

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS — UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E
SISTEMAS
NÍVEL DOUTORADO

EDERSON PAULO VOGEL

DESIGN CONSTRUTAL APLICADO AS REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA PARA LOCALIDADES RURAIS E REMOTAS

SÃO LEOPOLDO-RS
2022

Ederson Paulo Vogel

DESIGN CONSTRUTAL APLICADO AS REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA PARA LOCALIDADES RURAIS E REMOTAS

Tese apresentada como requisito parcial para a
obtenção do título de Doutor pelo Programa
de Pós-Graduação em Engenharia de
Produção e Sistemas da Universidade do Vale
do Rio dos Sinos — UNISINOS

Orientador:
Prof. Dr. André Luiz Korzenowski

São Leopoldo-RS
2022

V878d

Vogel, Ederson Paulo

Design Construtal Aplicado as Redes de Distribuição de Energia Elétrica para Localidades Rurais e Remotas / Ederson Paulo Vogel — 2022.

108 f.: il.; 30 cm.

Tese (Doutorado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, São Leopoldo-RS, 2022.

“Orientador: Prof. Dr. André Luiz Korzenowski.”

1. Energia Renovável Solar. 2. Localidades Rurais Remotas. 3. Redes Neurais Artificiais. 4. Teoria Construtal. I. Título.

CDU 62

Dados Internacionais de Catalogação na publicação (CIP)

(Bibliotecário responsável: Silvana Dornelles Studzinski — CRB 10/2524)

*Dedico este trabalho à minha esposa,
Cristiane Klein e minha filha, Elleonora Klein Vogel
aos meus pais, Ari e Maria Terezinha Vogel,
à minha sogra, Marlene Perius pelo apoio
dado para a concretização de mais
essa etapa em minha vida.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por ter me abençoado e permitido esta conquista muito importante. A minha esposa, Cristiane Klein e à minha filha, Elleonora Klein Vogel, aos meus pais Ari e Terezinha e à mãe de minha esposa, Marlene Perius, que lutaram comigo para que esta vitória acontecesse e por serem à base da minha educação e formação pessoal. Agradeço pela compreensão quando, por inúmeras vezes, não lhes dei a devida atenção. Aos colegas da Universidade do Vales do Rio dos Sinos (Unisinos), aos meus amigos e colegas de trabalho, pela inestimável força ao encorajar-me em muitos momentos desta trajetória. A empresa RGE, pelo apoio e compreensão para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu orientador inicial, o Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha, e ao Co-orientador Prof. Dr. André Luiz Korzenowski, que se tornou meu orientador no último ano do trabalho de tese, toda a minha consideração, respeito e admiração. Agradeço pela confiança e o empenho dedicado ao longo deste trabalho. Por toda a contribuição, paciência e competência profissional dedicados a mim.

Agradeço também, à CAPES por me propiciar não somente a este crescimento acadêmico, mas sim, ao crescimento e qualidade dos cursos de Pós Graduação, principalmente ao de Engenharia de Produção e Sistemas, da Universidade Unisinos.

A minha amada esposa e filha, ficam todos meus agradecimentos, devo a vocês a realização desse sonho, compreendendo os momentos difíceis e por serem as pessoas que me fazem cada momento mais feliz.

*“O que sabemos é uma gota;
o que ignoramos é um oceano.”
(Isaac Newton)*

RESUMO

A geração de energia elétrica através de fontes renováveis vem sendo relevante para atender o crescimento populacional, em âmbito mundial. Sendo assim, o tipo de energia proveniente do sistema solar fotovoltaico é um dos mais aplicados no momento, principalmente em países com um clima tropical, como é o caso do Brasil. No entanto, observa-se que um grande número de habitantes, localizados em áreas rurais e até mesmo remotas em relação aos grandes centros urbanos, não possuem um fornecimento de energia elétrica por variáveis questões, tais como acesso e distância das fontes geradoras situadas nos centros de carga. Portanto, o presente trabalho tem como objetivo propor configurações de instalações consumidoras mais eficientes, que utilizam o sistema fotovoltaico com geração de energia elétrica independente ou compartilhado, desconexo à rede da concessionária, também chamado de *off-grid*, utilizando o Método *Design Construtal*. Outrossim, traz como objetivo a projeção e evolução de conexão deste sistema de rede de distribuição de energia elétrica, aplicando iterações com Redes Neurais Artificiais (RNAs). Como resultado, identifica-se que é possível o compartilhamento de infra-estrutura de fontes de geração desta energia de até 16 fornecimentos, em uma projeção de evolução planejada de *design*. Em análise às RNAs, o resultado apresentou uma média obtida de 4,39 fornecimentos conectados à uma fonte geradora de energia elétrica, observou-se que 25% das iterações apresentaram resultados de médios 3,22 fornecimentos, 25% apresentaram uma média de 4,89 fornecimentos, nesta mesma condição.

Palavras-chave: Energia Renovável Solar. Localidades Rurais Remotas. Redes Neurais Artificiais. Teoria Construtal.

ABSTRACT

The generation of electricity through renewable sources has been relevant to meet population growth worldwide. Thus, the type of energy from the photovoltaic solar system is one of the most applied at the moment, especially in countries with a tropical climate, as is the case in Brazil. However, it is observed that a large number of inhabitants, located in rural and even remote areas in relation to large urban centers, do not have an electricity supply due to variable issues, such as access and distance from generating sources located in the load centers. Therefore, the present work aims to propose more efficient consumer facility configurations, which use the photovoltaic system with independent or shared electricity generation, disconnection to the concessionaire's network, also called *off-grid*, using the *Design Construtal Method*. Moreover, it aims at the projection and evolution of connection this network system of distribution of electric energy, applying iterations with Artificial Neural Networks (ANNs). As a result, it is identified that it is possible to share the infrastructure share of power generation sources of up to 16 supplies, in a planned evolution projection of *design*. In analysis of the RNAs, the result showed an average obtained of 4.39 supplies connected to an electric power generating source, it was observed that 25% of the iterations presented results of average 3.22 deliveries, 25% presented an average of 4.89 deliveries, in this same condition.

