradas	48
5.3	Trabalhos Futuros	49
	Referências	50

Lista de ilustrações

Figura 1	Estimativa de adoção 5G de 2020-2025.	2
Figura 2	Estimativa de geração de energia por tipo durante os períodos de 2010-2016 e 2017-2040.	3
Figura 3	Representação da Arquitetura CRA.	14
Figura 4	Representação Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede.	16
Figura 5	Representação Tipo Conexão Módulos Fotovoltaicos.	17
Figura 6	Tipos de Inversores.	18
Figura 7	Fluxograma <i>Branch-and-Bound</i>	25
Figura 8	Visão Geral das fases da Metodologia.	27
Figura 9	Subetapas do Levantamento do Consumo Energético da CRA.	29
Figura 10	Parâmetros para a geração do dimensionamento.	30
Figura 11	Cenário considerado no estudo.	31
Figura 12	Parâmetros da Avaliação de emissão de CO_2 evitadas.	34
Figura 13	Custo Total de Propriedade.	35
Figura 14	Estimativa de Consumo de Energia da CRA ao longo dos anos.	38
Figura 15	Quantitativo de Inversores do Sistema Fotovoltaico.	41
Figura 16	TCO do Sistema Fotovoltaico.	42
Figura 17	CAPEX anual do Sistema Fotovoltaico.	43
Figura 18	OPEX anual do Sistema Fotovoltaico.	43
Figura 19	Custo do sistema fotovoltaico por usuário.	44
Figura 20	Economia gerada por usuário em função das diferentes configurações de inversores.	45
Figura 21	Quantitativo de emissões de CO_2 evitadas por usuário ao ano.	46

Lista de tabelas

Tabela 1	Resumo dos trabalhos correlatos	10
Tabela 2	Parâmetros utilizados na definição do cenário da rede (FIORANI et al., 2016; TONINI et al., 2016a; SOUZA, 2017)	37
Tabela 3	Parâmetros do Sistema Fotovoltaico.	39
Tabela 4	Potência e consumo estimado de energia dos equipamentos CRA.	40
Tabela 5	Custo do consumo de energia a partir da concessionária e TCO do sistema fotovoltaico otimizado	44

Lista de abreviaturas e siglas

5G	Fifth-Generation Wireless Telephone Technology
A	Ampere
BBU	Baseband Unit
BS	Base Station
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CAPEX	Capital Expenditure
CPRI	Common Public Radio Interface
CRA	Arquitetura de Rádio Centralizada
CO	Central Office
CO ₂	Dióxido de Carbono
GB	Gigabyte
Gbps	Gigabits por segundo
GEE	Gases do Efeito Estufa
GHz	Gigahertz
HOMER	Hybrid Optimization Model for Electric Renewables
IoT	Internet das Coisa
IP	Integer Programming
ILP	Integer Linear Programming
kg	Quilograma
KPI	Indicadores Chave de Desempenho
kW	Quilowatt

kWh	Quilowatt hora
kWp	Quilowatt pico
LP	Linear Programming
LTE	Long-Term Evolution
Mbps	Megabits por segundo
MILP	Mixed Integer Linear Programming
MILP	Mixed Integer Linear Programming
MPPT	Maximum Power Point Tracking
MWp	Megawatts pico
OBSAI	Open Base Station Architecture Initiative
OPEX	Operational Expenditure
ORI	Open Radio Interface
PC	Computador Pessoal
PPL	Problema de Programação Linear
PPLI	Problema de Programação Linear Inteira
RA	Realidade Aumentada
RAM	Random Access Memory
RAN	Rede de Acesso de Rádio
RoF	Radio Over Fiber Technology
	RRH Remote Radio Heads
RRU	Remote Radio Unit
SFNO	Sistema Fotovoltaico Não Otimizado
SFO	Sistema Fotovoltaico Otimizado
STC	Standard Test Conditions
TCO	Total Cost of Ownership
TIC	Tecnologia da Informação e Comunicação
V	Volts

Resumo

A crescente demanda por maiores taxas de dados e melhor qualidade de serviços de Internet tem resultado em altos investimentos em infraestrutura de redes móveis por parte das operadoras. Neste contexto, a Arquitetura de Rádio Centralizada (CRA) é uma solução promissora que baseia-se na centralização, compartilhamento e melhor alocação de recursos de rede, resultando em reduzidos custos de implantação e operação, quando planejada de forma apropriada. Ainda que os benefícios da CRA sejam numerosos, essa redução de custos também pode ser potencializada por meio da adoção de fontes de energias alternativas. Uma das opções para isso é o aproveitamento da energia solar, por meio de sistemas fotovoltaicos, no qual adota-se o dimensionamento de seus componentes básicos, tais como, painéis e inversores. No entanto, uma das principais barreiras para a utilização concreta de tal sistema é seu elevado custo de implantação, o qual não pode ser negligenciado. Diante disso, a disposição adequada de tais equipamentos por meio de abordagens de otimização, considerando a demanda energética da CRA, representa um desafio a ser superado. Para isso, este trabalho propõe uma estratégia de minimização do custo total de implantação de um sistema fotovoltaico, por meio da redução do quantitativo de inversores, o qual é formulado como um problema de Programação Linear Inteira (ILP), com o intuito de reduzir ainda mais os custos relacionados à CRA. A partir dos resultados, evidenciou-se que a técnica de otimização utilizada, implicou na redução média do Custo Total de Propriedade (TCO) do sistema fotovoltaico em cerca de 0,02 milhão de reais, bem como na sustentabilidade ambiental por meio da redução das emissões de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera.

Palavras-chave: Sistema Fotovoltaico, Programação Linear Inteira, Arquitetura de Rádio Centralizada.

Abstract

The growing demand for higher data rates and better quality of Internet services has resulted in high investments in mobile network infrastructure by operators. In this context, Centralized Radio Architecture (CRA) is a promising solution that relies on centralizing, sharing, and better allocating network resources, resulting in reduced deployment and operation costs when adequately planned. While the benefits of CRA are numerous, this cost reduction can also be enhanced through the adoption of alternative energy sources. One of the options for this, it is Growing demand for higher data rates and better quality of Internet services has resulted in high investments in mobile network infrastructure by operators. In this context, Centralized Radio Architecture (CRA) is a promising solution that relies on centralizing, sharing, and better allocating network resources, resulting in reduced deployment and operation costs when adequately planned. While the benefits of CRA are numerous, this cost reduction can also be enhanced through the adoption of alternative energy sources. One of the options for this equipment through optimization approaches, considering the energy demand of CRA, represents a challenge to be overcome. To this end, this work proposes a strategy to minimize the cost of implementing a photovoltaic system by reducing the number of inverters, formulated as an Integer Linear Programming (ILP) problem, to further reduce costs related to CRA. From the results, it is evident that the proposed optimization technique, implied in the average reduction of the Total Cost of Ownership (TCO) of the photovoltaic system in about 0.02 million reais, as well as in the environmental sustainability through the reduction of carbon dioxide emissions (CO₂) in the atmosphere.

Keywords: Photovoltaic System, Integer Linear Programming, Centralized Radio Architecture.

1 Introdução

Nos dias atuais, os serviços digitais têm apresentado evoluções tecnológicas consideráveis, refletindo nas exigências que o mercado consumidor pode requerer das redes de telecomunicações, como altas taxas de transmissão, menor latência, maior confiabilidade e ampla cobertura. Diante desse cenário, o crescimento explosivo do tráfego de dados móveis sustentado pelo uso de aplicativos, como vídeo de ultra-alta definição, realidade aumentada (RA) e Internet tátil está conduzindo a maioria dos esforços do setor de telecomunicações para a quinta geração de redes móveis (5G)(SHANKARANARAYANAN; GHOSH, 2017; CISCO, 2019).

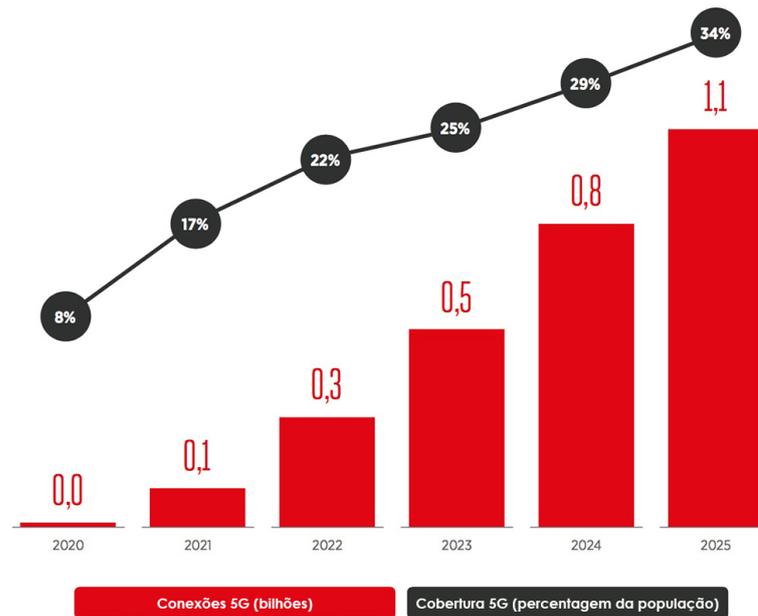
Além de suportar essas aplicações, o 5G também deve permitir uma série de novas categorias de serviços, como a Internet das Coisas (IoT), carros autônomos, automação industrial e *eHealth*. Como resultado, as redes 5G são projetadas desde a sua criação para atingir não apenas os principais indicadores de desempenho (KPI - *Key Performance Indicator*) tradicionais, como capacidade e cobertura, mas também novos KPIs, como densidade de conexão, latência, confiabilidade e, sobretudo, eficiência energética (AMERICAS, 2019).

Segundo o relatório *The Mobile Economy 2017* (GSMA, 2017), as redes 5G serão implantadas, principalmente, em áreas urbanas densas a fim de complementar a capacidade de banda larga móvel existente, visando prover cobertura para um terço da população mundial até 2025, alcançando 34% de abrangência, conforme pode ser representado na Figura 1.

Esse aumento explosivo no volume de conexões 5G tem levado as operadoras a se preocupar com questões relacionadas ao crescente consumo de energia, assim como, com as emissões de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera (SOUZA et al., 2017). Zhang et al. (2017) destaca 3 (três) principais razões para que este problema ocorra no contexto de redes móveis: a lentidão na implantação de novos modelos de estações base (BSs) mais eficientes em termos energéticos; novos procedimentos de gerenciamento de rede com desligamento parcial de equipamentos visando consciência energética; e ultra-densificação da rede, por meio da implantação de BSs para suportar os requisitos rigorosos do 5G;

Diante desse cenário, a contribuição total das Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC) para as emissões de carbono mundial crescerá de 1,06% em 2007, para mais do que o dobro em 2020, segundo previsões, atingindo um máximo de 3,6% do total de emissões dos gases de efeito estufa (GEE)(BELKHIR; ELMELIGI, 2018). As BSs foram

Figura 1: Estimativa de adoção 5G de 2020-2025.



Fonte: GSMA (2017)

identificadas como os equipamentos que emitem quantidades significativas de gases poluentes, que além de consumir grandes volumes de energia, contribui com cerca de 60% do consumo total da rede (ZHANG et al., 2016; AHMED; NAEEM; IQBAL, 2017; RACHED et al., 2017).

Para lidar com o aumento sem precedentes do consumo de energia dos equipamentos que compõem as redes de telecomunicações, sobretudo o *fronthaul*, a Arquitetura de Rádio Centralizada (CRA - *Centralized Radio Architecture*) é uma solução promissora que baseia-se na centralização, compartilhamento e melhor alocação de recursos de rede, resultando em reduzidos custos de implantação e operação. Porém, quando não planejada de forma adequada, a CRA enfrenta questões desafiadoras de planejamento, devido ao equipamento da rede de rádio a ser ativado, resultando em custos de instalação extremamente altos (TONINI et al., 2016a).

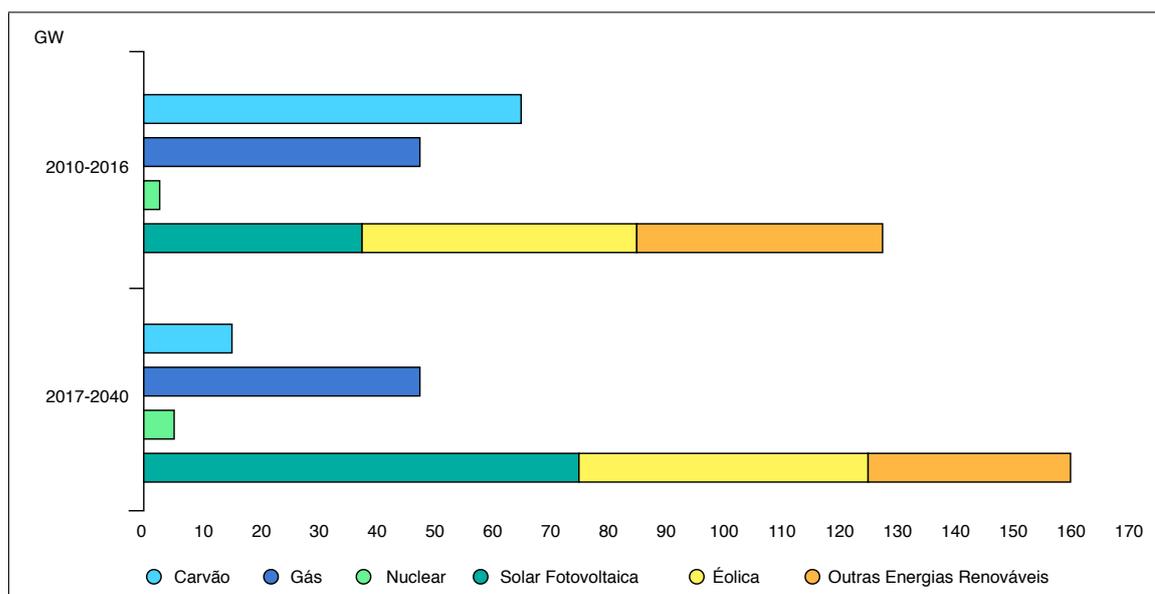
Para tornar a CRA mais atraente para as operadoras móveis, Tonini et al. (2016a) propôs diferentes estratégias de implantação para minimizar os custos associados à CRA. Além disso, há a possibilidade de incorporar tecnologias verdes e sustentáveis nos sistemas de comunicação baseados em 5G, a fim de alcançar economia de energia significativa e reduzir, ainda mais, as despesas operacionais da rede (AGIWAL; ROY; SAXENA, 2016).

Diante disso, observa-se diversos esforços de pesquisas que exploram a utilização de energias alternativas em arquitetura de redes de telecomunicações (HAN; ANSARI, 2016; RENGA et al., 2017; ZHANG et al., 2017). Essas fontes de geração de energia, em especial a solar, têm atraído atenção dos tomadores de decisão, dado que é uma fonte

inesgotável, além de ser a mais utilizada em todo o mundo (MALEKI et al., 2017).

A Figura 2 apresenta um panorama evolucionar dos diferentes tipos de geração de energia, dentre estes, é possível perceber que a energia solar fotovoltaica é a que apresenta o crescimento mais significativo ao longo dos anos. Considerando o intervalo de 2016 à 2040, a estimativa é que haja uma expansão de aproximadamente 54,16% neste tipo de geração.

Figura 2: Estimativa de geração de energia por tipo durante os períodos de 2010-2016 e 2017-2040.



Fonte: IEA (2019)

Assim, sistemas fotovoltaicos demonstram serem sistemas promissores para o aproveitamento de fontes de energia renováveis, devido às suas qualidades intrínsecas, tais como, custos operacionais econômicos; requisitos de manutenção limitados; alta confiabilidade; inaudível; e fácil instalação. Entretanto, com o objetivo de atender as demandas futuras de tráfego de dados móveis, o planejamento e a implantação das tecnologias necessárias ao 5G, a padronização de serviços e a elaboração de modelos que proporcionem o controle de perspectivas econômicas devem ser levados em consideração (SOUZA et al., 2017).

1.1 Motivações

As fontes de energias renováveis, apresentam-se como uma das opções mais viáveis para a redução dos custos de energia das operadoras de redes móveis, pois após uma década de intensa pesquisa em redes energeticamente eficientes, pouco evoluiu, exceto pela introdução de alguns equipamentos econômicos, de modo que os custos de energia continuam subindo (LEONARDI; MEO; MARSAN, 2016; ALSHARIF, 2017a).

Nessa situação, a eletricidade advinda da energia solar fotovoltaica tem assumido cada vez mais relevância (IEA, 2019). E assim como qualquer outra fonte renovável, apresentam aspectos positivos e negativos, sejam de viés econômico, ambiental ou operacional.

Em relação às vantagens, pode-se destacar as seguintes: alta produtividade, presumindo que toda energia gerada é utilizada; reduzido impacto ambiental, já que geram energia através de uma fonte renovável podem ser adicionados em ambiente urbanos, nos condomínios, áreas residenciais, comércio e indústria, com a finalidade de atender a necessidade local sem necessitar de uma área complementar; possibilidade de redução nas perdas de energia elétrica no decorrer da distribuição; e a ausência de recursos de armazenamento, para o caso dos sistemas conectados à rede (PAIVA, 2018).

Ainda de acordo com Paiva (2018), além dessas características, pode-se ainda acrescentar a sua longevidade de pelo menos 25 anos, sendo este o tempo de garantia ofertado pela maior parte dos fabricantes, além disso contam com um custo reduzido de manutenção, apresentam a possibilidade de expansão da potência instalada sem muitos inconvenientes, e ainda caracterizam-se por serem considerados uma tecnologia confiável.

Por outro lado, o sistema pode apresentar um alto custo de investimento inicial e sua eficiência sujeita-se às condições geográficas e climáticas favoráveis, como irradiação solar incidente, temperatura, região de instalação, entre outros fatores. Em adição, Roberts (2016) destaca que sistemas fotovoltaicos quando dimensionados de forma correta e otimizada, apresentam menor custo de energia gerada, maior confiabilidade no fornecimento de energia, além de inúmeros benefícios ambientais.

Neste sentido, diversos esforços de pesquisa tem sido empregados para o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos. Na literatura correlata podemos destacar a proposição de diversas abordagens, tais como o uso de Programação Linear Inteira (ILP) em (ZHANG et al., 2017; OKOYE; SOLYALI, 2017), e o uso de Programação Linear Inteira Mista (MILP) (DOLARA et al., 2017). Há ainda trabalhos que adotam o uso de heurísticas e meta-heurísticas como o método de enxame de partículas (Particle Swarm Optimization - PSO) (FETANAT; KHORASANINEJAD, 2015; MALEKI et al., 2017), dentre outras abordagens. No entanto, percebe-se que não existe uma abordagem globalmente aceita para a resolução do problema (KONDILI, 2010).