Keywords: Solar Renewable Energy. Remote Rural Locations. Artificial Neural Networks. Constructal Theory.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Capacidade Instalada de Energia fotovoltaica, no Brasil.	21
Figura 2:	Comparação da Capacidade Instalada de Energia Elétrica em diferentes Tecnologias, no Brasil.	21
Figura 3:	Consumo de energia proveniente de fontes renováveis e não renováveis.	22
Figura 4:	Investimento Público em Fontes de Geração de Energia Elétrica Renovável de 2012 à 2019, no Brasil.	24
Figura 5:	Distribuição para aquecimento de usuários.	34
Figura 6:	Consumo Médio de Energia Elétrica no Brasil / Classe [kWh / Unidade Consumidora]	37
Figura 7:	Sistema fotovoltaico conectado à rede de distribuição de energia elétrica.	49
Figura 8:	Sistema fotovoltaico desconectado da rede de distribuição de energia elétrica.	50
Figura 9:	Fluxograma do Método <i>Design</i> Construtal, aplicado no presente trabalho.	66
Figura 10:	<i>Designs</i> Iniciais ao Modelo.	69
Figura 11:	<i>Design</i> Dendrítico Dicotômico Duplo	75
Figura 12:	<i>Design</i> Dendrítico Quadruplicado Duplo	76
Figura 13:	Demonstração do Resultado da Iteração.	79
Figura 14:	Demonstração do <i>Design</i> Resultante da Iteração.	79
Figura 15:	Resultado Total das Iterações: Média de Clientes x Geração e Queda de Tensão.	80
Figura 16:	Resultado Total das Iterações: Resultado da Média de Clientes x Geração.	80
Figura 17:	Resultado Total das Iterações: Quantidade Média de Clientes x Geração / iterações.	81
Figura 18:	Resultado Total das Iterações: Histograma da Média de Clientes x Geração.	82
Figura 19:	Resultado Total das Iterações: <i>Boxplot</i> dos <i>designs</i> gerados.	83
Figura 20:	Resultado Parcial das Iterações: Média resultante de Clientes x Geração ; iteração.	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Consumo da classe rural por regiões do Brasil (GWh).	22
Tabela 2:	Estimativa do custo de redes rurais com padrões simplificados.	23
Tabela 3:	Artigos de busca nas bases de dados da Capes.	26
Tabela 4:	Artigos de busca nas bases de dados Scopus.	33
Tabela 5:	Porcentagem de redução da demanda individual correspondente ao número de consumidores de força no mesmo circuito secundário.	38
Tabela 6:	Coefficientes de Queda de Tensão Unitária para condutores de alumínio isolado multiplexados.	41
Tabela 7:	Artigos encontrados nas bases de dados Scopus.	56
Tabela 8:	Cálculo de queda de tensão de um sistema Radial.	70
Tabela 9:	Cálculo de queda de tensão de um sistema Radial (fator de demanda de 0,86).	71
Tabela 10:	Cálculo de queda de tensão de um sistema Dendrítico Dicotômico (fator de demanda de 0,86).	72
Tabela 11:	Cálculo de queda de tensão de um sistema Dendrítico Quadruplicado (fator de demanda de 0,86).	73
Tabela 12:	Cálculo de queda de tensão de um sistema Dendrítico Dicotômico Duplo (fator de demanda de 0,71).	74
Tabela 13:	Cálculo de queda de tensão de um sistema Dendrítico Quadruplicado Duplo (fator de demanda de 0,71).	77
Tabela 14:	Parâmetros de Definição Randômica.	78
Tabela 15:	Resultados das Iterações em Relação à Média de Clientes x Geração.	82

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BESS	Sistema de Armazenamento de Energia da Bateria
CC/CA	Corrente Elétrica Contínua para Corrente Elétrica Alternada
CdTe	Célula Solar de Telúrio de Cádmio
CEEE	Empresa Distribuidora de Energia Elétrica do Rio Grande do Sul
CEMIG	Empresa Distribuidora de Energia Elétrica de Belo Horizonte
CIGS	Célula Solar, cuja fórmula química é $CuSe_2$
CIS	Célula Solar, cuja fórmula química é $CuInSe_2$
CSP	Energia Solar Concentrada (CSP)
CVaR	Valor em Risco ao Investidor Condicional
D	Demanda
DSR	<i>Design Science Research</i>
EBE	Empresa Distribuidora de Energia Elétrica de São Paulo (Bandeirante Energia S/A)
Elektro	Empresa Distribuidora de Energia Elétrica de São Paulo (Elektro Redes S/A)
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FD	Fator de Demanda
FP	Fator de Potência
GEE	Gases de Efeito Estufa
GW	Gigawatt
GWh	Gigawatt-hora
I	Corrente da carga, dada em Ampère
IA	Inteligência Artificial
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IRENA	International Renewable Energy Agency
kV	Quilovolt
kVA	Quilovolt Ampère
kVAr	Quilovolt Ampère Reativo

kW	Quilowatt
kWh	Quilowatt-hora
LPT	Programa Governamental Luz Para Todos
MW	Megawatt
NBR	Norma Brasileira
<i>Off-Grid</i>	Sistema Desconectado da Rede de Energia Elétrica
<i>On-Grid</i>	Sistema Conectado à Rede de Energia Elétrica
PIB	Produto Interno Bruto
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PV	Energia Fotovoltaica
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
R	Resistência do condutor, dada em Ω (tabelado)
REN	Resolução Normativa
RNA	Redes Neurais Artificiais
Scopus	Plataforma de Pesquisas da Elsevier
<i>Smart Grid</i>	Sistema Inteligente de Rede
<i>trade-off</i>	Termos da língua inglesa que definem uma situação em que há conflito de escolha
VA	Volt Ampère
VBA	<i>Visual Basic for Application</i>
X	Reatância do condutor, dada em Ω (tabelado)
Z	Impedância do condutor, dada em Ω

LISTA DE SÍMBOLOS

$\xi_l = \delta$	Elasticidade-preço do estoque dos aparelhos eletrodomésticos e/ou eletrointensivos
$\xi_l = \phi$	Elasticidade-preço do bem substituto
$\xi_p = \alpha$	Elasticidade-preço
$\xi_r = \beta$	Elasticidade-renda
ℓ	Comprimento do circuito, dado em km
C_t	Consumo (residencial, comercial ou industrial) de energia elétrica no tempo t
D_{max}	Demanda Máxima
D_v	Queda de tensão, dada em V
L_t	Preço dos aparelhos eletrodomésticos (residencial) ou eletrointensivos (ligados ao comércio ou à indústria) no tempo t
P_{inst}	Potência Instalada
P_t	Tarifa (residencial, comercial ou industrial) de energia elétrica no tempo t
S_t	Preço de um bem substituto à energia elétrica no tempo t (o único segmento que tem um possível bem substituto à energia elétrica industrial)
V_n	Tensão de linha do circuito, dado em V
Y_t	Renda (rendimento do trabalhador, no caso residencial, e PIB nos casos comercial e industrial) no tempo t

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Apresentação do Tema e Problema de Pesquisa	15
1.2 Objetivos	18
1.2.1 Objetivo Geral	18
1.2.2 Objetivos Específicos	18
1.3 Justificativa	19
1.3.1 Justificativa Acadêmica	25
1.3.2 Justificativa Econômica	27
1.3.3 Justificativa Social	29
1.4 Delimitações	30
1.5 Estrutura do Trabalho	30
2 REFERENCIAL TEÓRICO	32
2.1 Teoria Construtal	32
2.2 Sistema Brasileiro de Distribuição de Energia Elétrica	35
2.2.1 Demanda de energia elétrica	35
2.2.2 Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica	39
2.3 Geração Renovável Solar de Energia Elétrica	42
2.3.1 Normativa Brasileira de Geração Distribuída: ANEEL	43
2.3.2 Sistema Fotovoltaico: Módulos ou Painéis Solares	44
2.3.3 Modelagem de um Sistema de Painéis Fotovoltaicos	46
2.3.4 Inversor CC/CA	47
2.3.5 Tipos de Sistemas de Geração de Energia Fotovoltaica	48
2.4 Redes Neurais Artificiais (RNAs)	54
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	58
3.1 Classificação da Pesquisa	58
3.1.1 <i>Design Science Research</i>	60
3.2 Metodologia do Trabalho	61
3.2.1 Primeira Etapa: Levantamento Bibliográfico	61
3.2.2 Segunda Etapa: Modelagem do Problema de Pesquisa	62
3.2.3 Terceira Etapa: Fluxograma da Lei Construtal	64
3.2.4 Quarta Etapa: Aplicação de RNA	66
3.2.5 Quinta Etapa: Análise dos Resultados	68
4 RESULTADOS	69
4.0.1 Análise da queda de tensão dos <i>designs</i> iniciais	69
4.1 Considerações dos <i>Designs</i> Iniciais: Queda de Tensão	73
4.1.1 Evolução dos Sistemas Distribuídos	74
4.2 Análise de Processo de Iterações com a Utilização de IA	77
4.2.1 Resultado das Iterações	79

5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	85
	REFERÊNCIAS	88
	APÊNDICE A PSEUDOCÓDIGO EM VBA	96

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação do Tema e Problema de Pesquisa

O estudo sobre energias renováveis vem cada vez mais sendo abordado em pesquisas acadêmicas, aplicando os conceitos no âmbito profissional, em diferentes áreas das organizações. Segundo Dupont, Grassi e Romitti (2015), o fornecimento de energia elétrica para atender a grande demanda tem sido realizado de forma insustentável ao longo dos anos.

Estudos citados desde o início deste milênio, tal como Castro (2002), descrevem fatores da necessidade de geração de energia elétrica através de fontes alternativas, resultado do aumento de cerca de quatro vezes o consumo desta energia em âmbito mundial, salientado por Freitas et al. (2019). As fontes renováveis de produção de energia, principalmente a elétrica, promovem o desenvolvimento sustentável, onde com a redução anual do custo dos sistemas solares e a valorização dos custos ambientais e sociais da geração centralizada, o sistema solar se torna economicamente, em estudo do ano de 2012, competitivo em curto prazo (MELLO et al., 2012).

Neste sentido, descrito por Ferreira, Fardin e Rueda-Medina (2018), diversos estudos de âmbito mundial demonstram no ano de 2018, um impacto do uso de combustíveis fósseis no meio ambiente. Somado à esta crescente demanda energética, a necessidade de energia elétrica proveniente de fontes não poluentes e renováveis, se torna evidente e necessária.

Segundo CASALE (2018), o Brasil tem vantagem frente a outras nações em relação a redução de impactos negativos ao meio ambiente pela emissão de poluentes e a crescente demanda por energia elétrica, dado que mais da metade da geração desta energia é via hidrelétrica, analisado no estudo do ano de 2018. Essa superioridade, porém, está comprometida devido à alteração recorrente no regime hidrológico, fator de instabilidade na oferta brasileira de energia elétrica. Este problema leva à busca de outras fontes de geração desta energia. A energia elétrica solar, especialmente a fotovoltaica, constitui uma solução de baixo impacto negativo ambiental, fazendo uso de inesgotável fonte de energia: o sol.

Outrossim, conforme o Atlas Brasileiro de Energia Solar de Pereira et al. (2017),

A melhoria na qualidade de vida da população vem sendo alcançada com a evolução da renda de grande parte da população brasileira nos últimos anos, possibilitando o acesso às infraestruturas básicas como moradia, saneamento e transporte. Programas de eletrificação rural também foram responsáveis por um impacto importante, uma vez que houve um acréscimo de 3,2 milhões de domicílios rurais eletrificados nos últimos 10 anos. Como consequência

o consumo de energia per capita, principalmente elétrica, vem crescendo de forma consistente com o PIB, elevando a intensidade energética da economia brasileira em torno de 2% ao ano (PEREIRA et al., 2017).