A partir da abordagem do sistema fotovoltaico não otimizado (SFNO) de Souza (2017), assume-se que um dos itens de maior impacto no valor do custo associado ao sistema fotovoltaico é baseado no quantitativo de inversores a serem implantados em um dado cenário. Assim, para realizar o atendimento da CRA de modo viável financeiramente, é importante reduzir o quantitativo de inversores a serem implantados na referida arquitetura.

Assim, este trabalho, aborda o uso de energia solar, através do dimensionamento

de um sistema fotovoltaico otimizado (SFO), para complementar a demanda energética de uma CRA, com o objetivo de diminuir as despesas operacionais com o custeio de energia elétrica proveniente da concessionária, assim como, com as emissões de CO₂ na atmosfera. Para tanto, esse sistema foi modelado como um problema de minimização de custo, formulado como um problema de Programação Linear Inteira, objetivando reduzir ainda mais os custos relacionados a arquitetura CRA.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal apresentar um dimensionamento otimizado de um sistema fotovoltaico aplicado em arquitetura de rádio centralizada, através de um problema matemático para minimização de custos, que considera a minimização no número de inversores, formulado como um problema de Programação Linear Inteira.

Como objetivos específicos destacam-se:

- Realizar um levantamento técnico detalhado sobre conceitos relativos a dimensionamento de sistema fotovoltaico;
- Realizar o levantamento técnico em relação a técnica de otimização Programação Linear Inteira;
- Realizar o levantamento sobre CRA e seu consumo energético;
- Propor uma formulação matemática para o problema de minimização de custos financeiros associados ao sistema fotovoltaico.
- Customização de modelos analíticos para estimativa do Custo Total de Propriedade (TCO - *Total Cost of Ownership*) e viabilidade financeira;
- Comparar a abordagem de otimização proposta com uma abordagem que não utiliza técnicas de otimização.
- Demonstrar a viabilidade da solução, mediante a redução de custos financeiros.

Assim, elencados os objetivos específicos, pode-se então definir como principais contribuições deste trabalho:

- Realização de uma pesquisa relacionada aos principais conceitos que permeiam a utilização de técnica de otimização no dimensionamento de um sistema fotovoltaico em uma CRA, mostrando suas especificidades, vantagens e desafios, junto com uma boa revisão bibliográfica dos trabalhos mais atuais relacionados ao assunto;

- Utilização de um sistema fotovoltaico conectado a rede elétrica que instiga o uso da geração de energia distribuída (ANEEL, 2012);
- Demonstração da viabilidade da utilização da técnica ILP para minimização de custo de um sistema fotovoltaico no âmbito da CRA;
- Análise financeira, por meio do TCO, da implantação de um sistema fotovoltaico otimizado, assim como as emissões de CO₂ evitadas.

1.3 Trabalhos relacionados

Na literatura tem se observado diversos esforços de pesquisa no sentido de minimizar/otimizar o consumo energético, dentre eles, destacam-se áreas como uso de fontes de energia renovável, aplicação de técnicas de economia de energia ou ainda maneiras de superar a limitação de bateria dos dispositivos dos usuários. Diante disso, tem-se evidenciado a utilização de energia renovável, mediante a aplicação de sistema fotovoltaico, para aumentar a autossuficiência e sustentabilidade ecológica nas mais diversas áreas de telecomunicações, como na infraestrutura da Rede de Acesso de Rádio (RAN - *Radio Access Network*) (ZHANG et al., 2017; ALSHARIF, 2017b).

Pamuklu e Ersoy (2018) formularam um problema de otimização que visa reduzir o custo total de propriedade de um novo tipo de RAN, no qual as BSs nesta rede têm uma conexão com a rede elétrica e possuem seu próprio painel solar e bateria. Para tanto, descrevem vários algoritmos que visam encontrar o tamanho ideal de painéis solares e baterias nas BSs e os horários ideais para o funcionamento das BSs de modo a reduzir o consumo da rede elétrica. Os resultados mostram uma redução do Custo Total de Propriedade (TCO) e fornecem uma rede em consonância aos requisitos de sustentabilidade. Os autores deixam em aberto questões de redução de taxas de emissão de carbono.

Renga et al. (2017), propuseram um modelo markoviano para melhorar a interação de uma rede de comunicação sem fio, assistida por energia renovável para aplicações de redes inteligentes. Os resultados, mostraram que o uso de estratégias de recursos sob demanda na rede móvel verde melhora a interação entre a rede móvel e a rede inteligente: ganho de custo significativo pode ser alcançado, a capacidade de resposta às solicitações de rede inteligente aumenta, baixa probabilidade de armazenamento diminui. Além disso o trabalho ainda realiza uma avaliação do custos operacionais, mas não aborda questões relacionadas a emissão de CO₂.

O trabalho de Han e Ansari (2016) considera a utilização de fontes de energia renováveis para a alimentação das BSs de uma rede heterogênea, porém analisando o custo de aquisição de equipamentos necessários para avaliar o impacto de implantação. O consumo de energia da rede é calculado conforme a demanda de tráfego, e diante disso o

algoritmo apresentado efetua o dimensionamento do quantitativo de painéis fotovoltaicos e do volume de baterias consideradas de forma individual para cada BS.

O estudo de Souza (2017) realiza uma avaliação técnico-econômica para a aquisição, implantação e operação de sistema fotovoltaico no contexto de redes móveis heterogêneas, considerando conjuntamente o consumo energético das redes de rádio, *fronthaul* e *backhaul*. No entanto, não se observa a utilização de técnicas de otimização que auxiliem na minimização dos custos de implantação e manutenção.

Adicionalmente, em se tratando de redução de custos da rede e por conseguinte a diminuição do consumo energético, Tonini et al. (2016a) propõe uma estratégia de implantação otimizada para as redes móveis com base no conceito de CRA, sendo esta denominada RRUP, com o objetivo de minimizar os custos de implantação, utilizando-se da técnica de otimização ILP. Como resultados constatou a efetiva minimização do custo total de implantação da rede móvel se comparada a uma abordagem de implantação convencional baseada em rádio sobre fibra (RoF - *Radio Over Fiber Technology*) para pequenos cenários residenciais. No entanto, o presente trabalho não aborda a utilização de energia renovável o que poderia contribuir com a redução dos custos operacionais da rede.

Potencializando os benefícios da adoção de sistema fotovoltaico, tem sido realizado pesquisas que envolvem utilização de técnicas de otimização como auxílio no seu dimensionamento. Maleki et al. (2017) demonstra um modelo econômico e um método de otimização, usando algoritmo genético e enxame de partículas, objetivando minimizar o custo de operação e manutenção dos sistemas híbridos combinados de calor e energia, sujeitos a restrições relevantes.

Fetanat e Khorasaninejad (2015) utilizam a programação inteira baseada em otimização de colônias de formigas objetivando atingir o menor custo no dimensionamento de um sistema de energia híbrido, solar e eólico. Para tanto, utilizam como variáveis de decisão o número de painéis solares, turbinas eólicas e baterias. Os resultados obtidos são comparados aos de algoritmo genético e ao método convencional de *Branch-and-Bound* e mostram-se viáveis.

Dolara et al. (2017) realiza uma comparação de métodos de otimização, Programação Linear e Programação Inteira Mista, aplicados a micro-redes insulares, incluindo fontes de energia renovável, geradores a diesel e sistemas de armazenamento de energia por bateria. A Programação Linear foi utilizada com o intuito de maximizar a captação de energia de fontes renováveis de forma a minimizar a produção de energia dos geradores a diesel. Já a Programação Inteira Mista com o objetivo de minimizar os custos operacionais. Os resultados desse experimento mostraram-se positivos para ambas as técnicas, no entanto o Programação Inteira Mista mostrou-se mais complexo e mais completo em relação ao modelo Programação Linear, capaz de representar cenários reais de gerenciamento

operacional do Plano de energia híbrida sem nenhuma limitação.

Em Zhang et al. (2017) foi proposto o uso de um sistema de energia solar fotovoltaico utilizando baterias para alimentar uma estação base *Long-Term Evolution* (LTE) em diferentes cenários com captura de energia. Para tanto foi utilizada a abordagem de Programação Inteira Mista, para o problema da melhor escolha do tamanho do painel fotovoltaico e do número de baterias, visando a minimização de custos ao longo do período de 10 anos. Como resultado, foi constatado que alimentar as *BSs* com fontes de energia renováveis além de possível a custos razoáveis também, em muitos casos, é menos dispendioso em relação a abordagens de fornecimento de energia mais tradicionais.

Alsharif (2017b) utiliza o *Hybrid Optimization Model for Electric Renewables* (HOMER), como forma de buscar a sustentabilidade de um sistema de energia solar autônomo para redes heterogêneas com base nas características da exposição à radiação solar na Coresia do Sul. O desfecho da pesquisa, mostra que o sistema movido a energia solar é mais economicamente viável para as operadoras móveis do que a utilização da rede elétrica em casos de grandes cargas.

Chedid e Sawwas (2019) aplicaram algoritmo genético com o intuito de otimizar o dimensionamento e localização ideal de painéis fotovoltaicos e do sistema de armazenamento de energia da bateria, de modo a evitar perdas de energia da rede, custo de geração de energia e desvio de tensão. Isso resultou em uma diminuição nas perdas anuais e melhorou o perfil mínimo e máximo de tensão dos barramentos da rede.

Báez-Fernández, Ramírez-Beltrán e Méndez-Piñero (2016) formularam um modelo para minimização de custos de compra de inversores e módulos fotovoltaicos selecionando a combinação apropriada deles, dada uma lista de modelos com suas especificações. Para tanto, esse objetivo de minimizar custos é estabelecido como um problema de programação linear. Os resultados obtidos mostram que, usando este modelo, os custos de compra podem ser reduzidos em 16,45% de um kit de sistemas fotovoltaicos de 10 kW disponível no mercado em Abril de 2013.

O trabalho de Okoye e Solyali (2017) traz a proposição do uso de otimização em sistemas fotovoltaicos no setor residencial utilizando Programação Inteira. O modelo proposto caracteriza-se pela determinação do número ideal de módulos fotovoltaicos e baterias, e também realizado uma avaliação da viabilidade econômica do sistema através de custos anualizados. A eficácia do modelo proposto é avaliada através de um estudo de caso em Bursari, Nigéria. O resultado obtido com o modelo revela que o estabelecimento de um sistema fotovoltaico solar não é apenas ecológico, mas também cerca de 30% mais barato que os geradores a diesel utilizados na localidade abordada.

Apesar da abordagem de planejamento utilizada em Souza (2017), os custos de implantação de um sistema fotovoltaico representam um desafio a ser superado, e desta

forma, o escopo deste trabalho contempla o estudo de caso de Tonini et al. (2016a), considerando um sistema fotovoltaico, modelado como um problema de minimização do custo, formulado como um problema de ILP, objetivando reduzir ainda mais os custos energéticos relacionados a arquitetura CRA.

Objetivando um melhor esclarecimento das diferentes perspectivas dos trabalhos citados acima, a Tabela 1 mostra de forma resumida os principais trabalhos relacionados a esta pesquisa, ressaltando seus pontos altos, assim como, as questões em aberto que os mesmos apresentam.

A partir dos estudos elencados, observa-se que os trabalhos fornecem uma compreensão bastante proveitosa sobre a utilização de energia renovável, por meio da implantação de sistemas fotovoltaicos no contexto das telecomunicações. Percebe-se que apesar da maioria das abordagens utilizarem técnicas de otimização como forma de dimensionar, de forma eficiente o sistema fotovoltaico, muitos deles deixam questões em aberto no que se refere a utilização do inversor no quesito minimização de custos. Outra constatação, é que nem todos os trabalhos realizam uma análise técnico-econômica sobre a viabilidade de implantação de sistemas fotovoltaicos, assim como não realizam estimativas quanto a redução das emissões de CO₂ que deixaram de ser emitidas no meio ambiente. Diante disso, este estudo propõe uma metodologia geral e abrangente que visa a implantação de um sistema fotovoltaico de baixo custo em uma CRA, além de evidenciar os benefícios ambientais que podem ser alcançados com a adoção de tal tecnologia.

Tabela 1: Resumo dos trabalhos correlatos

Autores	Pontos Altos	Questões em Aberto
Pamuklu e Ersoy (2018)	Otimização TCO de um novo tipo de RAN, através do dimensionamento de painéis solares e baterias nas BSs	Não aborda emissões de CO ₂
Renga et al. (2017)	Apresenta um modelo markoviano para uma rede de comunicação sem fio, assistida por energia renovável	Não aborda emissões de CO ₂
Han e Ansari (2016)	Utiliza fontes de energia renováveis para a alimentação das BSs de uma rede heterogênea	Não considera despesas operacionais
Souza (2017)	Avaliação técnico-econômica para a aquisição, implantação e operação de sistema fotovoltaico	Não utiliza técnicas de otimização
Tonini et al. (2016a)	Utiliza ILP para minimizar os custos de implantação da CRA	Não aborda energia renovável
Maleki et al. (2017)	Usa algoritmo genético e enxame de partículas, para minimizar o custo de operação e manutenção dos sistemas híbridos	Não aborda emissões de CO ₂
Fetanat e Khorasaninejad (2015)	Usa ILP baseada em otimização de colônias de formigas para atingir o menor custo no dimensionamento de um sistema de energia híbrido	Não aborda os custos relacionados ao TCO e as emissões de CO ₂
Dolara et al. (2017)	Utiliza PL e MILP com intuito de maximizar a captação de energia e diminuir custos operacionais de fontes renováveis	Não aborda as emissões de CO ₂
Zhang et al. (2017)	Uso de ILP para otimizar o dimensionamento de um sistema fotovoltaico	Não considera o número de inversores como quesito da otimização
Alsharif (2017a)	Utiliza o HOMER para dimensionar um sistema autônomo de energia solar para atender às redes celulares heterogêneas.	Não considera o número de inversores como quesito da otimização
Chedid e Sawwas (2019)	Usa algoritmo genético para otimizar o dimensionamento e localização ideal de painéis fotovoltaicos e das baterias.	Não aborda o TCO e emissões de CO ₂
Báez-Fernández, Ramírez-Beltrán e Méndez-Piñero (2016)	Utiliza PL para minimizar os custos de compra de inversores e painéis fotovoltaicos	Não aborda emissões de CO ₂ e custos operacionais
Okoye e Solyali (2017)	Utiliza ILP para determinação do número ideal de módulos fotovoltaicos e baterias	Não aborda emissões de CO ₂

1.4 Organização da Dissertação

Este trabalho de pesquisa está estruturado em cinco capítulos expressos da seguinte forma:

- O Capítulo 1 delinea o contexto no qual este trabalho está inserido, através de uma

breve introdução, trabalhos relacionados, motivações, objetivos e contribuições;

- O Capítulo 2 apresenta os principais conceitos acerca da CRA utilizada, assim como contextualização de sistemas fotovoltaicos, abordando seus componentes mais importantes, assim como o dimensionamento do sistema fotovoltaico. Por fim, conceitua-se a técnica de otimização ILP, trazendo a sua formulação e suas principais técnicas de resolução de problema.
- O Capítulo 3 aborda a metodologia proposta para a realização da minimização de inversores através da técnica ILP;
- O Capítulo 4 apresenta o estudo de caso e discute os resultados obtidos com o uso da técnica ILP;
- O Capítulo 5 discute as considerações finais e os trabalhos futuros que podem ser originados a partir deste trabalho.

2 Referencial Teórico

2.1 Considerações Iniciais

Este capítulo apresenta o referencial teórico necessário para o desenvolvimento desta pesquisa. Onde será apresentada uma visão geral sobre a quinta geração de redes móveis, destacando seus principais desafios. Logo em seguida, é realizada uma explanação sobre as características da Arquitetura de Rádio Centralizada, destacando seus componentes principais.

Posteriormente, é apresentado os conceitos fundamentais para a aplicação de sistemas fotovoltaicos em redes móveis, explicitando os componentes de um sistema conectado à rede, assim como como o seu dimensionamento. Posteriormente, é apresentado uma modelagem de custo, abrangendo os custos operacionais e de capital de um sistema fotovoltaico.

Por fim, é realizado um levantamento teórico sobre a técnica de otimização Programação Linear Inteira.

2.2 Quinta Geração de Redes Móveis

Atualmente, quando se fala em comunicações móveis tem sido inevitável a observação da necessidade de conexões cada vez mais expressivas. O tráfego de dados móveis cresceu substancialmente devido ao amplo uso de dispositivos que requerem o uso de mais dados, o que tem incentivado pesquisadores e projetistas de sistemas a desenvolver projetos de rede mais eficientes (AL-FALAHY; ALANI, 2017), como a próxima ou quinta geração (5G) de redes sem fio móveis.

De acordo com Hossain e Hasan (2015), quando se compara a 5G com as outras gerações de telefonia celular, a primeira apresenta características e vantagens atípicas, dentre as quais pode-se destacar:

- Melhor área de cobertura e alta taxa de dados na borda da célula;
- Baixo consumo de bateria, com uso de equipamentos mais inteligentes;
- Aproximadamente 1 Gbps de taxa de transferência de dados;
- Maior segurança;

- Eficiência energética e eficiência espectral.

Um dos principais desafios é atender a esses requisitos e, ao mesmo tempo, enfrentar a crescente pressão de custos. A eficiência e a escalabilidade refletem a necessidade de responder à explosão esperada do volume de tráfego e do número de dispositivos conectados. Diante disso, novas tecnologias, protocolos, infraestrutura e modelos de negócios estão sendo desenvolvidos e testados (OSSEIRAN et al., 2014). Dentre eles, pode-se citar a CRA que baseia-se na centralização, compartilhamento e melhor alocação de recursos de rede, resultando em reduzidos custos de implantação e operação (LU et al., 2014).

2.3 Arquitetura de Rádio Centralizada

A CRA é uma solução de infraestrutura de transporte originalmente proposta por Lu et al. (2014) que utiliza *small cells* em ambientes *indoor*, com o objetivo de prover acesso a várias antenas distribuídas com elevado grau de escalabilidade, podendo melhorar significativamente a capacidade do tráfego de dados e qualidade de serviço aos usuários finais.