Conforme citado por Viana et al. (2019), o Brasil possuía em 2019, cerca de 207 milhões de habitantes, dos quais aproximadamente 16% viviam em zonas rurais. Dessa população rural, cerca de 595 mil residências não possuíam acesso à energia elétrica.

Em análise ao estudo de Urmee e Md (2016), que salienta que projetos de geração de energia renovável têm altos custos iniciais de capital às comunidades em áreas rurais, geralmente estas não conseguem arcar com tais custos. Portanto, é comum que os programas de eletrificação rural e remota baseados em energia renovável nos países em desenvolvimento, sejam financiados por meio de doações de capital fornecidas pelas organizações doadoras ou pelos governos. Na identificação das principais questões socioculturais e políticas com fatores que desempenham um papel importante no fornecimento de energia fora da rede, ou o do termo em inglês *off-grid*, e como eles podem ser incorporados ao projeto, planejamento e implementação de programas de eletrificação rural, as políticas para programas de energia renovável *off-grid* precisam ser desenvolvidas de maneira a refletir as necessidades das comunidades-alvo.

Em todo o mundo, conforme citado por Fuso Nerini et al. (2014), haviam, aproximadamente, cerca de 1,2 bilhão de pessoas sem acesso à eletricidade. Reconhecido pelo governo brasileiro como um direito do cidadão, o acesso à eletricidade foi estendido a quase 15 milhões de pessoas desde 2003 até meados de 2010, como resultado do programa denominado como “Luz Para Todos” (LPT), conforme Bacellar e Rocha (2010). No entanto, partes consideráveis da região amazônica, por exemplo, ainda não têm acesso a serviços de eletricidade devido às longas distâncias que precisam ser cobertas e a topografia é desafiadora. Diante disto, Muniz, De Sa e Da Rocha (2015) descrevem um estudo que conclui que o programa não convergiu para o pleno cumprimento do acesso à energia elétrica em áreas remotas da Amazônia e foram identificados três desafios principais: necessidade de ajuste das estruturas institucionais no Brasil; harmonização das tecnologias com o contexto regional e a utilização de fundos do governo de forma mais eficaz.

Desta forma e em análise a um contexto de planejamento estratégico, um fator crucial, quando tratamos de desenvolvimento e aumento da matriz energética brasileira, é a organização com que isso precisa ser realizado, descrito pela ANEEL (2020); neste caso, os investimento de sistemas alternativos de geração de energia elétrica, tais com o fotovoltaico, precisam ser planejados para um resultado de menor custo e com maior eficiência, tanto econômica, quanto técnica.

Com a constante atualização pela ANEEL de resoluções brasileiras no que tange ao as-

sunto de geração distribuída de energia elétrica, o qual a solar fotovoltaica está inclusa, criada no ano 2012 conforme ANEEL (2012) e atualizada no ano de 2015 pela ANEEL (2015), observa-se a existência de lacunas de pesquisas e de planejamento da geração desta energia compartilhada através de fonte renovável solar nestas localidades distantes dos grandes centros urbanos, em *off-grid*.

Neste sentido, pode ser natural a dedução em uma geração de energia elétrica única para cada fornecimento (também chamado de unidade consumidora), atendendo os requisitos técnicos, porém, pode não ser esta a melhor solução econômica: se gerar energia elétrica para duas ou mais unidades consumidoras em mesma fonte, não seria possível obter uma maior eficiência do sistema? Nesta situação, será que necessitaria gerar energia para o atendimento à carga total destas unidades? Questionamentos como estes podem ser equacionados e interpretados, utilizando a Teoria Construtal.

A base desta teoria, segundo Bejan e Lorente (2010), é que em todo o sistema finito onde haja uma corrente fluindo, seja de um ser animado *versus* inanimado, como uma rota migratória ou a comunicação entre computadores, evolui na direção de facilitar os escoamentos. Aplica-se a Teoria Construtal em Engenharia usando-se o método Design Construtal, que é muito útil para tornar o acesso aos escoamentos mais fáceis.

O que a Lei Construtal captura é uma tendência central na natureza. No panorama geral, todos os rios, todas as árvores, todos os animais da terra, a força motriz por trás da evolução de tudo o que flui é a geração de forma e estrutura para se mover mais facilmente. É por isso que podemos dizer que esta tendência não intencional tem um propósito. Todos os projetos do fluxo na terra, das correntes de ar, dos rios e das árvores até peixes, pessoas, pássaros, e tecnologia surgem e se compõem para melhorar o movimento. É porque essa tendência tem uma direção, um propósito, que podemos prever como as coisas devem evoluir no futuro (BEJAN; LORENTE, 2010).

Quando trata-se de geração de energia elétrica *off-grid* com um sistema alternativo, no caso o fotovoltaico, a análise da geometria deste pode ser dimensionada pela Teoria Construtal; no entanto, é preciso observar uma futura conexão com o sistema urbano, tornando a rede desta energia *on-grid*. Desta forma, surge a necessidade de um planejamento deste fator também, tão importante quanto a eficiência do sistema *off-grid*, aplicando um método de Redes Neurais Artificiais (RNA).

O método computacional de aprendizagem da aplicação de uma RNA é fundamental para a projeção de crescimento de um sistema. Uma rede neural recorrente possui, ao menos, um laço de re-alimentação. Desta forma, o que podemos chamar de "adaptação computacional" ocorre

baseada em um processo realizado por várias simulações computacionais, realimentando o sistema e "ensinando" a máquina a obter um comportamento de maior eficiência (HAYKIN, 2017). Portanto, este método se torna promissor para uma projeção de conexão do sistema.

O acesso à energia elétrica traz não somente o desenvolvimento econômico e social em uma determinada localidade, mas a "conexão" com o restante do país, e até do mundo; a eletricidade promove uma série de possibilidades posteriores, as quais podemos citar os mais relevantes: qualidade no trabalho manual com a aquisição de eletrodomésticos para lavar roupas, resfriar ou congelar alimentos, qualidade noturna com ar-condicionado em dias de calor ou frio, qualidade na informação através de conexão com a internet, entre outros demais inúmeros fatores que trazem um novo método de vida e, também, um avanço na agricultura que é considerado o principal ramo de trabalho da classe rural.

Desta forma, o presente trabalho descreve uma contribuição para uma alternativa de fornecimento desta energia elétrica nestas áreas rurais e consideradas remotas, através de um sistema fotovoltaico (energia solar), trazendo em pauta, a possibilidade do compartilhamento desta fonte geradora a mais de uma unidade consumidora. Este processo de análise, cujo objetivo é de encontrar um sistema com este tipo de configuração que conecte um maior número de usuários em mesma fonte geradora de energia elétrica, é realizado com a aplicação do Design Construtal e de RNAs.

1.2 Objetivos

Os objetivos do presente trabalho se dividem em geral e específicos.

1.2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como principal objetivo determinar as configurações para uma distribuição de energia elétrica compartilhada em localidades rurais e remotas, através de fonte renovável de energia solar e em *off-grid*, aplicando o *Design Construtal* e complementando com a projeção futura de novas conexões com as fontes geradoras existentes nestas localidades, utilizando a metodologia de RNAs.

1.2.2 Objetivos Específicos

Com a possibilidade de fornecimento de energia elétrica através de fonte renovável e *off-grid* às localidades rurais salientadas como remotas e uma projeção de expansão deste sistema

para N usuários, os objetivos específicos para o presente trabalho são:

- a) elaborar um estudo sobre o a configuração de melhor desempenho de distribuição de energia elétrica à área remota, individual por fornecimento e/ou em redes radiais ou dendríticas, utilizando o Método Design Construtal;
- b) utilizar a técnica de Redes Neurais Artificiais (RNA) como método de análise multicritério para a expansão do sistema elétrico rural, buscando o compartilhamento de fonte geradora de energia elétrica, aplicando iterações de *designs* pré-definidos e seleção randômica de variáveis.

1.3 Justificativa

No mundo existe uma dependência e uma demanda cada vez maior de energia, principalmente a elétrica, mas não limitada exclusivamente a ela. Desta forma, o fornecimento desta energia para atender tamanha demanda tem sido realizado através de energias que não são sustentáveis ao longo dos anos. Segundo Dupont, Grassi e Romitti (2015), o interesse comum da sociedade vem motivando o desenvolvimento e a implantação de sistemas de geração baseados em fontes renováveis e mudanças importantes observadas em âmbito mundial.

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) salientado por Pereira et al. (2017), cita que a capacidade instalada total no Brasil de energia elétrica, dada em Gigawatt (GW), descreve como principal fonte desta a Hídrica, Eólica e Solar Fotovoltaica, respectivamente. A tecnologia solar fotovoltaica foi a que teve o maior aumento nesta capacidade instalada globalmente, nos últimos 10 anos. Além dos incentivos de vários países para essa forma de energia, decorrente de compromissos assumidos de mitigação de emissões de gases de efeito estufa, a queda nos preços dos módulos fotovoltaicos é salientada como sendo principal fator para esse crescimento acelerado.

Em relação a energia proveniente do sol, em análise do INPE, diferente das fontes de geração de energia através do sistema hidrelétrico no Brasil, a energia solar é temporalmente intermitente e apresenta uma variabilidade espacial elevada em razão de sua forte relação com condições meteorológicas locais (cobertura de nuvens, concentração de gases atmosféricos, sistemas sinóticos, entre outros) e fatores astronômicos associados aos movimentos orbital e de rotação da Terra. O conhecimento sobre o potencial do recurso solar incidente na superfície é essencial, mas não suficiente para impulsionar o uso dessa fonte de energia. A variabilidade do recurso solar tem impactos em aspectos técnicos de qualidade e de segurança do sistema elétrico. Assim, além do potencial disponível, informações confiáveis sobre a variabilidade

do recurso solar são imprescindíveis para dar suporte ao desenvolvimento de projetos para aproveitamento dessa fonte de energia (PEREIRA et al., 2017).

Conforme *International Renewable Energy Agency*, IRENA (2014), a energia pode ser aproveitada diretamente do sol, mesmo em dias nublados. A energia solar é usada em todo o mundo e é cada vez mais popular para gerar eletricidade ou aquecer e dessalinizar a água. A energia solar é gerada de duas maneiras principais:

- A energia fotovoltaica (PV), que consiste num dispositivo eletrônico conversor da luz solar diretamente em eletricidade;
- A energia solar concentrada (CSP), que utiliza espelhos para concentrar os raios solares. Esses raios aquecem o fluido, que cria vapor para acionar uma turbina e gerar eletricidade. O CSP é usado para gerar eletricidade em usinas de grande escala.

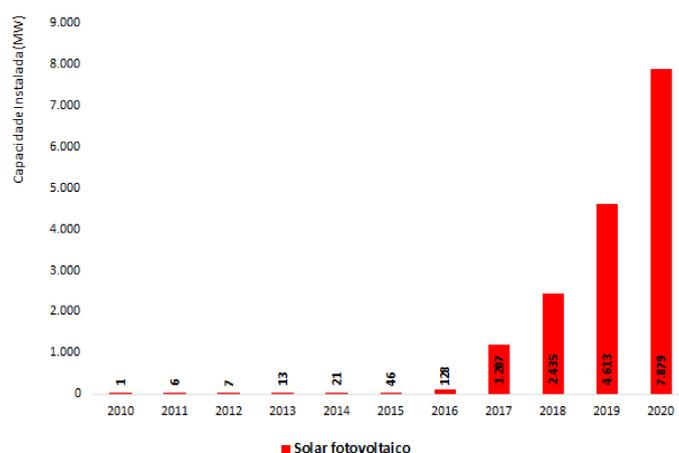
Entre as fontes renováveis, segundo Dupont, Grassi e Romitti (2015), a energia solar fotovoltaica é uma das mais abundantes em toda a superfície terrestre e é inesgotável na escala de tempo humano. Por esta razão, é uma das alternativas mais promissoras para a composição de uma nova matriz energética mundial e seu aproveitamento tem se consolidado em muitos países. É esperado, segundo descreve Brito e Silva (2006) em estudo do ano de 2006, que até 2040 esta seja a fonte renovável de energia mais importante e significativa para o planeta.