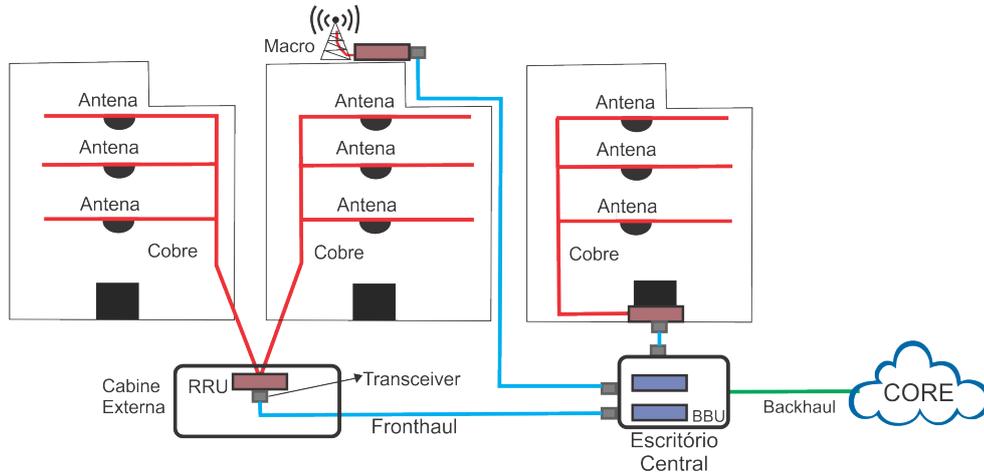
Na arquitetura CRA, o hardware responsável pelo processamento da banda base, o *Base Band Unit* (BBU), é transferido das estações base para um escritório central (CO - *Central Office*), onde é feito o compartilhamento de recursos computacionais, de forma que um grande grupo de Cabeças de Rádio Remoto (RRH - *Remote Radio Heads*) possa ser atendido de forma eficiente.

Como objeto de estudo desta proposta, considerou-se a abordagem de CRA de Tonini et al. (2016a) que além de considerar a complexidade da centralização das BBUs, também considera a centralização das RRUs em cabines externas. A Figura 3 apresenta o *fronthaul* da CRA, a qual é composta por 3 (três) componentes principais: (i) Antenas *indoor*; (ii) Unidades de rádio remoto (RRUs); (iii) BBUs (TONINI et al., 2016a).

As antenas *indoor* são ultracompactas e disponibilizam acesso sem fio de alta capacidade a uma área interna de 500 a 800 m². Além disso, são conectadas às RRUs, que por sua vez, realizam o processamento de sinais analógicos do rádio. A comunicação entre antena e RRU é realizada por meio de transmissão analógica através de um cabo de cobre padrão (por exemplo, cabo Ethernet Cat 5/6/7), o que possibilita a reutilização da infraestrutura de cobre existente dentro de um edifício.

As RRUs se conectam as BBUs, por meio de uma rede de fibra ótica, sendo este segmento de transporte denominado *fronthaul*. O *fronthaul* se utiliza de protocolos específicos para comunicação, tais como *Common Public Radio Interface* (CPRI), *Open Base Station Architecture Initiative* (OBSAI) e *Open Radio Interface* (ORI). Estes protocolos são responsáveis por garantir a transmissão dos componentes dos sinais em fase

Figura 3: Representação da Arquitetura CRA.



Fonte: Adaptado de Tonini et al. (2016a).

e em quadratura (I/Q), controle e sincronismo entre as unidades de rádio (CHECKO; HOLM; CHRISTIANSEN, 2014). Como principais benefícios dessa estrutura pode-se citar: aproveitamento mais expressivo dos recursos, gerência e operação das redes, aumento de cooperação entre as estações de base, economia no consumo energético, virtualização, dentre outros (CHEN; DUAN, 2011).

As BBUs são colocadas em um CO também chamado de BBU Hotel. Em um BBU Hotel, é possível compartilhar recursos de BBU entre RRUs e macro BSs para obter um melhor desempenho de rádio e reduzir o número de sites que uma operadora precisa. Além disso, a junção de todas as BBUs no mesmo site permite compartilhar o fornecimento de energia, resfriamento e equipamentos de rede de interconexão (CHECKO et al., 2015).

2.3.1 Dimensionamento de Rádio

O dimensionamento de rádio consiste nas definições do número de *small cells indoor* e macro *BSs outdoor* a serem implantadas de acordo com a demanda média de tráfego de dados. Assim, dentre os trabalhos presentes na literatura que tratam dessa estimativa, nesta pesquisa será abordado o de Fiorani et al. (2016).

Diante disso, para a estimativa da demanda média de tráfego móvel (Mbps/km²), pode-se considerar a Eq. (2.1):

$$\tau_b = \rho \cdot \alpha \sum_k r_k \cdot s_k, \quad (2.1)$$

onde ρ e α correspondem à densidade de usuários e a porcentagem de usuários ativos, ao passo que r_k é a taxa de dados média gerada por um terminal do tipo k e s_k é a fração média de usuários que utilizam um terminal de tipo k . De maneira análoga a Auer, Blume e Giannini (2010) e Fiorani et al. (2016), são considerados diferentes tipos de terminais

k , tais como PCs, *smartphones* e *tablets*. Os usuários são classificados de acordo com o perfil de tráfego pesado (*heavy*) e comum (*ordinary*), em que o uso de dados com perfil pesado é mais intenso que no perfil comum. Assim, considerando-se que h representa a porcentagem de usuários classificados com perfil pesado, a demanda média de tráfego por terminais do tipo k , pode ser definida conforme a Eq. (2.2):

$$r_k = \frac{[h \cdot r_k^{heavy} + (100 - h) \cdot r_k^{ordinary}]}{100}, \quad (2.2)$$

onde r_k^{heavy} e $r_k^{ordinary}$ representam a média de tráfego gerado por um usuário pesado e comum, respectivamente.

Para a definição do quantitativo de antenas, há a dependência de uma taxa de penetração (η), da parcela de prédios e número de andares equipados com as antenas. Desta forma, o número de *small cells indoor* pode ser calculado como mostrado na Eq. (2.3):

$$N_a = N_b \cdot N_f \cdot \eta, \quad (2.3)$$

onde N_b representa o número de prédios do cenário e N_f o número fixo de andares dos prédios. O parâmetro η varia dentro do intervalo [0-1]. O restante dos usuários (*outdoor*), são atendidos pela BS, cujo número pode ser calculado conforme a Eq. (2.4):

$$N_m = \frac{\rho \cdot A \cdot \alpha \cdot (1 - \eta \cdot I)}{N_{users/BS}}, \quad (2.4)$$

onde $N_{users/BS}$ consiste no número de usuários ativos que possuem a possibilidade de serem atendidos concomitantemente pela macro BS, I representando a taxa de usuários *indoor* e A a área do cenário considerado. Este termo é calculado conforme:

$$N_{users/BS} = \frac{C_m}{r}, \quad (2.5)$$

onde C_m corresponde a capacidade de atendimento da macro BS, sendo calculada de acordo com Kelif, Coupechoux e Godlewski (2010). Já $r = \sum_k \cdot r_k \cdot s_k$ expressa a taxa de dados média exigida por usuário ativo.

2.4 Sistema Fotovoltaico

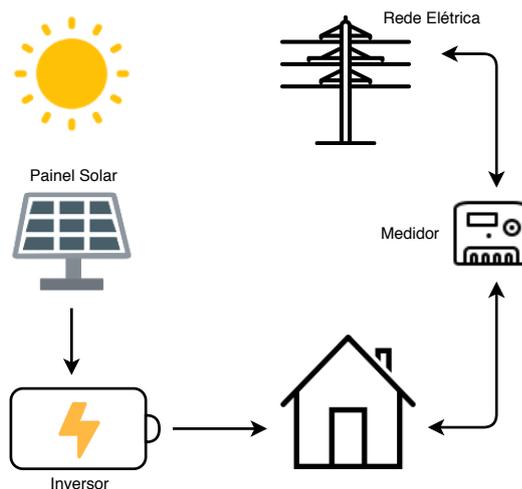
Sistemas fotovoltaicos são sistemas de geração de energia que utilizam o sol como fonte primária de energia. Por meio dos módulos fotovoltaicos e devido ao efeito fotovoltaico, eles são capazes de captar a radiação solar e a transformar em energia elétrica.

Lopez (2012) classifica os sistemas fotovoltaicos em três categorias distintas: sistema isolado ou autônomo (*Off-Grid*), sistema conectado à rede elétrica (*On-Grid*) e sistema híbrido. Para este trabalho será abordado o sistema conectado à rede elétrica.

2.4.1 Componentes do Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede

Sistemas fotovoltaicos conectados à rede, atuam de forma simultânea com a rede elétrica. Geralmente são empregados em locais já atendidos por energia elétrica e por não possuírem dispositivos de armazenamento de energia, o sobressalente de energia produzida pelo sistema é inserido na rede elétrica. A Figura 4 representa a estrutura básica de um

Figura 4: Representação Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede.



Fonte: Elaborada pela autora.

sistema *On-Grid*, contendo os seguintes componentes: painel, que consiste em um conjunto de módulos fotovoltaicos, que irão gerar a energia; um grupo de inversores, que irão fazer a conversão de corrente contínua para corrente alternada para conexão à rede elétrica; e o medidor bidirecional de energia elétrica.

2.4.1.1 Módulo Fotovoltaico

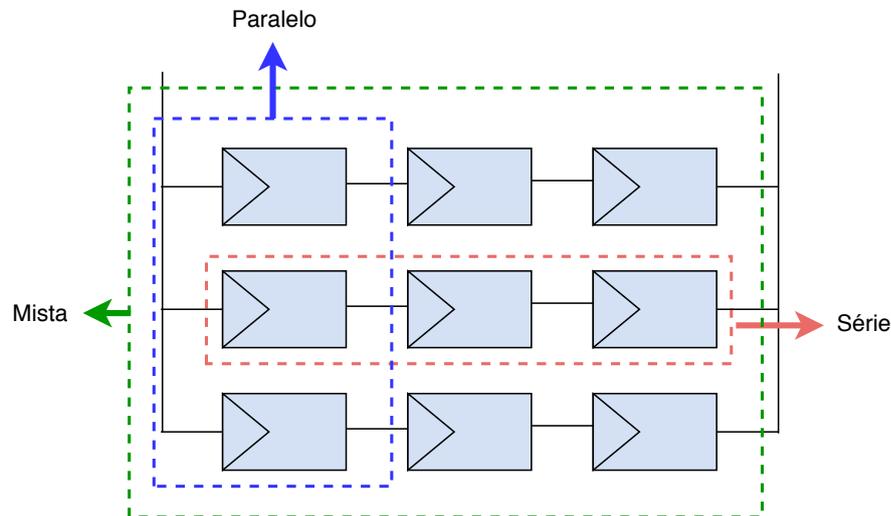
Os módulos fotovoltaicos são equipamentos que produzem energia a partir da conversão da energia solar em energia elétrica, essa conversão é possível através das células solares que compõem esses módulos (VIEIRA, 2018).

A energia elétrica gerada pelos módulos é em corrente contínua (CC). Além disso, eles são projetados para serem utilizados sob os mais diversos eventos climáticos, tais como sol, chuva, neve, granizo, vento, entre outros, e mesmo assim funcionar satisfatoriamente nestas condições por períodos de 30 anos ou mais. Em virtude a essas e outras particularidades, um módulo fotovoltaico típico é formado por diversas camadas (TOLMASQUIM, 2016; ZILLES et al., 2012), tais como moldura de alumínio, selante, vidro, encapsulante, células fotovoltaicas e *backsheet*.

De acordo com Torres (2012), a conexão entre módulos pode ser realizada de três formas: ligações em série, em paralelo ou em uma combinação série-paralelo, de

forma a se atingir os valores almejados de corrente e tensão. A Figura 5 exemplifica essas possibilidades de conexões.

Figura 5: Representação Tipo Conexão Módulos Fotovoltaicos.



Fonte: Adaptado de Cortez (2013).

A associação em série possibilita alcançar maiores tensões ao mesmo tempo que se mantêm a corrente estipulada do módulo. Já a associação em paralelo, ocorre o inverso; há a possibilidade de maiores correntes ao passo que se mantêm a tensão estipulada do módulo.

Além disso, os módulos fotovoltaicos dispõem de um rendimento prático moderadamente baixo, cerca de 8% a 21%. Isso devido não apenas a alguns aspectos físicos de sua composição, mas também das condições externas de operação como a temperatura, a radiação solar, o ângulo de incidência no painel, espectro solar e fenômenos de convecção (PACHECO, 2014).

As propriedades elétricas dos módulos fotovoltaicos são comumente estimadas em virtude de sua potência máxima de saída, sob condições padrão de ensaio (STC - *Standard Test Conditions*), que determinam uma radiação solar de 1000 W/m^2 , com temperatura da célula fotovoltaica mantida em 25°C e uma distribuição espectral padrão para massas de ar (AM - *Air Mass*) de 1,5 (VIEIRA, 2018; SOUZA, 2017).

Em relação ao processo de instalação dos módulos fotovoltaicos em edificações, dentre as diversas alternativas disponíveis, destaca-se a opção de instalação na cobertura das edificações ou em suas fachadas, dependendo do projeto arquitetônico da edificação e da área disponível para aplicação.

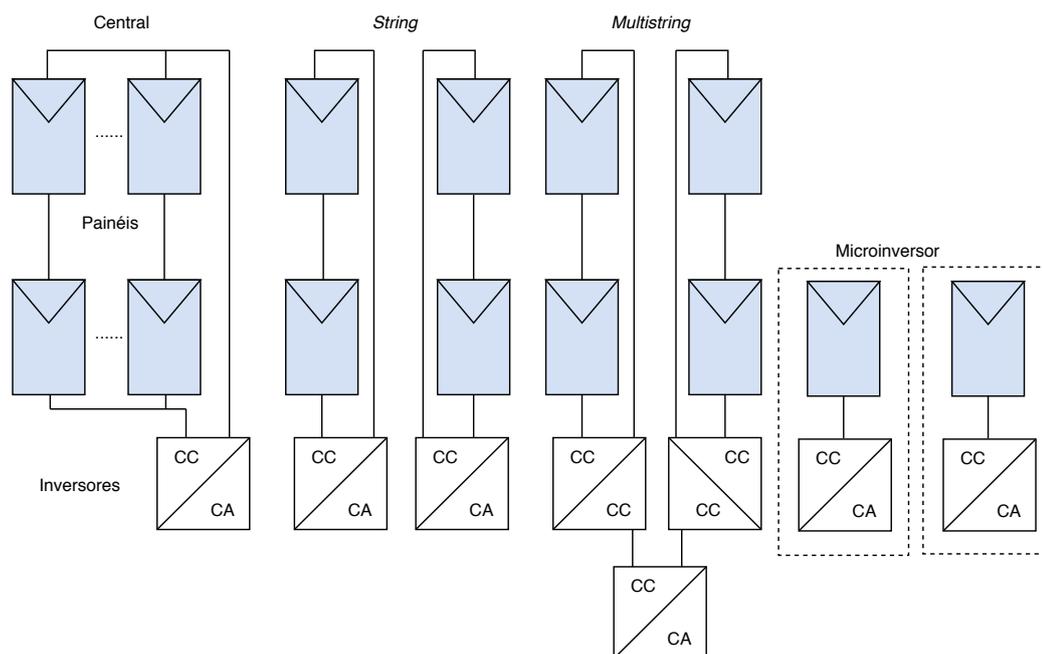
2.4.1.2 Inversor

O inversor é o dispositivo eletroeletrônico responsável pela conversão da energia de corrente contínua (CC) dos módulos fotovoltaicos em energia de corrente alternada (CA) a ser cedida para a rede (VIEIRA, 2018).

Além da conversão CC-CA, os inversores também são responsáveis pelo gerenciamento da energia entregue à rede e pelo Seguimento do Ponto de Máxima Potência (MPPT - *Maximum Power Point Tracking*). O MPPT é um processo de controle no qual o inversor procura manter o módulo fotovoltaico operando em uma região da sua curva característica na qual o produto entre corrente e tensão tenha o seu valor máximo, de forma a otimizar a extração de potência do gerador fotovoltaico (PRIEB, 2012).

Tolmasquim (2016) categoriza os inversores, dos sistemas conectados à rede, em quatro tipos distintos: inversores centrais, microinversores, *string* e *multistring*. Pela Figura 6 é possível observar os tipos de inversores e suas possibilidades de conexões.

Figura 6: Tipos de Inversores.



Fonte: Adaptado de Kjaer, Pedersen e Blaabjerg (2005).

Os Inversores centrais são delineados 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 . Em se tratando dos microinversores, estes destinam-se a atender módulos fotovoltaicos de forma individual, intensificando a produção de cada um.

Os inversores *strings* são inversores monofásicos e possuem apenas uma entrada de MPPT, compatível somente com instalações de microgeração de até $10 kWp$. Os inversores

multistring podem ser monofásicos ou trifásicos, composto de várias entradas independentes com MPPT para conexão de uma série de módulos. São apropriados para instalações urbanas, nas quais, cada série de módulos pode estar sujeita a diferentes condições de irradiância e/ou sombreamento (SOUZA, 2017).

2.4.1.3 Medidor Bidirecional

O medidor bidirecional é utilizado para realizar a conexão entre o inversor e a rede elétrica. Nele estão inclusos os equipamentos necessários e capazes de medir a energia elétrica em *kWh* disponibilizada e consumida da rede elétrica, operando bidirecionalmente.

Esse sistema de medição em duas direções é chamado sistema de *net metering*, ou ainda, sistema de compensação de energia para geração de energia solar, que consiste no processo da energia extra gerada pela unidade consumidora a ser comercializada à concessionária por um valor menor que o exigido ao consumidor (ROSA, 2016), além disso a concessionária atuará armazenando o excedente de energia gerada pelo sistema fotovoltaico e por conseguinte recompensando o usuário com o consumo de energia elétrica ativa dessa mesma unidade consumidora ou outra unidade, no entanto que seja de um mesmo proprietário.

Diante disso, o processo de medição bidirecional estimula os consumidores de energia elétrica a propagar a geração distribuída, e ainda traz vantagens como eficiência no consumo de energia, oportunidade de atendimento remoto por parte da concessionária, melhor monitoramento da rede pela distribuidora e principalmente a redução de perdas técnicas e não-técnicas de transmissão e distribuição de energia, entre outros (ANEEL, 2012).

Os medidores são instalados conforme a regulamentação da concessionária de energia elétrica do local e geralmente estão localizados no padrão de entrada CA e ponto de interconexão com a da rede elétrica (MELO, 2014). Os medidores bidirecionais mais aprimorados contam com recursos como o acompanhamento da geração e do consumo de energia elétrica em tempo real, por meio de relatórios e aplicativos.

2.4.1.4 Cabeamento

Os elementos do sistema fotovoltaico devem ser projetados com cuidado no estágio de instalação para minimizar as perdas do sistema e maximizar a energia de saída. Sendo de suma importância a medição e análise de perdas devido a poeira, sujeira, sombreamento, inversores e cabos utilizados nos sistemas fotovoltaicos. As perdas nos cabos causam perda de energia nos sistemas fotovoltaicos e também afetam negativamente o custo econômico do sistema (EKICI; KOPRU, 2017).

Diante disso, os cabos usados para a instalação elétrica de um sistema fotovoltaico

devem atingir os requisitos mínimos para esta aplicação. Neste trabalho será abordado apenas os cabos do lado CC, que caracterizam-se por estabelecer a ligação elétrica entre os módulos individuais e a caixa de junção da fileira, e assim conectados ao devido lado CC do inversor (MELO, 2014).

Para calcular a taxa de perda de energia do cabo pode-se utilizar a Eq. (2.6), conforme apresentado em (EKICI; KOPRU, 2017):

$$T_{loss} = \frac{2 \cdot L \cdot I}{k \cdot S \cdot U} \cdot 100, \quad (2.6)$$

onde L representa o comprimento do cabo de ligação entre painel e inversor, sendo calculado usando a Geometria Taxicab que considera a distância entre dois pontos como a soma das distâncias em cada uma das dimensões espaciais (TONINI et al., 2016b). Em adição, I representa a corrente contínua dos painéis conectados ao inversor (A), k representa a condutância elétrica do cobre (S.m/mm²), enquanto que S denota a seção do cabo usado (mm²) e U descreve a saída de tensão dos painéis (V).

2.4.2 Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico

O dimensionamento do sistema fotovoltaico vem sendo tratado em muitas pesquisas (TORRES, 2012; PAIVA, 2018; SOUZA, 2017), para este trabalho será considerado o trabalho de Souza (2017) que apresenta a formulação necessária para o dimensionamento de um sistema fotovoltaico de forma a atender a demanda energética de uma arquitetura de rede móvel centralizada.

Assim a geração total de energia elétrica, em acréscimo ao consumo mínimo franqueado a partir da rede elétrica convencional, expressa em kWh , é apresentada pela Eq. (2.7):

$$E_g = N_i \cdot E_i \quad (2.7)$$

onde N_i corresponde ao número de inversores, podendo ser representado pelo quociente do consumo total da rede pela energia gerada diariamente pelo inversor, expressa pela Eq. (2.8):

$$E_i = \eta_i \cdot N_{pi} \cdot E_p \quad (2.8)$$

onde η_i representa a eficiência energética do inversor que varia entre $[0;1]$. N_{pi} e E_p correspondem, respectivamente, ao número de módulos que podem ser conectados a um inversor

e a energia elétrica gerada por um módulo fotovoltaico.

$$N_{pi} = \frac{P_i \cdot t_s}{E_p} \quad (2.9)$$

onde P_i é a potência de entrada do inversor em kW e t_s é o tempo médio diário de exposição da placa fotovoltaica ao sol. A Energia gerada pelo módulo é expressa pela Eq. (2.10):

$$E_p = A_p \cdot \eta_p \cdot r_s \cdot t_{loss} \quad (2.10)$$

onde A_p , η_p e r_s caracterizam, respectivamente, a área de um módulo fotovoltaico (m^2), a taxa de eficiência do módulo para conversão da radiação solar incidente em energia elétrica, com intervalo de $[0;1]$, a intensidade de radiação solar incidente diária ($kWh/m^2 \cdot dia$). Já t_{loss} consiste na taxa de perda de desempenho do módulo fotovoltaico anualmente, diminuindo dentro do intervalo de $[0,8;1]$.

Além do dimensionamento do sistema fotovoltaico Souza (2017) apresenta também a estimativa do quantitativo de emissões de CO_2 evitadas por usuário com o uso do sistema fotovoltaico, conforme Eq. (2.11):

$$E_{CO_2} = \frac{E_m \cdot F_{CO_2}}{\rho \cdot A} \quad (2.11)$$

onde F_{CO_2} corresponde ao fator de emissão de CO_2 , trazendo a quantidade de emissões de CO_2 (kg) que deixaram de ser lançadas na atmosfera, por kWh, e por conseguinte de consumir da rede convencional de energia elétrica, em função da energia elétrica gerada pelos módulos fotovoltaicos.

2.5 Custo Total de Propriedade

O Custo Total de Propriedade é uma análise usada para avaliar os prós e contras econômicos de uma determinada tecnologia e para avaliar a viabilidade de um possível investimento (LEVANTESI; MELLO, 2018). Geralmente está associado à forma de lidar com os custos reais atribuídos à propriedade e gerenciamento de infraestrutura de telecomunicações, abordando de forma ampla o custo de capital inicial, os custos operacionais, entre outros componentes que completam uma estimativa de custo base (LI et al., 2009).

Além de ser empregado em projetos no contexto de telecomunicações (SOUZA et al., 2017; LEVANTESI; MELLO, 2018; PAVAN; LUGHI; SCORRANO, 2019; SOUZA, 2017), o TCO também pode ser aplicado no projeto de sistema fotovoltaico, dado a importância de analisar sua viabilidade técnica e econômica. Assim, nesta seção é apresentado a modelagem do custo total de propriedade de um sistema fotovoltaico, apresentado em

Souza (2017) para a abordagem de arquiteturas heterogêneas. O TCO, consiste no somatório das métricas CAPEX e OPEX, conforme expresso na Eq. (2.12):

$$TCO = CAPEX + OPEX \quad (2.12)$$

O CAPEX relaciona-se às despesas de capital inicial e o OPEX, com os custos de operacionais.

2.5.1 Despesas de Capital

O CAPEX é obtido pela soma dos custos de aquisição e instalação de equipamentos fotovoltaicos, tais como módulos, inversores e kits de fixação. O CAPEX é especificado pela Eq. (2.13):

$$CAPEX = (1 + tx_i) \cdot C_{eq}, \quad (2.13)$$

onde tx_i e C_{eq} representam a taxa de instalação, expressa no intervalo $[0, 1]$ e o custo de aquisição dos equipamentos fotovoltaicos, respectivamente. O custo de aquisição dos equipamentos fotovoltaicos é expresso pela Eq. (2.14):

$$C_{eq} = \sigma \cdot [N_p(C_p + C_k) + N_i \cdot C_i] \quad (2.14)$$

onde N_p denota o número de painéis fotovoltaicos e N_i o número de inversores. Enquanto que C_p , C_k , C_i correspondem, respectivamente, ao custo unitário do painel, do kit de fixação dos painéis e do inversor. Já σ , caracteriza o processo de barateamento dos custos de compra dos equipamentos fotovoltaicos, variando em um intervalo de 0,6 a 1.

2.5.2 Despesas de Operação

O OPEX contém despesas relacionadas à operação e manutenção da estrutura fotovoltaica, sendo composto principalmente por três categorias de custo: (i) energia elétrica da concessionária, (ii) manutenção dos equipamentos fotovoltaicos; e (iii) aluguel de espaço físico para instalação das placas. Assim, o OPEX é definido conforme a Eq. (2.15):

$$OPEX = C_m + N_{md}(C_{md} + C_g \cdot C_{kW}) + N_p \cdot A_p \cdot C_a, \quad (2.15)$$

onde C_m , C_{md} , C_g , C_{kW} , C_a representam respectivamente os custos relacionados a manutenção da infraestrutura, instalação dos medidores, consumo mínimo de energia proveniente da rede elétrica convencional, compra de 1 kWh e aluguel por m² dos telhados dos prédios onde os painéis estão instalados. Já as variáveis N_{md} , N_p e A_p consistem, no

número de medidores bidirecionais, número total de painéis fotovoltaicos utilizados na arquitetura e a área de um único painel, respectivamente. Considerou-se que o número de medidores bidirecionais é igual ao número de inversores utilizados.

O custo referente a manutenção é mostrado pela Eq. (2.16):

$$C_m = t_m \cdot [N_p \cdot (C_p \cdot N_{mp} + C_k \cdot N_{mk}) + N_i \cdot C_i \cdot N_{mi}], \quad (2.16)$$

onde t_m é a taxa de manutenção recebida pelos equipamentos, já N_{mp} , N_{mk} , N_{mi} retratam o número de manutenção dos painéis, kits e inversores, respectivamente. N_p e N_i correspondem ao número de painéis e inversores do sistema. C_p , C_k e C_i mostram os custos de aquisição dos painéis, kits e inversores.

O número de manutenções dos equipamentos fotovoltaicos é expressa conforme Eq. (2.17):

$$f(m_x) = \begin{cases} t - p, & t > p_x \\ 0, & t \leq p_x \end{cases} \quad (2.17)$$

Assim, o número de manutenção dos inversores (N_{mk}) corresponde ao número de manutenção dos kits (N_{mi}), que por sua vez é expressa por $f(m_x)$, de forma que $x \in \{kits, inversores\}$. Para os painéis, a manutenção é contabilizada de forma anual, sendo representada por $N_{mp} = t$.

2.5.3 Economia Financeira do Usuário

A economia financeira do usuário caracteriza-se pela energia elétrica sobressalente (E_e) produzida pelo sistema fotovoltaico que é comercializada à concessionária. A Eq (2.18) descreve como é realizada a obtenção economia financeira do usuário.

$$E_u = \frac{[E_e \cdot C_v + C_t \cdot C_c] - TCO}{\rho \cdot A}, \quad (2.18)$$

onde C_v e C_c representam os preços de venda e aquisição de um kWh, respectivamente. Além disso, ρ traz a densidade populacional (usuários/ km^2), A representa o tamanho da área residencial (km^2) e TCO corresponde aos custos de CAPEX e OPEX do sistema fotovoltaico, representado pela Eq. (2.12).

2.6 Programação Linear Inteira

A otimização caracteriza-se como o processo de transformar um sistema tão eficiente quanto possível. Problemas que precisam de otimização são comuns em inúmeras áreas do conhecimento e, quando delineados matematicamente, podem ser resolvidos por

técnicas de otimização (COUTINHO, 2013). Existem variadas técnicas para a solução de problemas de otimização, tais como: Programação Linear, Programação Não Linear, Algoritmos Genéticos, dentre outras.

A Programação Linear busca encontrar a melhor solução para problemas que tenham seus modelos representados por expressões lineares. Geralmente esses problemas buscam a maximização dos lucros ou a minimização dos custos, para isso usa-se uma função linear, chamada de função objetivo e restrições, que são compostas de equações e/ou inequações.

Uma das vertentes da Programação Linear é a Programação Linear Inteira, também conhecida como Programação Inteira (PI). Um problema de PI pode ser entendido como um problema de programação matemática no qual a função objetivo, assim como as restrições, são lineares, entretanto uma ou mais variáveis de decisão podem apenas assumir valores inteiros (BRITO, 2015). Assim, problemas de PI podem ser categorizados em (ALVES; DELGADO, 1997):

- Programação Inteira Pura: todas as variáveis de decisão representam valores inteiros;
- Programação Inteira Mista: existem variáveis de decisão de caráter inteira e reais no mesmo problema;
- Programação Inteira com variáveis binárias: onde todas as variáveis assumem valores 0 ou 1.

Formalmente, a representação matemática de um problema de Programação Linear Inteira pode ser expresso da seguinte forma (BRITO, 2015):

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimize (ou Maximize)} && c^T x + h^T y \\
 & \text{Sujeito a:} && Ax + G_y \leq b \\
 & && x \geq 0, y \geq 0 \\
 & && x \in \mathbb{Z}^n, y \in \mathbb{R}^p
 \end{aligned} \tag{2.19}$$

onde x simboliza um grupo de variáveis de decisão inteiras de tamanho n , submetidas a um vetor de custos c , e y um conjunto de variáveis de decisão contínuas de tamanho p , submetidas a um vetor de custos h .

A função que está sendo maximizada (minimizada) denomina-se função objetivo e refere-se a vinculação entre o objetivo do problema e as variáveis controláveis. Assim, chama-se otimização da função, quando há a determinação dos valores destas variáveis de forma a maximizar (minimizar) o valor da função objetivo (SILVA; PALHARES, 2016).

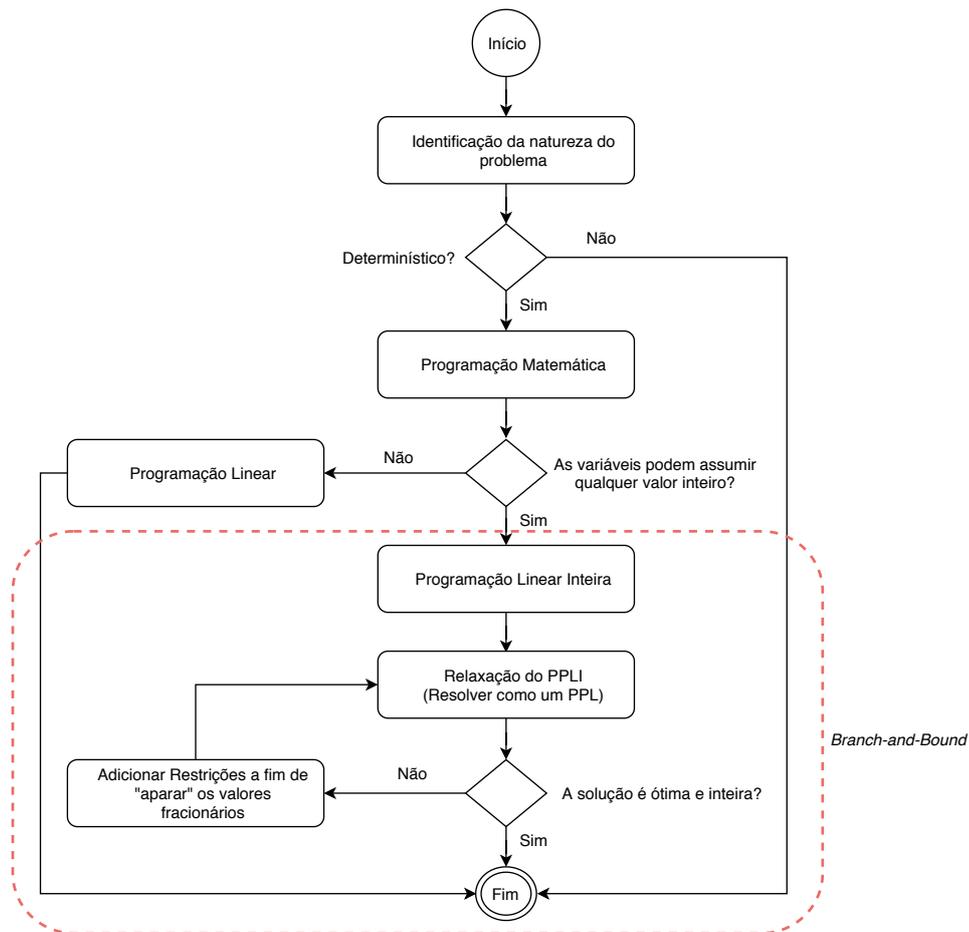
As restrições são as limitações do problema e consistem na insuficiência ou demasia de recursos, por meio delas é possível definir, por exemplo, o caminho mais curto ou

com maior fluxo, a demanda a ser atendida, entre outros. Os valores que as variáveis podem assumir são limitados e expressos por equações e/ou inequações (STACHELSKI; TAGLIALENHA; FERNANDES, 2015).

A modelagem de problemas de PI assemelha-se à de Programação Linear, no entanto a solução de modelos de PI é mais complexa. Essa complexidade deriva do fato de que grande parte dos problemas de programação inteira são identificados como *NP-Hard*, que são caracterizados pelo extenso número de soluções viáveis que devem ser analisadas (HILLIER; LIEBERMAN, 2006).

Diante disso, a potencialidade do uso desse modelo deriva do fato de muitos problemas práticos, atividades e recursos serem indivisíveis. Algumas soluções demandam a determinação das decisões sim-não, que podem ser consideradas como os valores 0-1 de variáveis inteiras, assim, restritas. Além disso, a maior parte dos problemas de otimização de natureza combinatória podem ser desenvolvidos como programas inteiros (LONGARAY; DAMAS, 2013).

Figura 7: Fluxograma *Branch-and-Bound*.



Fonte: Adaptado de Santos et al. (2017).

Goldberg e Luna (2005) classificam as técnicas de solução de problemas de progra-

mação inteira em três grupos: técnicas de enumeração (*Branch-and-Bound* e enumeração implícita); técnicas de corte (cortes inteiros, cortes combinatórios, cortes de interseção); e técnicas híbridas (*Branch-and-Cut*, teoria de grupo). Dentre estas técnicas, a *Branch-and-Bound* tem seu funcionamento demonstrado pela Figura 7.

2.7 Considerações do Capítulo

Este capítulo abordou conceitos importantes sobre 5G, arquitetura de rádio centralizada, dimensionamento da rede de rádio, através da previsão de tráfego.

Complementarmente, conceitos sobre sistemas fotovoltaicos foram abordados, trazendo seus principais componentes, a formulação necessário para realizar o seu dimensionamento, além da formulação do quantitativo de emissões de CO₂ evitadas e despesas operacionais e de capital.

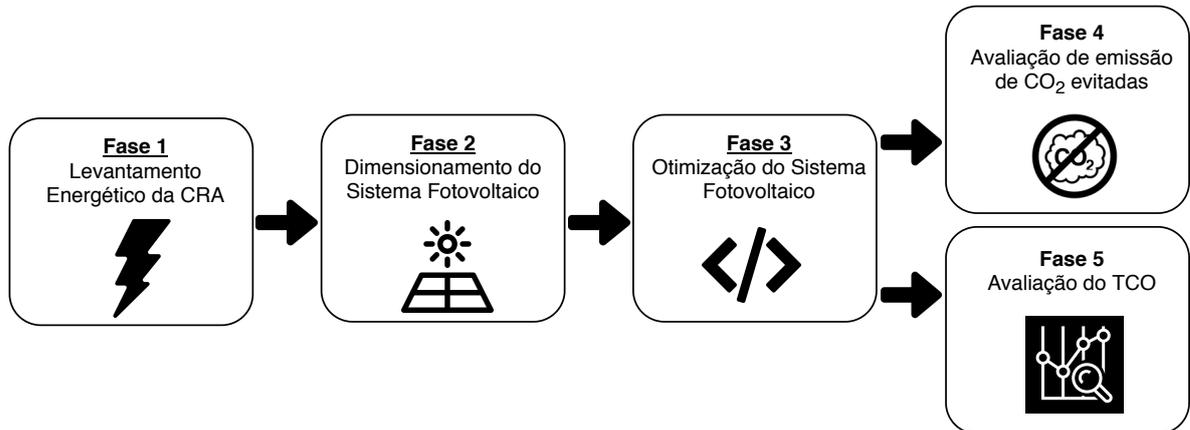
Posteriormente, foi relatado as particularidades da técnica de otimização Programação Linear Inteira, explanando sobre os seus principais tipos, sua formulação matemática e principais técnicas para resolução de problemas de Programação Inteira.

3 Metodologia

3.1 Considerações Iniciais

Após contextualizar a atuação e foco desta dissertação, assim como a apresentação das principais tecnologias, abordadas nos capítulos anteriores, este capítulo objetiva apresentar a metodologia de pesquisa adotada no desenvolvimento deste estudo. A Figura 8, apresenta as cinco etapas que representam o processo de desenvolvimento deste trabalho.