Segundo afirma Pereira et al. (2017), programas de eletrificação rural também foram responsáveis por um impacto importante, uma vez que houve um acréscimo de 3,2 milhões de domicílios rurais eletrificados nos últimos 10 anos. Como consequência, o consumo de energia *per capita*, principalmente a elétrica, vem crescendo de forma consistente com o PIB, elevando a intensidade energética da economia brasileira em torno de 2% ao ano.

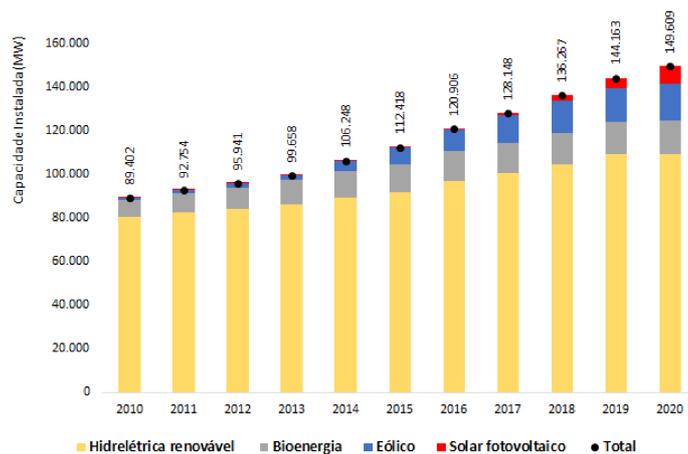
O Brasil é um país que, nos últimos anos, vem ampliando a geração de energia renovável através do sistema fotovoltaico. Observa-se, conforme Figura 1, uma evolução expressiva entre os anos de 2011 e 2019 (IRENA - International Renewable Energy Agency, 2020) e, principalmente, nestes três últimos, no quesito de capacidade instalada deste tipo de geração de energia elétrica:

No entanto, em comparação às demais tecnologias de geração de energia elétrica no Brasil, a solar fotovoltaica, segundo IRENA - International Renewable Energy Agency (2020), não está entre as principais fontes energéticas do país em crescimento de geração. Na Figura 2, esta comparação é ilustrada na unidade de Megawatt (MW):

A instalação um sistema fotovoltaico ainda é caro e a eficiência da maior parte dos módulos comerciais é de apenas 15%. Em geral, esses módulos são de silício mono ou policristalino, chamadas de células de primeira geração. Existem também as células de silício amorfo, que

Figura 1: Capacidade Instalada de Energia fotovoltaica, no Brasil.

Fonte: Adaptado de IRENA - International Renewable Energy Agency (2020).

Figura 2: Comparação da Capacidade Instalada de Energia Elétrica em diferentes Tecnologias, no Brasil.

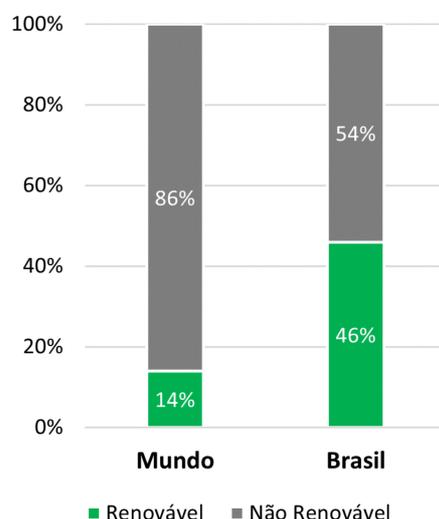
Fonte: Adaptado de IRENA - International Renewable Energy Agency (2020).

possuem eficiência de 7%, e em menor escala estão as células CdTe, CIGS (CuInGaSe₂) e CIS (CuInSe₂), que têm eficiência em torno de 11% (MACHADO; MIRANDA, 2015).

No que tange à matriz energética brasileira, segundo a Empresa de Pesquisa Energética, EPE (2021), observa-se, na Figura 3 que compara o Brasil com mundo no ano de 2019, o Brasil possui um percentual da geração de energia elétrica através de fontes renováveis, maior em relação à análise em nível mundial. Essa característica da matriz é muito importante. As fontes não renováveis de energia são as maiores responsáveis pela emissão de Gases de Efeito

Estufa (GEE). Como há o consumo de mais energia das fontes renováveis que em outros países, observa-se que o Brasil emite menos GEE por habitante que a maioria dos outros países.

Figura 3: Consumo de energia proveniente de fontes renováveis e não renováveis.



Fonte: Adaptado de EPE (2021).

Conforme o Anuário Estatístico de Energia Elétrica de 2021 da EPE (2021), o consumo da classe rural no Brasil, dado em Gigawatt-hora (GWh), representa 6,50% do consumo total nacional, ou seja, 30.907 GWh. Nesta linha, a região sul do país é que possui um maior consumo desta classe, sendo o estado do Rio Grande do Sul com a maior representatividade. A comparação das diferentes regiões do país, no que tange ao consumo de energia elétrica desta classe supracitada, pode ser observada na Tabela 1.

Tabela 1: Consumo da classe rural por regiões do Brasil (GWh).

Regiões	Consumo / Ano (GWh)				
	2016	2017	2018	2019	2020
Norte	937	1.007	1.023	1.038	1.149
Nordeste	5.280	5.264	5.328	5.633	5.410
Sudeste	8.296	8.504	9.083	8.311	9.821
Sul	9.500	9.864	10.134	10.152	10.552
Centro-Oeste	3.524	3.496	3.600	3.736	3.975
Brasil	23.455	28.135	29.168	28.870	30.907

Fonte: Adaptado de EPE (2021).