Figura 8: Visão Geral das fases da Metodologia.



Fonte: Elaborada pela autora.

Na Fase 1 é realizado o levantamento energético requerido pela CRA no contexto da abordagem RRUP. Para isso, utilizou-se as seguintes subetapas retiradas de Fiorani et al. (2016), porém adaptado em um contexto CRA: (i) Previsão de tráfego, (ii) Dimensionamento da rede de rádio, e (iii) Avaliação do consumo de energia. Na previsão de tráfego utilizou-se os seguintes parâmetros: densidade de usuários, porcentagem de usuário ativos, a taxa de dados médias gerada pelos terminais e fração média de usuários que utilizam os terminais. No dimensionamento da rede de rádio usou-se a taxa de penetração, o número de prédios e seus respectivos andares, a densidade de usuários, a área, a porcentagem de usuários *indoor* e do quantitativo de usuários ativos por macro. Na Avaliação do consumo de energia empregou-se as potências dos seguintes equipamentos, em função do tempo: RRUs, macro BSs *transceivers*, BBUs e refrigeração do CO. A partir disso é possível obter-se a potência relacionada a CRA, assim como o quantitativo total de equipamentos, sendo factível estimar o volume de energia necessário para o atendimento de tal arquitetura.

A partir do levantamento energético estimado da CRA, é possível realizar o dimensionamento inicial da geração de energia fotovoltaica necessária para atender esta arquitetura, conforme a Figura 8 e Fase 2. Essa fase teve como entrada os recursos necessários para o dimensionamento do sistema fotovoltaico, tais como área, eficiência e energia gerada por um painel, irradiação solar diária, tempo de exposição ao sol, potência de entrada e eficiência do inversor. Além do dimensionamento, adiciona-se ao cenário as possíveis localizações dos inversores nos prédios.

A etapa seguinte, Fase 3, é usada para o desenvolvimento da formulação do problema de minimização de custo através da minimização do número de inversores através da técnica ILP. Apresenta como entrada o cenário especificado na fase anterior de dimensionamento do sistema fotovoltaico, e de forma mais específica, o quantitativo de painéis e inversores, assim como suas possíveis localizações no cenário. Para atingir o objetivo de minimização algumas restrições foram consideradas, tais como o pressuposto de que todo painel deve estar conectado a um inversor, e ainda, que um inversor em determinada localização deve conectar todos os painéis atribuídos a ele.

Por fim, a Fase 4 elabora uma estimativa acerca do volume de emissões de CO₂ evitadas no meio ambiente, que consiste no produto da energia mínima gerada pelo sistema fotovoltaico pelo fator de emissão de CO₂ que deixaram de ser liberados na atmosfera, dividido pelo produto da densidade de usuários pela área. Ao passo que a Fase 5 contempla uma análise sobre os custos operacionais (energia elétrica proveniente da concessionária, manutenção dos equipamentos e aluguel de espaço para instalação dos painéis) e de capital que consiste na aquisição e instalação de equipamentos fotovoltaicos básicos (painéis, inversores e kits de fixação). Ambas as fases consideram dados da fase de geração de energia fotovoltaica otimizada na fase anterior.

Nas próximas seções serão apresentadas, de forma mais detalhada, como cada uma dessas fases foram efetivamente desenvolvidas.

3.2 Fase 1: Levantamento do Consumo de Energia da CRA

Esta fase é subdividida em 3 (três) outras subetapas, adaptadas de Fiorani et al. (2016) ao contexto da CRA: a previsão de tráfego, que gera a demanda mínima de energia que deverá ser suprida pelo sistema fotovoltaico; o dimensionamento de rádio da arquitetura, gerando o número de antenas *indoor* e macros do cenário; e, por último, são realizadas as estimativas de consumo de energia da CRA, com base nos equipamentos de rede da referida arquitetura. Na Figura 9 é possível observar as subetapas desta fase assim como os parâmetros necessários para a efetivação de cada uma delas.

A formulação necessária às duas primeiras subetapas são apresentadas no Capítulo 2. Em relação ao consumo de energia da CRA (C_{CRA}^{total}), expresso em *kWh*, pode ser

Figura 9: Subetapas do Levantamento do Consumo Energético da CRA.



Fonte: Elaborada pela autora.

calculado conforme a Eq. (3.1):

$$C_{CRA}^{total} = P_{CRA}^{total} \cdot t, \quad (3.1)$$

onde P_{CRA}^{total} e t representam, a potência total (kW) e o período de funcionamento dos equipamentos que integram a CRA (h), respectivamente. A potência total de uma CRA (P_{CRA}^{total}) é obtida a partir da soma das potências dos equipamentos que compõe o *fronthaul*, conforme descrito pela Eq. (3.2):

$$P_{CRA}^{total} = P_{CO} + P_{RRU} + P_{Antenas}^{indoor} + P_{Macro}, \quad (3.2)$$

onde P_{CO} representa a potência total gerada pelos equipamentos hospedados no CO, que pode ser calculado conforme a Eq. (3.3):

$$P_{CO} = P_g + P_{BBU}, \quad (3.3)$$

onde P_g representa a potência de refrigeração do CO, enquanto que o termo $P_{BBU} = \sum_{b=1}^n P_b$ simboliza a potência dos equipamentos BBUs. Ainda conforme a Eq. (3.2), o termo P_{RRU} representa a potência dos equipamentos RRUs, que pode ser expresso pela seguinte Eq. (3.4).

$$P_{RRU} = \sum_{r=1}^n (P_r + 2 \cdot P_t), \quad (3.4)$$

onde P_r denota a potência de uma RRU, enquanto que P_t representa a potência de um *transceiver* óptico.

Ainda de acordo com a Eq. (3.2), a potência das antenas *indoor* é dada conforme o termo $P_{Antenas}^{indoor} = \sum_{a=1}^n P_a$, enquanto que P_{Macro} denota a potência das estações base macro na área e pode ser determinado conforme a Eq. (3.5):

$$P_{Macro} = \sum_{m=1}^n (P_m), \quad (3.5)$$

onde P_m denota a potência de uma estação base macro.

Após realizar-se o levantamento de energia requerido pela CRA é possível dimensionar o quantitativo inicial de equipamentos fotovoltaicos necessários para suprir o consumo energético desta arquitetura, conforme demonstrado a seguir.

3.3 Fase 2: Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico

A Fase 2, contempla o dimensionamento do sistema Fotovoltaico, tomando por base fundamentações analíticas apresentadas no Capítulo 2, que neste caso, são utilizadas para calcular o quanto de energia fotovoltaica é necessária para suprir a demanda energética de uma CRA, e diante disso, dimensionar o quantitativo de equipamentos que atendem tais especificações de consumo. Os parâmetros necessários para este dimensionamento inicial é mostrado na Figura 10.

Figura 10: Parâmetros para a geração do dimensionamento.

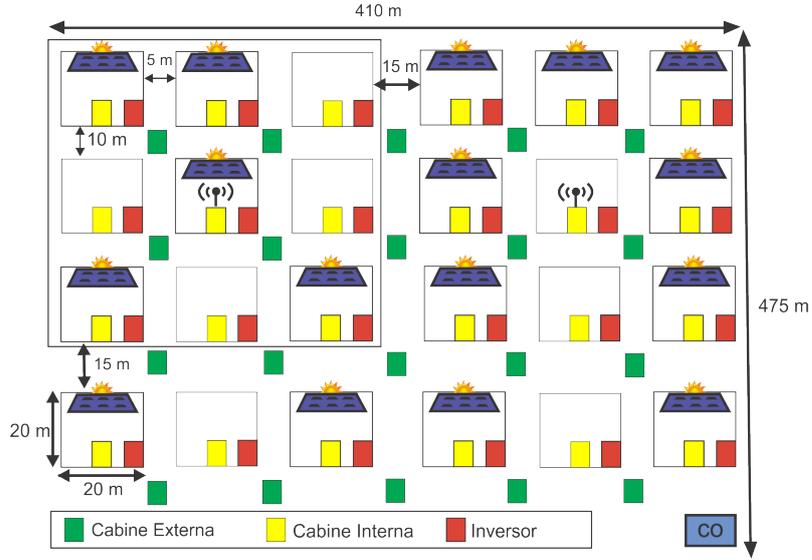


Fonte: Elaborada pela autora.

Assim, analisa-se a implantação ideal de um sistema fotovoltaico em uma área residencial, onde assumimos um cenário CRA *greenfield* (TONINI et al., 2016b). A Figura 11 apresenta uma vista do topo de cima da área que está sendo levada em consideração. Os blocos brancos representam os edifícios de uma dada área residencial, os blocos verdes e amarelos trazem todas as possíveis localizações de RRU, que podem ser cabines internas ou externas ao prédio.

De acordo com o dimensionamento inicial, os painéis são distribuídos nas coberturas de alguns prédios, no caso os mais altos, de modo a haver uma melhor captura de

Figura 11: Cenário considerado no estudo.



Fonte: Elaborada pela autora.

radiação solar. Os blocos vermelhos consistem nas possíveis localizações dos inversores fotovoltaicos. Os inversores são instalados dentro dos edifícios em uma área específica, onde podem ser conectados aos painéis.

Neste caso, um inversor pode conectar painéis em diferentes edifícios, se este possuir potência suficiente e estiver dentro das limitações de perda de potência/distância. A determinação do quantitativo de painéis por inversor foi realizada com base nas tensões e correntes permitidas por cada faixa de MPPT dos inversores usados nas simulações. No *datasheet* do inversor, já está definido o quantitativo de rastreadores MPPT que ele possui, assim como o número de fileiras em série que cada um desses MPPT suporta. Assim o quantitativo de painel por inversor é estabelecido de acordo com a Eq. (3.6):

$$\sum_{i=1}^n P_{fileira}, \quad (3.6)$$

onde $P_{fileira}$ expressa o número máximo de painéis em série por fileira e pode ser estabelecido pela formulação de Torres (2012), conforme Eq. (3.7):

$$P_{fileira} \leq \frac{V_{max(inversor)}}{V_{oc(painel)}}, \quad (3.7)$$

onde $V_{max(inversor)}$ representa a máxima tensão de entrada do inversor (V) e $V_{oc(painel)}$ a tensão em circuito aberto do painel (V).

Assim, assume-se que a infraestrutura fotovoltaica atende a demanda energética de todos os equipamentos que compõem o *fronthaul* da rede, tais como, antenas *indoor*, RRU,

BBU, SFP+ e Macro BSs. Além disso, considera-se também o consumo de refrigeração do CO.

Para definir o volume de energia elétrica a ser gerado através de painéis fotovoltaicos, para o funcionamento mínimo de uma dada arquitetura, é o resultado da diferença entre o consumo de energia elétrica total da CRA e o consumo mínimo franqueado de energia, oriundo da concessionária de energia elétrica.

Assim, após realizar toda a parametrização do modelo adotado, com as devidas localizações e quantitativos iniciais de medidores, inversores e painéis fotovoltaicos, esses valores são enviados para o processamento do ILP para assim gerar o quantitativo mínimo de inversores a serem utilizados.

3.4 Fase 3: Formulação ILP do Sistema Fotovoltaico

Para implantar um sistema fotovoltaico em uma CRA, de forma econômica, é necessário dimensionar o quantitativo de inversores que atenda a demanda energética com custo mínimo. Assim, nesta seção, apresenta-se, de forma detalhada, a fundamentação matemática do problema de minimização do quantitativo de inversores como um ILP.

Primeiramente, é relatada a notação, os parâmetros de entrada e as variáveis de decisão. Em seguida são descritas e explicadas a função objetivo e as restrições associadas ao problema. Desta forma, apresenta-se a seguinte notação:

- H : conjunto de possíveis localizações de inversores; Cada inversor pode conectar 1 (um) ou mais painéis;
- P : conjunto de localizações de painéis;

Parâmetros de entrada:

- $B[| H | x | P |]$: matriz de cobertura entre inversores e painéis, em que $B_{st} = 1$ denota que um inversor $s \in H$ pode conectar um painel $t \in P$, ou seja, se $T_{loss} \leq 1\%$, 0 caso contrário;
- $f \in \mathbb{N}$: número máximo de painéis que podem ser conectados a um inversor.

Variáveis de decisão:

- $g_{st} \in \{0, 1\} = 1$ se um inversor colocado no local $s \in H$ está cobrindo o painel no local $t \in P$; 0 caso contrário;

- $h_s \in \{0, 1\} = 1$, se pelo menos um painel for conectado ao inversor $s \in H$; 0 caso contrário;

O problema de minimização de inversores é formulado complementando a função objetivo do problema RRUP que aborda a implantação de uma CRA de baixo custo através da minimização dos recursos de rádio e transporte da rede. Essa extensão é expressa conforme a Eq. (3.8):

$$\text{Minimize } \sum_{i \in R} r_i + \sum_{i \in R} z_i + \sum_{s \in H} h_s \quad (3.8)$$

A abordagem RRUP possui como objetivo minimizar o número total de cabines (z_i) implantadas na área residencial, assim como o número total de equipamentos RRUs (r_i) hospedados nessas cabines. Como complemento, este trabalho adiciona a minimização do quantitativo de inversores (h_s) e que de forma satisfatória atenda a demanda energética da arquitetura CRA. De modo complementar, além das restrições levantadas pela abordagem relacionadas à CRA, a função objetivo ainda está sujeita as seguintes restrições associadas ao sistema fotovoltaico:

$$\sum_{s \in H} B_{st} \cdot g_{st} = 1, \forall t \in P \quad (3.9)$$

$$f \cdot h_s \geq \sum_{t \in P} B_{st} \cdot g_{st}, \forall s \in H \quad (3.10)$$

$$h_s \geq 0, \forall s \in H \quad (3.11)$$

A restrição (3.9) garante que cada painel seja conectado a pelo menos um inversor dentro do nível de perda permitido. A restrição (3.10) assegura que o inversor implantado em s conecte todos os painéis a ele atribuído. Finalmente, a restrição (3.11) garante a viabilidade da solução.

O resultado dessa formulação expressa o dimensionamento do quantitativo mínimo de inversores a ser utilizado para suprir o consumo energético da CRA. A partir disso, pode-se avaliar os benefícios da adoção do sistema fotovoltaico em relação as emissões de CO₂ e também especificar seu impacto financeiro através do TCO.

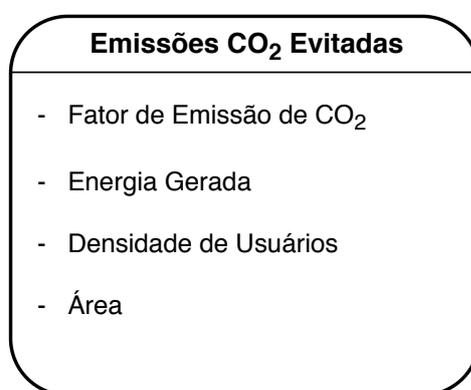
3.5 Fase 4: Avaliação de emissão de CO₂ evitadas

O consumo de energia proveniente da rede convencional de energia elétrica possibilita a emissão de uma variedade de gases poluentes, dentre eles, grandes proporções de CO₂ na atmosfera, em virtude da energia gasta ser oriunda, muitas vezes a partir

da queima de combustíveis fósseis (EPE, 2018). Esse gás caracteriza-se por ser um dos principais responsáveis pelo efeito estufa, gerando graves danos ao meio ambiente.

Diante disso, sob a perspectiva da operadora de rede móvel é possível diminuir de forma considerável, a emissão de CO_2 , bem como de outros gases nocivos, mediante a implantação de um sistema fotovoltaico, dado que este dispõe de uma fonte limpa de geração de energia. Assim, o presente estudo ainda possui como objetivo a contabilização das emissões evitadas pelo uso desse sistema em um ambiente residencial urbano. Para tanto, adota-se a modelagem analítica expressa no Capítulo 2, porém com a diferença de este ser voltado ao cenário da CRA. Na Figura 12 é mostrado os parâmetros utilizados para essa contabilização.

Figura 12: Parâmetros da Avaliação de emissão de CO_2 evitadas.



Fonte: Elaborada pela autora.

Conforme a Eq. (2.11), para o cálculo das emissões evitadas pela adoção do sistema fotovoltaico deve-se considerar o montante de emissão de CO_2 evitadas por usuário, sendo este, o resultado do produto da energia mínima gerada pelo sistema fotovoltaico pelo fator de emissão de CO_2 que deixaram de ser liberados na atmosfera, dividido pelo produto da densidade de usuários pela área. Diante da avaliação de emissão de CO_2 evitadas, realizou-se, também, uma avaliação financeira da utilização do sistema fotovoltaico, por meio do TCO conforme mostrada na próxima fase.

3.6 Fase 5: Avaliação do TCO

Para realizar a análise do impacto financeiro da adoção do sistema fotovoltaico por parte da operadora de rede móvel, assumiu-se a concepção relatada no Capítulo 2, conforme a Eq. (2.12), em que é proposto a avaliação do TCO fotovoltaico associado à redes heterogêneas, porém, adaptou-se à rede CRA. O TCO é composto pela soma do CAPEX e OPEX de uma determinada infraestrutura, conforme especificado na Figura 13.

O CAPEX relaciona-se com as despesas de aquisição e instalação de equipamentos fotovoltaicos básicos, tais como: painéis, inversores e kits de fixação. Enquanto que o OPEX, está associado aos custos de operação e manutenção, o qual é composto pelos seguintes itens: energia elétrica proveniente da concessionária, manutenção dos equipamentos e aluguel de espaço para instalação dos painéis.

Figura 13: Custo Total de Propriedade.



Fonte: Elaborada pela autora

Diante disso, identificar os principais fatores que influenciam a atratividade de implantação de geração solar são fundamentais para a tomada de decisão. Para isso, os principais itens que devem ser avaliados são: localização (nível da radiação solar), custo da tarifa de energia, e sobretudo, custos relacionados à implantação do sistema. Logo, o CAPEX caracteriza-se por apresentar, nas fases iniciais, elevadas despesas financeiras com a implantação de recursos, à medida que o OPEX se destaca a longo prazo.

3.7 Considerações do Capítulo

Neste capítulo, foi apresentado a formulação matemática necessária para o problema de minimização de inversores. Para tanto, adotou-se uma metodologia com 5 etapas distintas, sendo a primeira o levantamento energético necessário para suprir as necessidades da arquitetura CRA, depois o dimensionamento do sistema fotovoltaico, em seguida, o uso da técnica de otimização ILP, a avaliação do volume de emissões de CO₂ evitado por usuário da rede móvel, e por fim, a especificação do TCO do sistema fotovoltaico.

4 Estudo de Caso e Análise de Resultados

4.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo será apresentado o estudo de caso utilizado para o delineamento desta pesquisa. Para isso descreve-se, detalhadamente o cenário utilizado, abordando as configurações consideradas para os equipamentos fotovoltaicos (custo, potência, eficiência, etc.), intervalo temporal de análise, principais parâmetros necessários para o dimensionamento de rádio e transporte, dentre outros quesitos. Em seguida, discute-se os resultados obtidos, com o intuito de elucidar que a proposta desta dissertação mostrou-se pertinente ao que se propõe.

4.2 Estudo de Caso

De forma semelhante ao trabalho de Tonini et al. (2016b), para o estudo de caso deste trabalho foi considerado um cenário residencial com uma área de $(410 \times 475) \text{ m}^2$, onde estão presentes 225 prédios, adotando um modelo de rua de Manhattan onde os edifícios são dispostos em blocos. O número de andares em cada edifício é uma variável aleatória obtida a partir distribuição uniforme discreta ao longo do intervalo $[1,12]$ (isto é, $N_x \sim U(1, 12)$). Essa área é atendida por uma CRA composta por cabines de RRU *indoor* e *outdoor*, antenas *indoor*, macro BSs situadas no topo de alguns prédios e um CO composto por BBUs. A Tabela 2 mostra os principais parâmetros utilizados na definição e simulação do cenário. Em relação aos demais parâmetros, eles podem ser consultados nos estudos tomados por base nesta pesquisa (FIORANI et al., 2016; TONINI et al., 2016a; SOUZA, 2017).

Assume-se que as antenas *indoor* estão localizadas em cada andar do prédio e são determinadas conforme Eq. (2.3), sendo estas omnidirecionais e colocadas no centro do teto de cada andar do prédio. Cada antena é conectada a uma RRU através de um cabo de cobre da Categoria 6 e cada RRU é conectada a uma porta BBU através de um cabo dedicado de fibra óptica. Cada link de fibra ponto-a-ponto entre uma RRU e uma BBU requer dois transceptores ópticos conectáveis de formato pequeno (SFP+). As RRUs estarão localizadas em cabines *indoor* e *outdoor*, enquanto que as BBUs estarão agregadas em um CO. Além disso, as macros BSs estão situadas no topo dos prédios sendo usadas para atender aos usuários externos.

A estimativa do quantitativo de equipamentos de rádio que compõem a CRA foi

Tabela 2: Parâmetros utilizados na definição do cenário da rede (FIORANI et al., 2016; TONINI et al., 2016a; SOUZA, 2017)

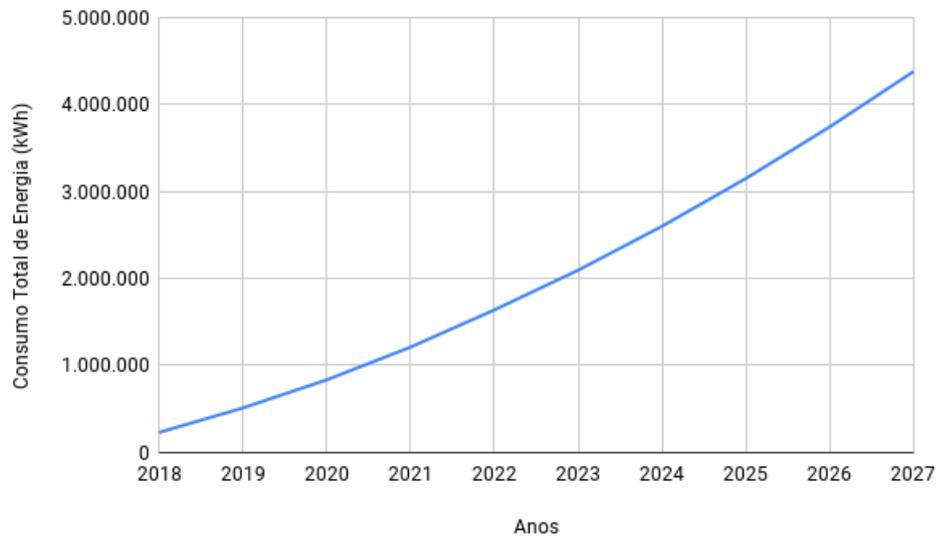
Parâmetro	Valor
Área do Cenário	(410 x 475) m ²
Densidade de usuários móveis	3.000 usuários/km ²
Quantitativo de Prédios	225
Andares por Prédio	U(1,12)
Porcentagem de Usuários <i>indoor</i>	80%
Porcentagem de Usuários ativos	16%
Número de Antenas <i>indoor</i> por RRU	8
Número de RRU por BBU	6
Distância Máxima do link RRU e Antena	100 m
Potência da Macro BS	650 W
Potência da Antena <i>indoor</i>	30 W
Potência da RRU	100 W
Potência da BBU	300 W
Potência do <i>Transceivers</i>	2 W

calculado em função do modelo de previsão de tráfego médio, conforme a Eq. (2.4), em que o número de antenas *indoor*, depende do quantitativo de prédios, dos andares do mesmo e da taxa de penetração (FIORANI et al., 2016) (Eq. 2.3), que para esse caso foi realizado uma adaptação, utilizando-se a variação de [0,3571 a 1], dado que parte-se do pressuposto de que já há antenas pré-instaladas no cenário em questão. Os usuários restantes (isto é, que não são abrangidos pela antenas *indoor*) são cobertos pelas macro BSs.

Para o levantamento energético da CRA considera-se, além do consumo dos equipamentos (antenas internas, macro BSs, RRU e BBUs), a refrigeração do CO que consiste na potência utilizada para resfriamento das BBUs, sendo esta determinada conforme formulação de Alhumaima (2017), que considera a taxa de perda de refrigeração (0,009 à 0,1) em função do quantitativo de equipamentos do local e suas devidas potências. Para fins de simplificação, neste trabalho utilizou-se a taxa fixa de perda em 0,009. Os equipamentos da arquitetura encontram-se em regime de operação de 24h por dia. Diante disso, utilizou-se uma abordagem anual de aquisição e instalação de infraestrutura fotovoltaica, sendo que, anualmente são obtidos novos aparatos fotovoltaicos, adicionados aos que já existem na infraestrutura, de modo a atender a demanda energética requerida.

Mediante as projeções do tempo de implantação e evolução da tecnologia 5G (LE-TAIEF et al., 2019) e o tempo de vida útil de aproximadamente 25 anos do sistema fotovoltaico, emprega-se um intervalo de análise de 10 (dez) anos, de modo que as implantações das estruturas fotovoltaicas são avaliadas considerando um crescimento exponencial do consumo de energia elétrica (kWh), dada as projeções de tráfego de dados móveis prevista para os próximos anos, conforme mostra a Figura 14.

Figura 14: Estimativa de Consumo de Energia da CRA ao longo dos anos.



Fonte: Elaborada pela autora.

Em relação ao sistema fotovoltaico proposto, assume-se a geração de energia distribuída urbana, que consiste no fato desse sistema ser conectado à rede elétrica pública, considerando a cobertura dos prédios como local de instalação dos painéis fotovoltaicos. Diante disso, selecionou-se os prédios mais altos, com o intuito de evitar perdas por eventuais sombreamentos. A cobertura de um prédio apresenta uma área de 400 m², porém optou-se por utilizar aproximadamente 90% dessa área, deixando um espaço significativo entre as fileiras, facilitando manutenções periódicas.

Para fins de captura de energia, considerou-se utilizar a irradiação solar incidente no plano horizontal (0° ao Norte) para melhor generalização deste estudo, dado que a configuração de inclinação mais vantajosa relacionada aos painéis seria o ângulo igual a latitude geográfica do local de instalação do sistema fotovoltaico.

Para estimar despesas relacionadas ao consumo energético, considera-se os valores de importação e exportação da tarifa de energia elétrica em kWh para a rede de distribuição. O primeiro corresponde a R\$ 0,90, incluindo apenas alguns impostos e tributos, tais como: ICMS (25%), PIS/PASEP (1,40%) e COFINS (6,48%) e taxa de iluminação pública (0,082%) (CELPA, 2019). Enquanto que o segundo é expresso pelo valor de R\$ 0,68, isento de impostos e tributos (ANEEL, 2019).

A Tabela 3 apresenta os parâmetros-chave utilizados no dimensionamento do sistema fotovoltaico para execução do ILP e também para avaliar a viabilidade técnica e econômica do sistema fotovoltaico.

O painel solar considerado é fabricado com silício policristalino e fornece eficiência energética de 16,46%. Além disso, suas células fotovoltaicas são protegidas por uma

Tabela 3: Parâmetros do Sistema Fotovoltaico.

Parâmetro	Valor	Referência
Área Paineis	1,94 m ²	Solar (2019b)
Potência Paineis	320W	
Garantia do Paineis	10 anos	
Custo Paineis (un.)	R\$ 635,00	
Custo Inversor 20kW (un.)	R\$ 16.782,97	Solar (2019a)
Custo Inversor 36kW (un.)	R\$ 17.400,13	
Custo Inversor 60kW (un.)	R\$ 21.540,45	Renvu (2019)
Paineis por Inversor	84, 216, 276	-
Custo do Kit de Fixação	R\$ 375,50	NeoSolar (2019)
Custo Aluguel do Telhado	R\$ 368,4 a.a./m ²	FIPE (2019)
Custo Instalação Medidor	R\$ 300,00	Nakabayashi (2014)
Consumo Mínimo da Rede	50 kWh a.m.	ANEEL (2019)
Custo de Venda do kWh	0,68/kWh	
Custo de Compra do kWh	0,90/kWh	CELPA (2019)
Fator de Emissão de CO ₂	0,1 kg/kWh	Souza (2017)
Seção Cabo	10mm ²	-
Taxa de Perda do Cabo	1%	-
Taxa Instalação	0,2 (20%)	Roy et al. (2012)
Taxa de Manutenção	1% a.a	Nakabayashi (2014)
Taxa de Depreciação	5% a.a	Farias (2016)
Intervalo de Análise	10 anos	-

camada de vidro temperado e sob condições de irradiação solar ideal, produzem 320W, 8,69A e 36,8V em corrente contínua (SOLAR, 2019b). Para tanto, assume-se que os painéis solares ficariam expostos ao sol por um período médio de seis horas, diariamente, sob radiação solar constante de aproximadamente $5,0 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{dia})$.

Diferentemente de Souza (2017), este trabalho adota 3 (três) tipos de inversores a serem utilizados nos prédios, em cada simulação, de forma a analisar de maneira comparativa o potencial de redução de custos de CAPEX e OPEX do sistema fotovoltaico. Assim, os inversores estão localizados no interior dos prédios para serem protegidos dos intempéries do clima, apresentando potência de 20kW, 36kW e 60kW, com eficiência de 98,0%, 98,6% e 98,8%, e MPPT de 2, 4 e 3, respectivamente. Além disso, as conexões entre painéis e inversores são dadas em série e paralelo respeitando as tensões e correntes máximas de cada caixa de MPPT de cada um dos inversores usados nas simulações.

Em relação aos kits de fixação do painel fotovoltaico, estes representam a estrutura de instalação de painéis de forma individual com inclinação horizontal, isto é, com ausência de ângulo de inclinação conforme a latitude do local de instalação. Além disso, a substância utilizada na fabricação do kit é resistente em relação à corrosão, e a elementos climáticos e atmosféricos.

Considerou-se ainda, que o custo de compra dos equipamentos fotovoltaicos pade-

cerão de uma desvalorização anual fixa de 5%, sendo esta restrita à 60% do valor real dos produtos (FARIAS, 2016), de forma a realizar uma simulação de um provável processo de diminuição do preço de compra dos equipamentos fotovoltaicos, devido aos avanços tecnológicos e expansão de instalações, mediante as projeções positivas do mercado de energia fotovoltaica.

A Tabela 4 apresenta a potência, o consumo diário e a projeção de valor financeiro em 01 (um) ano, para os equipamentos adotados na arquitetura CRA. Assume-se que os mesmos ficarão em regime de operação de 24h por dia, utilizando o valor de R\$ 0,90 de tarifa de energia elétrica. Por fim, é realizada uma avaliação da emissão anual de CO₂ (kg) dos equipamento da referida arquitetura.

Tabela 4: Potência e consumo estimado de energia dos equipamentos CRA.

Equipamento (unidade)	Potência (W)	Consumo Diário (kWh)	Emissão CO ₂ Anual (kg)	Valor Anual (R\$)
Macro	650	15,6	569,4	5.124,60
Antena <i>indoor</i>	30	0,72	26,2	236,52
RRU	100	2,4	87,6	788,40
BBU	300	7,2	262,8	2.365,20
<i>Transceiver</i>	2	0,048	1,7	15,76

Vale destacar que para este estudo de caso não é abordada a alteração de preço da tarifa de energia elétrica, e assim assuntos como inflação, custo de oportunidade ou variações na composição da matriz energética deixam de ser considerados. No entanto, caso fosse considerado a conjuntura brasileira dos últimos anos, no qual a tarifa de energia tem aumentado de forma significativa, o valor relacionado ao consumo diário seria proporcionalmente maior.

4.3 Resultados

O problema de minimização do quantitativo de inversores é resolvido utilizando o solver *Gurobi Optimizer* (GUROBI, 2018), disponível comercialmente, mas com versão de teste para acadêmicos, sendo este usado para resolução de problemas de programação linear inteira. Os experimentos foram executados em uma estação de trabalho AMD Ryzen com processador de 2,13 GHz e 64 GB de RAM com o sistema operacional Linux Ubuntu 18.04 64-bits.

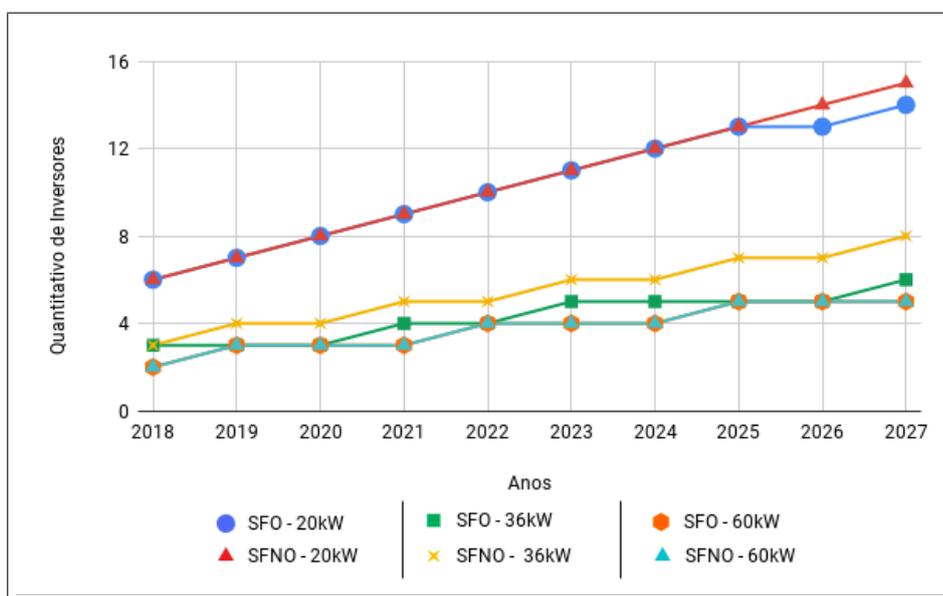
Nesta seção são apresentados os resultados obtidos no estudo de caso, realizando-se uma comparação com a abordagem do sistema fotovoltaico não otimizado (SFNO) Souza (2017). Os resultados são subdivididos em duas categorias: Avaliação de Custos e Avaliação Ambiental. Na primeira relata-se o resultado da execução da técnica ILP em relação à

minimização do número de inversores através da demonstração dos quantitativos gerados, assim como os custos financeiros associados ao TCO fotovoltaico. Já na segunda, será demonstrado os resultados referentes as emissões de CO₂ que deixaram de ser efetuadas na atmosfera.

4.3.1 Avaliação de Custos

Para avaliar os custos associados ao TCO fotovoltaico, assume-se um período de análise de 10 (dez) anos, assim como 3 (três) diferentes modelos de inversores com suas respectivas potências (20, 36 e 60 kW) necessários para atender a demanda energética da arquitetura CRA.

Figura 15: Quantitativo de Inversores do Sistema Fotovoltaico.

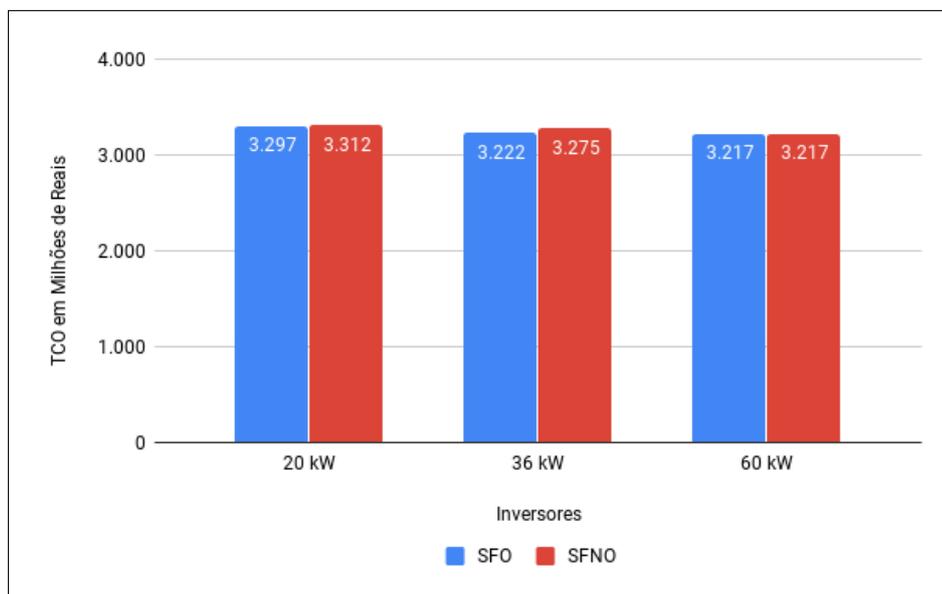


Fonte: Elaborada pela autora.

A Figura 15 apresenta a evolução do quantitativo total de inversores. Considerando as configurações de 20 kW e 36 kW do SFO, é possível observar que o número de inversores necessários é sempre inferior quando comparado com a quantidade de inversores do SFNO. Para a primeira configuração (20 kW) houve uma variação quantitativa de 6.66%, enquanto que para a segunda configuração (36 kW) de 25%, isso ocorre devido a possibilidade dos inversores também atenderem aos painéis de prédios vizinhos compartilhando-os, aproveitando o máximo dos recursos do inversor.