Conforme estudos de Ribeiro et al. (2015), foram realizadas estimativas de custos para duas distribuidoras de energia elétrica do estado de São Paulo: Elektro e EBE. Os custos

modulares, conforme médias identificadas em um número expressivo de obras realizadas por estas empresas, são apresentados na Tabela 2:

Tabela 2: Estimativa do custo de redes rurais com padrões simplificados.

Distribuidora	Custo R\$/ km	Custo R\$/ Ligação
Elektro	10.260	1.412
EBE	11.749	1.319
Custo Médio R\$	11.005	1.366

Fonte: Adaptado de EPE (2018a).

No que tange à eletrificação rural, a abordagem mais comum em todo o mundo tem sido a extensão da rede. A maior parte da eletricidade do mundo é gerada em usinas centralizadas movidas a combustíveis como carvão e gás natural. Como as usinas de energia são de grande porte, usá-las para fornecer eletricidade às famílias rurais exige a extensão da rede além das áreas industriais e urbanas. Nesse cenário, a eletrificação rural é essencialmente um desafio de estender a rede para comunidades rurais remotas e depois mantê-la para garantir um suprimento e qualidade adequada de eletricidade (SLOUGH; URPELAINEN; YANG, 2015).

Salientado por Akinyele, Rayudu e Nair (2015), nos países em desenvolvimento onde o aumento do acesso à eletricidade não será possível no curto prazo, a distribuição de energia elétrica ocorrerá apenas com a expansão da rede elétrica. Por isso, faz parte das políticas nacionais dos governos desses países, incorporar soluções de energia *off-grid* em seus planos de eletrificação rural, o que tem mostrado favorecer a aplicação de energia solar, especialmente em países onde há abundância de recursos deste tipo de energia.

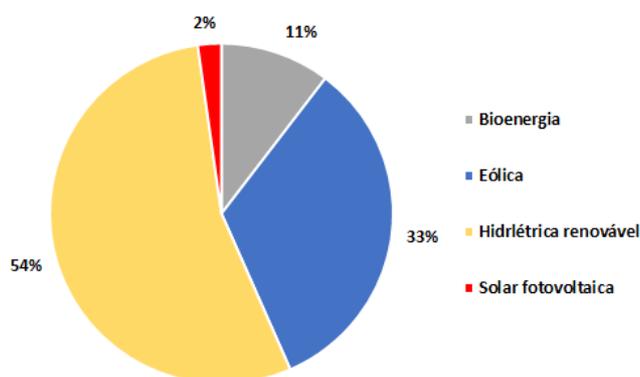
Ainda, descrito por Slough, Urpelainen e Yang (2015), dados estatisticamente representativos comparando o Censo Brasileiro de 2000 e 2010 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE (2010)), descrevem que o Brasil possibilitou o fornecimento de energia elétrica a municípios com baixas taxas de acesso inicial à eletricidade. Além disso, observa-se que o governo não conseguiu atender este fornecimento em comunidades rurais mais remotas e pouco povoadas. As implicações de políticas primárias incluem o direcionamento mais preciso dos municípios menos desenvolvidos, intervenções complementares para promover o desenvolvimento rural e o aumento dos investimentos em energia distribuída, como energia solar na modalidade *off-grid*. Com essas estratégias, o Brasil e outros países que enfrentam problemas semelhantes podem aumentar o benefício socioeconômico da eletrificação rural. Embora sejam necessárias políticas complementares para alcançar esse objetivo, segundo Bezerra et al. (2017), os resultados mostram que o acesso à eletricidade é um requisito importante para melhorar a qualidade de vida.

Ratificado por Gómez e Silveira (2012), o Brasil possui mais de 14 milhões de pessoas beneficiadas pelo programa de eletrificação rural LPT, principalmente por meio da extensão da rede. No entanto, é necessário um novo modelo *off-grid* para que áreas remotas na região, principalmente a amazônica, se beneficiem totalmente do programa. Regras e regulamentos claros em conexão com soluções *off-grid* podem fornecer uma estrutura adaptada, na qual a eletricidade também é fornecida efetivamente a áreas isoladas. Mas, também, é importante lembrar que, a longo prazo, é importante garantir fontes de financiamento para conexões.

Portanto, a literatura salienta que o modelo subsidiado usado no Brasil terá que evoluir gradualmente para um modelo econômico mais auto-sustentável para o fornecimento de eletricidade. Os desafios a serem enfrentados na Amazônia, e que servem para as demais localidades semelhantes, oferecem uma oportunidade para pensar nos próximos passos das metas brasileiras de universalização e em novas maneiras de garantir a sustentabilidade financeira de longo prazo do programa LPT (AKTER et al., 2017).

No Brasil, onde o processo de geração de energia fotovoltaica ainda é discreto em relação às demais tecnologias que fornecem a energia elétrica, tais como eólica, bioenergia e hidrelétrica, o nível de investimento público é, também, observado demasiado pequeno, se compararmos com a geração de energia elétrica através de outras fontes, conforme Figura 4:

Figura 4: Investimento Público em Fontes de Geração de Energia Elétrica Renovável de 2012 à 2019, no Brasil.



Fonte: Adaptado de IRENA - International Renewable Energy Agency (2020).

Tratando-se de atendimento às localidades situadas em áreas rurais, um importante estudo realizado na Índia, segundo Castellanos et al. (2015), mostrou um crescimento econômico acelerado. Porém, como outros países em desenvolvimento, a maioria de sua população (70%) vive em áreas rurais remotas que não estão conectadas à rede elétrica nacional. Essas aldeias e comunidades têm um suprimento insuficiente de eletricidade ou não o têm. Desta forma, este

estudo afirmou que uma extensão da rede nacional indiana para eletrificar as comunidades rurais, não é viável. O estudo avaliou, ainda, o desenho e as opções, com identificação de um sistema híbrido renovável para fornecer eletricidade a um local rural em Bengala Ocidental, na Índia.