Ainda de acordo com a Figura 15, ao considerar-se a terceira configuração (60 kW), observou-se que não houve alteração no quantitativo de inversores, embora os inversores utilizados possibilitem mais conexões de painéis, é necessário respeitar as limitações estabelecidas para a técnica de otimização, ou seja, a medida que aumenta a distância entre a localização do inversor e do painel, as perdas aumentam na mesma proporção.

Figura 16: TCO do Sistema Fotovoltaico.



Fonte: Elaborada pela autora.

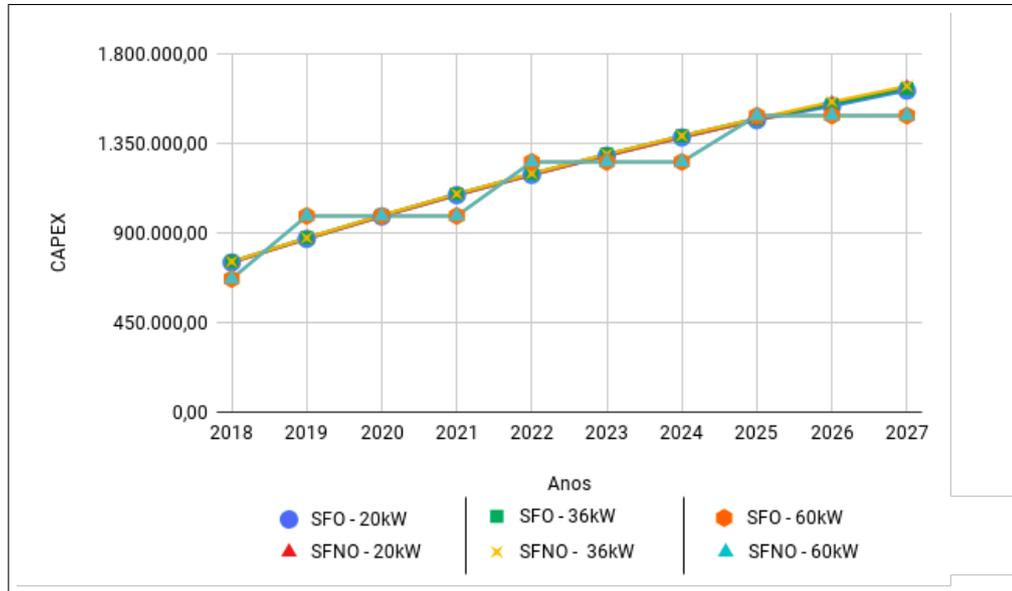
A partir da Figura 16, observa-se uma variação modesta entre as abordagens do SFO e SFNO, para as primeiras duas configurações (20 e 36 kW), sendo esta de 0,44% para a de 20kW e 1,64% para a de 36 kW. Para a terceira configuração (60 kW), como não houve variação do quantitativo de equipamentos fotovoltaicos, o TCO manteve-se o mesmo para ambas as abordagens, porém comparando-o com as configurações de 20kW e 36kW do SFO, ainda sim, ele apresenta-se financeiramente mais vantajoso, em relação ao de 20kW com 2,41% e 0,001% para o de 36kW. Essa vantagem financeira ocorre devido ao quantitativo de inversores que foi menor em relação as demais potências simuladas, causando assim uma significativa redução do CAPEX, conforme discretizado na Figura 17, onde as configurações de 20kW e 36kW apresentam variações bem próximas, sendo estas para a abordagem SFO entre 36kW e 20kW, de 0,56%.

Analisando a discretização do OPEX apresentado na Figura 18, percebe-se que a configuração de 60kW apresenta os maiores valores, embora, para o período de avaliação de 10 (dez) anos, não tenha sido aplicadas manutenções como ocorreu nos demais casos, isso devido a garantia desse inversor não extrapolar o período dessa análise. Indicando assim, que com o passar dos anos o valor do OPEX, dessa configuração, possua a tendência de aumentar ainda mais. Para as demais configurações, a variação, no caso SFO de 36kW e 20kW, é de 0,40%.

Ao se comparar os gastos com energia, o TCO do SFO tende a ser menor que o valor financeiro associado ao custeio de energia elétrica por parte da concessionária, em todas as configurações de inversores utilizadas, conforme demonstrado pela Tabela 5.

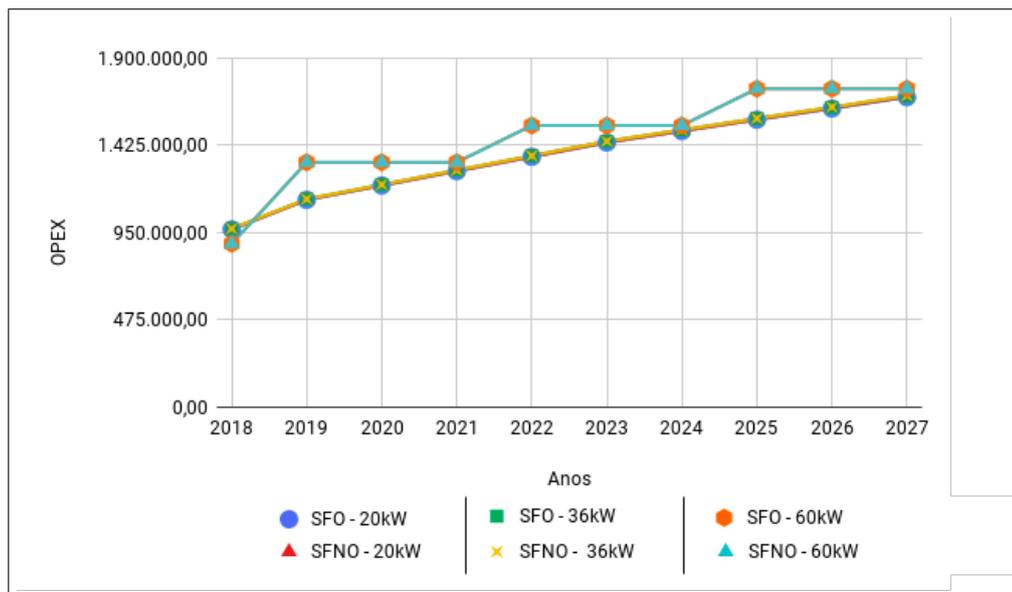
Além disso, estimou-se o custo médio anual de implantação do sistema fotovoltaico

Figura 17: CAPEX anual do Sistema Fotovoltaico.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 18: OPEX anual do Sistema Fotovoltaico.



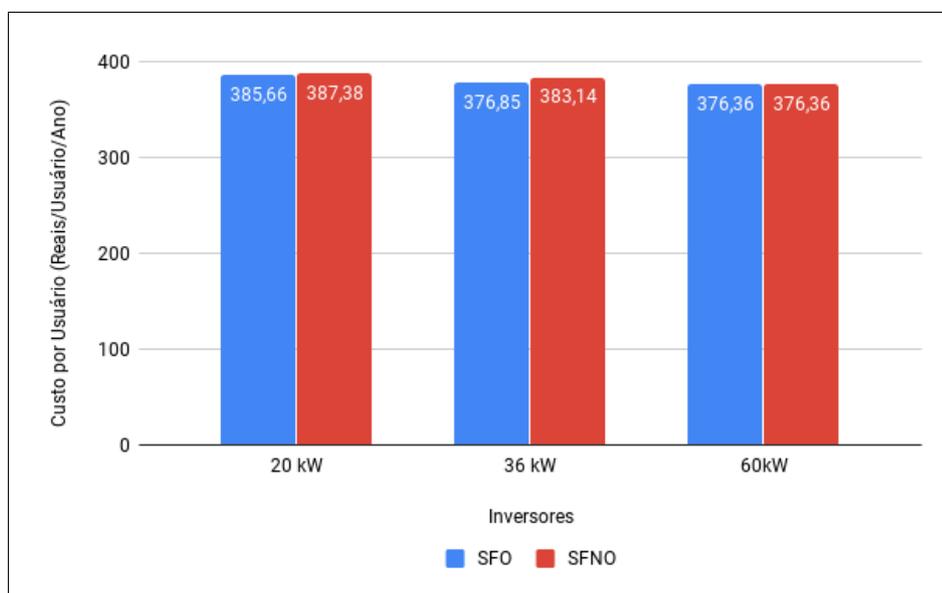
Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 5: Custo do consumo de energia a partir da concessionária e TCO do sistema fotovoltaico otimizado

Parâmetro	Valor
Inversor 20 kW	R\$ 3.297.395,95
Inversor 36 kW	R\$ 3.222.109,71
Inversor 60 kW	R\$ 3.217.858,14
Concessionária	R\$ 3.937.544,75

por usuário, de acordo com as três configurações de potência de inversores consideradas neste trabalho, conforme expresso na Figura 19. Percebe-se que a configuração de 20kW apresenta uma redução de 0,44%, enquanto que a de 36kW de 1,64%, em relação ao SFNO. No geral, para o SFO observa-se uma redução média, de custo, em torno de 0,69% em relação ao SFNO, ratificando as vantagens na utilização da técnica de otimização.

Figura 19: Custo do sistema fotovoltaico por usuário.

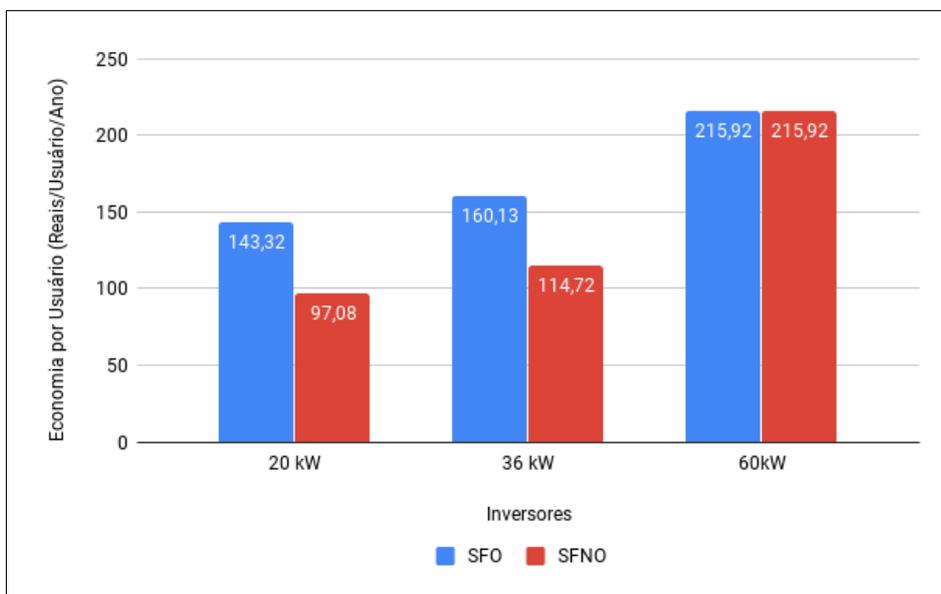


Fonte: Elaborada pela autora.

Por fim, a Figura 20 apresenta a economia esperada por usuário, expressando os gastos com energia elétrica que deixaram de ser contabilizados em função da adoção do sistema fotovoltaico. Os resultados gerados se mostram expressivos, com uma economia de 47,63% e 39,58% em relação ao SFNO para 20kW e 36kW, respectivamente. No entanto, 60kW apresenta maior economia, sendo esta de 50,65% em relação ao de 20kW e 34,84% em relação ao de 36kW. Essa diferença decorre dele possuir um maior potencial de geração de energia.

Diante do exposto constata-se que a configuração de 36kW com a abordagem do SFO mostra-se mais promissora com reduções significativas, desde o quantitativo e estendendo-se ao TCO, se comparada com a de 20kW, pois este, apesar de possuir menor valor financeiro, exige uma quantidade maior de inversores para suprir as necessidades

Figura 20: Economia gerada por usuário em função das diferentes configurações de inversores.



Fonte: Elaborada pela autora.

energéticas da CRA. Já o de 60kW, apesar de não haver variação quanto ao não otimizado, pelo lado financeiro apresentou mais benefícios em relação à concessionária.

4.3.2 Avaliação Ambiental

Este trabalho, também retrata o volume de emissões de CO₂ evitada por usuário anualmente (kg/usuário/ano), a partir da utilização de um sistema fotovoltaico, conforme pode ser observado na Figura 21. Percebe-se que a configuração (60 kW) possui o melhor desempenho, dado que este inversor apresenta maior geração de energia, mediante isso é possível injetar a energia excedente na rede da concessionária, potencializando a troca associada ao Sistema de Compensação de Energia. Comparando o resultado do inversor de 60 kW, com a configuração de 20 kW do SFO há uma variação positiva de 22,09%, já com o de 36 kW há uma variação de 12,90%. Além disso, para as configurações de 20 kW e 36 kW, houve destaque para a abordagem do SFO quando comparado com o SFNO, com aumento de 6,17% em relação ao de 20 kW e 10,71% para o de 36 kW.

Diante disso, conclui-se que as configurações de potência menores, mostram-se mais promissoras para o uso da técnica de otimização, mas para alguns casos a maior potência destaca-se, mesmo não havendo variação em relação ao SFNO.

Figura 21: Quantitativo de emissões de CO₂ evitadas por usuário ao ano.

Fonte: Elaborada pela autora.

4.4 Considerações do Capítulo

Neste capítulo, foram demonstrados o estudo de caso realizado assim como os resultados obtidos nesta pesquisa, por meio da técnica de otimização ILP proposta. Constatou-se que a partir do volume de consumo energético da CRA somado ao valor da tarifa de energia elétrica faz com que a adoção do SFO seja mais proveitosa para as configurações de 20 kW e 36 kW, uma vez que o TCO fotovoltaico fica em níveis correspondentes ou inferiores ao custeio de energia por parte da concessionária de energia elétrica.

5 Considerações finais

De acordo com as tendências dos últimos anos, as redes móveis têm sido responsáveis por parcelas cada vez mais consideráveis do consumo de energia elétrica e consequentemente pela emissão de CO₂ na atmosfera, que se constitui em efeito prejudicial ao meio ambiente. Uma das alternativas para resolver essas questões é o aproveitamento da energia solar, por meio de sistemas fotovoltaicos, no qual adota-se o dimensionamento de seus componentes básicos, tais como painéis e inversores. No entanto, uma das principais barreiras para a utilização concreta de tal sistema é seu elevado custo de implantação, o qual não pode ser negligenciado.

Assim, este trabalho buscou realizar a minimização de custos de implantação de um sistema fotovoltaico aplicado à uma CRA, por meio da minimização do número de inversores. Visando alcançar os objetivos propostos, formulou-se a minimização de inversores utilizando a técnica de otimização ILP. Adicionalmente, utilizou-se uma projeção futura da demanda de dados móvel para os próximos anos, que traduz-se em um perfil crescente de consumo de energia elétrica da rede móvel, que deve ser alimentado pelas estruturas fotovoltaicas.

Para tanto, primeiramente foi realizado o levantamento energético da CRA, para assim realizar uma estimativa inicial dos equipamentos fotovoltaicos necessários para suprir a demanda requerida. Posteriormente, esse levantamento inicial serve de entrada para a técnica ILP, que resulta no quantitativo de inversores necessários para suprir a demanda energética da arquitetura. Após a definição quantitativa do sistema fotovoltaico, passou-se para a etapa de avaliação técnico-econômica quanto à adoção de um sistema fotovoltaico aplicado à CRA, apresentando o gastos operacional e de capital. Paralelamente, avalia-se também, o quantitativo de emissões de CO₂ que deixaram de ser lançadas na atmosfera em decorrência do sistema fotovoltaico.

Para o problema em questão optou-se pela utilização de um cenário de dimensões limitadas, devido a resolução do problema de minimização de inversores, ser realizada por um método de enumeração, onde o número de combinações de possíveis soluções cresce exponencialmente (KAGAN; SCHMIDT; OLIVEIRA, 2009). E assim, a adoção de um cenário mais amplo demandaria um tempo maior de execução ou então seria necessário o auxílio de uma meta heurística, que se adequam melhor a contextos maiores (TONINI et al., 2017). Diante dessa limitação, houve um impacto no resultado do inversor de 60kW em que não houve espaço para a variação entre as duas abordagens consideradas.

A partir disso, os resultados demonstraram que para as configurações de inversores com potências menores, a técnica de otimização utilizada se mostra promissora em relação aos cálculos do SFNO, havendo uma diferença média de custo de cerca de 0,2 milhão de reais. Já a configuração de 60kW que, embora não apresente variação entre o SFO e o SFNO, mostra-se financeiramente mais proveitosa, e devido gerar mais energia, caracterizou-se como a configuração que menos emitiu CO₂ e gerou economia por usuário. Assim, a partir das análises realizadas, pode-se concluir que a técnica de otimização ILP mostra-se promissora ao que se propõe.

5.1 Contribuições da Dissertação

As principais contribuições desta pesquisa são elencadas a seguir:

- Realização de uma pesquisa relacionada aos principais conceitos que permeiam a utilização de técnica de otimização no dimensionamento de um sistema fotovoltaico em uma CRA, mostrando suas especificidades, vantagens e desafios, junto com uma boa revisão bibliográfica dos trabalhos mais atuais relacionados ao assunto;
- Utilização de um sistema fotovoltaico conectado a rede elétrica que instiga o uso da geração de energia distribuída;
- Demonstração da viabilidade da utilização da técnica ILP para minimização de custo de um sistema fotovoltaico no âmbito da CRA;
- Análise financeira, por meio do TCO, da implantação de um sistema fotovoltaico otimizado, assim como as emissões de CO₂ evitadas;
- Divulgação de trabalho apresentado à outros pesquisadores por meio de conferência nacional:
 - SARAIVA, P. A. et al. Implantação de um Sistema Fotovoltaico Otimizado em Arquitetura de Rádio Centralizada. In: XXXVII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT 2019), 2019.

5.2 Dificuldades Encontradas

No decorrer do desenvolvimento desta pesquisa foram encontrados diversos obstáculos, no que se refere à pesquisa da tecnologias envolvidas, compreensão dos trabalhos bases, desenvolvimento dos algoritmos e testes. Dentre as principais dificuldades encontradas pode-se citar:

- Estudo aprofundado sobre os trabalhos de Souza (2017), Tonini et al. (2016a) e Fiorani et al. (2016), que envolveu a análise de todos os conceitos apresentados além da implementação de todos os modelos matemáticos presentes em tais pesquisas.
- Especificações técnicas do sistema fotovoltaico em relação aos cabos, tipos de conexões;
- Elevado tempo de processamento computacional, sendo necessário a utilização de recursos computacionais mais robustos;
- A realização do estado arte sobre os conceitos que permeiam as redes centralizadas e os sistemas fotovoltaicos, para um adequado processo de caracterização do problema de minimização de inversores;
- Esforço no processo de desenvolvimento da modelagem matemática deste trabalho, de forma a buscar a maneira mais objetiva e simples possível, além de ser equivalente com a forma de funcionamento no mundo real;
- Tempo necessário para o aperfeiçoamento no uso de ferramentas como o *Gurobi Optimizer*, para a correta implementação do cenário necessário à técnica ILP.

5.3 Trabalhos Futuros

Como possíveis pontos de extensão desta pesquisa, percebe-se a necessidade de explorar diversas partes que necessitam de análises adicionais sob a forma de trabalhos futuros, e que dentre as quais destacam-se:

- Considerar a utilização de outras seções de cabos utilizados para o cálculo da limitação da taxa de perda na ligação entre painéis e inversores;
- Abordar a utilização de inversores reservas, para os casos de possíveis falhas dos inversores utilizados;
- Implementar o uso do quantitativo de painéis na técnica de otimização ILP.
- Variar a densidade de usuários no cenário CRA;
- Aumentar a área do cenário CRA considerado e por conseguinte, o sistema fotovoltaico, e assim utilizar uma meta heurística;
- Usar estimativas de emissões evitadas de outros gases potencialmente nocivos ao meio ambiente, que também estão associados ao consumo a partir da matriz de energia elétrica convencional, como o Metano (CH_4), o Dióxido de Nitrogênio (NO_2) e o Óxido Nitroso (N_2O).

Referências

- AGIWAL, M.; ROY, A.; SAXENA, N. Next generation 5g wireless networks: A comprehensive survey. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 2016. v. 18, n. 3, p. 1617–1655, thirdquarter 2016. ISSN 1553-877X. Citado na página 2.
- AHMED, F.; NAEEM, M.; IQBAL, M. Ict and renewable energy: a way forward to the next generation telecom base stations. *Telecommunication Systems*, 2017. v. 64, n. 1, p. 43–56, Jan 2017. ISSN 1572-9451. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11235-016-0156-4>>. Citado na página 2.
- AL-FALAHY, N.; ALANI, O. Y. Technologies for 5g networks: Challenges and opportunities. *IT Professional*, 2017. v. 19, n. 1, p. 12–20, Jan 2017. ISSN 1941-045X. Citado na página 12.
- ALHUMAIMA, R. *Evaluation of power consumption and trade-offs in 5G mobile communications networks*. Tese (PhD thesis) — Brunel University London, 2017. Citado na página 37.
- ALSHARIF, M. H. Comparative analysis of solar-powered base stations for green mobile networks. *Energies*, 2017. MDPI AG, v. 10, n. 8, p. 1208, Aug 2017. ISSN 1996-1073. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3390/en10081208>>. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 10.
- ALSHARIF, M. H. Optimization design and economic analysis of energy management strategy based on photovoltaic/energy storage for heterogeneous cellular networks using the HOMER model. *Solar Energy*, 2017. v. 147, p. 133–150, 2017. ISSN 0038-092X. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 8.
- ALVES, R.; DELGADO, C. *Programação linear inteira*. [S.l.]: Faculdade de Economia da Universidade do Porto, 1997. Citado na página 24.
- AMERICAS, G. *5G Services Innovation*. 2019. Disponível em: <<https://www.5gamericas.org/5g-service-innovation/>>. Citado na página 1.
- ANEEL. *Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012*. 2012. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 19.
- ANEEL. *Ranking das Tarifas*. 2019. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/>>. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.
- AUER, G.; BLUME, O.; GIANNINI, V. Energy efficiency analysis of the reference systems, areas of improvements and target breakdown. 2010. p. 1–68, 12 2010. Citado na página 14.
- BELKHIR, L.; ELMELIGI, A. Assessing ict global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations. *Journal of Cleaner Production*, 2018. v. 177, p. 448 – 463, 2018. ISSN 0959-6526. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965261733233X>>. Citado na página 1.

BRITO, S. S. *Grafo de conflitos : construção e aplicações em problemas de programação inteira*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Ouro Preto, Fevereiro 2015. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/5412>>. Citado na página 24.

BÁEZ-FERNÁNDEZ, H.; RAMÍREZ-BELTRÁN, N. D.; MÉNDEZ-PIÑERO, M. I. Selection and configuration of inverters and modules for a photovoltaic system to minimize costs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016. v. 58, p. 16 – 22, 2016. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115014501>>. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 10.

CELPA. *Regras de Cobrança*. 2019. Disponível em: <<http://www.celpe.com.br/>>. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.

CHECKO, A. et al. Cloud ran for mobile networks—a technology overview. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 2015. v. 17, n. 1, p. 405–426, Firstquarter 2015. ISSN 2373-745X. Citado na página 14.

CHECKO, A.; HOLM, H.; CHRISTIANSEN, H. Optimizing small cell deployment by the use of c-rans. In: *European Wireless 2014; 20th European Wireless Conference*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–6. ISSN null. Citado na página 14.

CHEDID, R.; SAWWAS, A. Optimal placement and sizing of photovoltaics and battery storage in distribution networks. *Energy Storage*, 2019. v. 1, n. 4, p. e46, 2019. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/est2.46>>. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 10.

CHEN, K.; DUAN, R. C-ran the road towards green ran. *China Mobile Research Institute, white paper*, 2011. v. 2, 2011. Citado na página 14.

CISCO. Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2017–2022 White Paper. 2019. Disponível em: <<https://www.cisco.com/c/en-us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white-paper-c11-738429.html>>. Citado na página 1.

CORTEZ, R. J. M. *Sistema de Seguimento Solar em Produção de Energia Fotovoltaica*. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2013. Citado na página 17.

COUTINHO, D. da Costa e S. *Tratamento do Problema de Otimização com Restrições Usando Evolução Diferencial*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013. Citado na página 24.

DOLARA, A. et al. Optimization models for islanded micro-grids: A comparative analysis between linear programming and mixed integer programming. *Energies*, 2017. v. 10, n. 2, 2017. ISSN 1996-1073. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/10/2/241>>. Citado 3 vezes nas páginas 4, 7 e 10.

EKICI, S.; KOPRU, M. Investigation of pv system cable losses. *International Journal of Renewable Energy Research-IJREER*, 2017. v. 7, p. 807–815, 06 2017. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.

- EPE. Premissas e Custos da Oferta de Energia Elétrica no horizonte 2050. 2018. 2018. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-2050>>. Citado na página 34.
- FARIAS, F. d. S. *Designing cost-efficient transport solutions for fixed and mobile broadband access network*. Dissertação (Tese de Doutorado) — Universidade Federal do Pará, 2016. Disponível em: <<http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/7956>>. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 40.
- FETANAT, A.; KHORASANINEJAD, E. Size optimization for hybrid photovoltaic–wind energy system using ant colony optimization for continuous domains based integer programming. *Applied Soft Computing*, 2015. v. 31, p. 196 – 209, 2015. ISSN 1568-4946. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1568494615001702>>. Citado 3 vezes nas páginas 4, 7 e 10.
- FIORANI, M. a. et al. Joint Design of Radio and Transport for Green Residential Access Networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2016. 2016. ISSN 07338716. Citado 7 vezes nas páginas X, 14, 27, 28, 36, 37 e 49.
- FIPE. Fipezap - Índice fipezap de preços de imóveis anunciados. 2019. 2019. Disponível em: <<https://www.fipe.org.br/>>. Citado na página 39.
- GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. *Otimização Combinatória e Programação Linear*. [S.l.]: Rio de Janeiro: Elsevier, 2005. Citado na página 25.
- GSMA. *The Mobile Economy 2017*. 2017. Disponível em: <<https://www.gsmainelligence.com/research/2017/02/the-mobile-economy-2017/612/>>. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 2.
- GUROBI. *Gurobi Optimizer V8.0.0*. 2018. Citado na página 40.
- HAN, T.; ANSARI, N. Provisioning green energy for base stations in heterogeneous networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016. v. 65, n. 7, p. 5439–5448, July 2016. ISSN 1939-9359. Citado 3 vezes nas páginas 2, 6 e 10.
- HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. *Introdução à Pesquisa Operacional*. 8rd. ed. [S.l.]: São Paulo: McGraw-Hill, 2006. Citado na página 25.
- HOSSAIN, E.; HASAN, M. 5g cellular: key enabling technologies and research challenges. *IEEE Instrumentation Measurement Magazine*, 2015. v. 18, n. 3, p. 11–21, June 2015. ISSN 1941-0123. Citado na página 12.
- IEA. Global average annual net capacity additions by type, 2010-2040. *International Energy Agency*, 2019. 2019. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-average-annual-net-capacity-additions-by-type-2010-2040>>. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 4.
- KAGAN, N.; SCHMIDT, H. P.; OLIVEIRA, C. C. B. d. *Métodos de Otimização Aplicados a Sistemas Elétricos de Potência*. [S.l.]: Blucher, 2009. Citado na página 47.
- KELIF, J.-M.; COUPECHOUX, M.; GODLEWSKI, P. A fluid model for performance analysis in cellular networks. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2010. v. 2010, n. 1, p. 435189, Aug 2010. ISSN 1687-1499. Disponível em: <<https://doi.org/10.1155/2010/435189>>. Citado na página 15.

KJAER, S. B.; PEDERSEN, J. K.; BLAABJERG, F. A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2005. v. 41, n. 5, p. 1292–1306, Sep. 2005. ISSN 1939-9367. Citado na página 18.

KONDILI, E. 3 - design and performance optimisation of stand-alone and hybrid wind energy systems. In: KALDELLIS, J. (Ed.). *Stand-Alone and Hybrid Wind Energy Systems*. Woodhead Publishing, 2010, (Woodhead Publishing Series in Energy). p. 81 – 101. ISBN 978-1-84569-527-9. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781845695279500032>>. Citado na página 4.

LEONARDI, G.; MEO, M.; MARSAN, M. A. Markovian models of solar power supply for a lte macro bs. In: *2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–7. ISSN 1938-1883. Citado na página 3.

LETAIEF, K. B. et al. The roadmap to 6g: Ai empowered wireless networks. *IEEE Communications Magazine*, 2019. v. 57, n. 8, p. 84–90, August 2019. ISSN 1558-1896. Citado na página 37.

LEVANTESI, M.; MELLO, D. A. A. An insight into the total cost of ownership of 5g fronthauling. In: *2018 20th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–5. ISSN 2161-2064. Citado na página 21.

LI, X. et al. The method and tool of cost analysis for cloud computing. In: *2009 IEEE International Conference on Cloud Computing*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 93–100. ISSN 2159-6190. Citado na página 21.

LONGARAY, A.; DAMAS, T. A. P. Modelo de programação inteira para a otimização da produção de carne de novilhos em rebanhos de corte: um estudo de caso. *Exacta*, 2013. 2013. ISSN 1678-5428. Disponível em: <<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81029238003>>. Citado na página 25.

LOPEZ, R. A. *Energia Solar para produção de eletricidade*. 2rd. ed. [S.l.]: São Paulo: Artliber Editora Ltd, 2012. 230 p. Citado na página 15.

LU, C. et al. Connecting the dots: Small cells shape up for high-performance indoor radio. *Ericsson Review (English Edition)*, 2014. v. 91, p. 38–45, 12 2014. Citado na página 13.

MALEKI, A. et al. Optimization of a grid-connected hybrid solar-wind-hydrogen chp system for residential applications by efficient metaheuristic approaches. *Applied Thermal Engineering*, 2017. v. 123, p. 1263 – 1277, 2017. ISSN 1359-4311. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431116329015>>. Citado 4 vezes nas páginas 3, 4, 7 e 10.

MELO, F. C. *Projeto e análise de desempenho de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica de baixa tensão em conformidade com a resolução normativa 482 da ANEEL*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, 2014. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14560>>. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.

- NAKABAYASHI, R. K. *Microgeração fotovoltaica no Brasil: condições atuais e perspectivas futuras*. Dissertação (Mestrado em Energia) — Instituto de Energia e Ambiente, University of São Paulo, São Paulo, 2014. Citado na página 39.
- NEOSOLAR. *Kit de montagem para laje - 6 painéis fotovoltaicos*. 2019. Disponível em: <<https://www.neosolar.com.br/>>. Citado na página 39.
- OKOYE, C. O.; SOLYALI, O. Optimal sizing of stand-alone photovoltaic systems in residential buildings. *Energy*, 2017. v. 126, p. 573 – 584, 2017. ISSN 0360-5442. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544217303900>>. Citado 3 vezes nas páginas 4, 8 e 10.
- OSSEIRAN, A. et al. Scenarios for 5g mobile and wireless communications: the vision of the metis project. *IEEE Communications Magazine*, 2014. v. 52, n. 5, p. 26–35, May 2014. ISSN 1558-1896. Citado na página 13.
- PACHECO, G. S. *Produção de Energia Elétrica Térmica*. 127 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade do Porto, 2014. Citado na página 17.
- PAIVA, M. L. *Avaliação da aplicabilidade de um sistema fotovoltaico conectado à rede em uma granja de aves no estado do Mato Grosso e seus impactos ambientais s*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018. Disponível em: <<http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/3405>>. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 20.
- PAMUKLU, T.; ERSOY, C. Reducing the total cost of ownership in radio access networks by using renewable energy resources. *Wireless Networks*, 2018. 10 2018. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 10.
- PAVAN, A. M.; LUGHI, V.; SCORRANO, M. Total cost of ownership of electric vehicles using energy from a renewable-based microgrid. In: *2019 IEEE Milan PowerTech*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–6. ISSN null. Citado na página 21.
- PRIEB, C. W. M. *Determinação da eficiência de seguimento de máxima potência de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2012. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/55460>>. Citado na página 18.
- RACHED, N. B. et al. Energy management optimization for cellular networks under renewable energy generation uncertainty. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2017. v. 1, n. 2, p. 158–166, June 2017. ISSN 2473-2400. Citado na página 2.
- RENGA, D. et al. Improving the interaction of a green mobile network with the smart grid. In: *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–7. ISSN 1938-1883. Citado 3 vezes nas páginas 2, 6 e 10.
- Renvu. *Canadian Solar CSI-60KTL-GS 3PH String Inverter 60KW 480V*. 2019. Disponível em: <<https://www.renuv.com/>>. Citado na página 39.

- ROBERTS, J. J. *Otimização de sistemas híbridos de geração de energia solar-eólico-diesel através de métodos metaheurísticos e função multiobjetivo*. Dissertação (Tese de Doutorado) — Universidade Estadual Paulista, 2016. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/142831>>. Citado na página 4.
- ROSA, A. *Processos de Energia Renováveis*. 3rd. ed. [S.l.]: Rio de Janeiro: Elsevier Brasil, 2016. Citado na página 19.
- Roy, P. et al. Technical and financial aspects of solar pv system for city dwellers of bangladesh where green energy installation is mandatory to get utility power supply. In: *2012 7th International Conference on Electrical and Computer Engineering*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 916–919. Citado na página 39.
- SANTOS, M. D. et al. O uso da programação linear inteira (pli) no apoio à decisão e a otimização do mix de produção. In: . [S.l.: s.n.], 2017. Citado na página 25.
- SHANKARANARAYANAN, N. K.; GHOSH, A. 5g. *IEEE Internet Computing*, 2017. v. 21, n. 5, p. 8–10, 2017. ISSN 1941-0131. Citado na página 1.
- SILVA, L. C. S.; PALHARES, P. E. L. Programação linear inteira na otimização dos lucros: aplicação em uma panificadora para auxiliar no processo de tomada de decisão. In: *Anais do IV Simpósio de Engenharia de Produção: Lean Cost Management como filosofia global de otimização em organizações*. [S.l.: s.n.], 2016. ISSN 2318-9258. Citado na página 24.
- SOLAR. *Fronius Symo LITE 20.0-3 20kW 480VAC TL Inverter 4,210,054,801*. 2019. Citado na página 39.
- SOLAR, M. C. *Painel Solar 320W Canadian Solar - CS6U -320P*. 2019. Disponível em: <<https://www.minhacasasolar.com.br/>>. Citado na página 39.
- SOUZA, D. d. S. et al. Modelagem de custo para redes móveis centralizadas de nova geração. In: *Anais do XXII Workshop de Gerência e Operação de Redes e Serviços*. Porto Alegre, RS, Brasil: SBC, 2017. ISSN 2595-2722. Disponível em: <<https://sol.sbc.org.br/index.php/wgrs/article/view/2597>>. Citado 3 vezes nas páginas 1, 3 e 21.
- SOUZA, M. A. d. *Sistemas fotovoltaicos aplicados em redes móveis heterogêneas*. 111 p. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Belém, 2017. Disponível em: <<http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011-/9259>>. Citado 15 vezes nas páginas X, 4, 7, 8, 10, 17, 19, 20, 21, 22, 36, 37, 39, 40 e 49.
- STACHELSKI, W.; TAGLIALENHA, S. L. S.; FERNANDES, C. W. N. A utilização das ferramentas lingo e solver no ensino de pesquisa operacional na engenharia: um estudo de caso na aquisição de softwares. In: *Anais do XXXVI Encontro Nacional de Engenharia de Produção: Contribuições da Engenharia de Produção para Melhores Práticas de Gestão e Modernização do Brasil*. [S.l.: s.n.], 2015. Citado na página 25.
- TOLMASQUIM, M. T. *Energia Renovável Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceanica*. [S.l.]: Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 18.

- TONINI, F. et al. Minimum cost deployment of radio and transport resources in centralized radio architectures. In: *2016 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–5. Citado 10 vezes nas páginas X, 2, 7, 9, 10, 13, 14, 36, 37 e 49.
- TONINI, F. et al. Minimum cost deployment of radio and transport resources in centralized radio architectures. In: *2016 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–5. Citado 3 vezes nas páginas 20, 30 e 36.
- TONINI, F. et al. Radio and Transport Planning of Centralized Radio Architectures in 5G Indoor Scenarios. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2017. 2017. ISSN 07338716. Citado na página 47.
- TORRES, R. C. *Energia solar fotovoltaica como fonte alternativa de geração de energia elétrica em edificações residenciais*. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 16, 20 e 31.
- VIEIRA, E. A. *Aumento do Rendimento de Módulos Fotovoltaicos com Aproveitamento da Energia Térmica para Geração Termoelétrica de Estado Sólido*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2018. Disponível em: <<http://repositorio.ufsm.br/handle/1/14061>>. Citado 3 vezes nas páginas 16, 17 e 18.
- ZHANG, S. et al. Energy-aware traffic offloading for green heterogeneous networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2016. v. 34, n. 5, p. 1116–1129, May 2016. ISSN 1558-0008. Citado na página 2.
- ZHANG, Y. et al. Minimum cost solar power systems for LTE macro base stations. *Computer Networks*, 2017. 2017. ISSN 13891286. Citado 6 vezes nas páginas 1, 2, 4, 6, 8 e 10.
- ZILLES, R. et al. *Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica*. 1rd. ed. [S.l.]: São Paulo: Oficina de Texto, 2012. Citado na página 16.