Tabosa et al. (2017) descrevem que um dos fatores do êxodo rural é a incapacidade de o agricultor obter renda suficiente na sua propriedade. O acesso à energia elétrica estimula a produção agropecuária na comunidade rural, além de possibilitar o contato do agricultor e de sua família com diversos tipos de capacitação e de tecnologia, proporcionando a integração social e o desenvolvimento econômico.

Dado a questão do fornecimento de energia elétrica em áreas rurais e remotas ser apresentada na literatura como dependente de grandes investimentos ou até mesmo sendo inviáveis, conforme exemplo citado segundo Castellanos et al. (2015), observa-se que existe um problema a ser tratado para o atendimento a estas localidades. Alternativas como geração desta energia através de fontes renováveis direcionam a esta possibilidade, onde a implementação para esse tipo de recurso deve ser avaliada e comparada às estruturas de extensão de rede e conexão ao sistema elétrico urbano, como exemplo dos investimentos do Programa LPT.

O abastecimento de energia elétrica em localidades rurais ainda prevalece, em sua grande maioria, através de obras com grandes extensões de rede, resultando em elevadíssimos custos de implementação para o atendimento a estas em conexão ao sistema elétrico de distribuição de energia elétrica.

A irradiação solar global é infimamente registrada em áreas remotas ao redor do mundo. A falta de acesso a uma rede de distribuição de energia elétrica nessas áreas apresenta uma enorme oportunidade de eletrificação por meio de fontes de energia renováveis e, especificamente, de energia fotovoltaica, onde grandes recursos solares estão disponíveis, conforme mencionaram Urraca et al. (2015).

Esta seção aborda as justificativas base para o presente estudo. Elas são divididas em três contextos distintos: justificativa acadêmica, justificativa prática e justificativa social.

1.3.1 Justificativa Acadêmica

Com o crescimento da procura pela geração de energia elétrica através do sol, o sistema fotovoltaico vem sendo solicitado e projetado de forma individual de fornecimento. Ou seja, as usinas geradoras são planejadas para atender uma unidade consumidora, exclusivamente. No Brasil, conforme descreve a ANEEL desde 17 de abril de 2012, quando entrou em vigor a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, o consumidor brasileiro pode gerar sua própria

energia elétrica a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada e inclusive fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade. Trata-se da micro e da minigeração distribuídas de energia elétrica, inovações que podem aliar economia financeira, consciência socioambiental e autossustentabilidade. Esta resolução, por sua vez, foi atualizada pela ANEEL, que publicou a Resolução Normativa nº 687/2015 revisando a Resolução Normativa nº 482/2012 (ANEEL, 2015), (ANEEL, 2012).

Outrossim, ainda em referência à a Resolução Normativa nº 687/2015 ANEEL (2015), outra inovação da norma diz respeito à possibilidade de instalação de geração distribuída em condomínios (empreendimentos de múltiplas unidades consumidoras). Nessa configuração, a energia gerada pode ser repartida entre os condôminos em porcentagens definidas pelos próprios consumidores. A ANEEL criou ainda a figura da “geração compartilhada”, possibilitando que diversos interessados se unam em um consórcio ou em uma cooperativa, instalem uma micro ou minigeração distribuída e utilizem a energia gerada para redução das faturas dos consorciados ou cooperados. No entanto, é descrita a regra

(...) §6º Para os casos de empreendimento com múltiplas unidades consumidoras e geração compartilhada, a solicitação de acesso deve ser acompanhada da cópia de instrumento jurídico que comprove o compromisso de solidariedade entre os integrantes.” (ANEEL, 2015).

Desta forma, análogo ao sistema *on-grid* de geração distribuída salientada na Resolução Normativa nº 687/2015, encontra-se academicamente, uma lacuna em termos de pesquisas e trabalhos realizados que direcionem o tratamento de geração da energia elétrica através do sistema fotovoltaico para mais de uma unidade consumidora (geração compartilhada) para localidades rurais e remotas, ou seja, de difícil acesso. Na tabela 3 são ilustradas as palavras chave para o assunto abordado no presente trabalho:

Tabela 3: Artigos de busca nas bases de dados da Capes.

Ordem	Crítérios de Pesquisa	Capes (N Artigos)
1º	"Geração Distribuída"	5.156
2º	"Geração Distribuída"E "Rural"	1.514
3º	"Geração Distribuída"E "Rural"E "Compartilhada"	262
4º	"Fotovoltaica"E "Rural"E "difícil acesso"	12
5º	"Fotovoltaica"E "Rural"E "difícil acesso"E "compartilhada"	2
6º	"Fotovoltaica"E "Geração Distribuída"E "difícil acesso"E "compartilhada"	2

Fonte: Elaborado pelo Autor.

No resultado da tabela 3 que descreveu 02 artigos na última linha desta, estes se referenciam a assuntos distintos do proposto na tese apresentada.

No trabalho de pesquisa realizado por Lago e Delabeneta (2018), que compreende o período de 2007 a 2017, as pesquisas exploraram principalmente a viabilidade técnica financeira e/ou econômica da aplicação de sistemas fotovoltaicos, bem como os mecanismos de incentivos, aspectos jurídicos e ambientais. Embora a maioria dos projetos apresentassem viabilidade técnica, no entanto, no aspecto financeiro e/ou econômico, muitos demonstraram ser inviáveis devido aos elevados custos dos equipamentos. Este ponto ratifica a importância apresentada no presente trabalho de uma análise em relação ao compartilhamento de geração de energia elétrica e, principalmente, reforça a questão do alto custo necessário de investimento para um sistema tipo *off-grid*, que será apresentado na seção 8.

Em localidades onde não existe energia elétrica, até foram criados ou mesmo estão em andamento, programas para expandir o sistema urbano e levar esta energia a estas, tais como o Programa LPT supracitado ou demais investimentos realizados pelas distribuidoras de energia. Porém, em determinadas situações, existe uma impossibilidade de chegar no local. Desta forma, o método de geração de energia pelo sistema fotovoltaico existe e é utilizado em nível mundial, mas, essencialmente, para atendimento único e sem previsão de expansão do sistema (MOREIRA; VALE; OLIVEIRA, 2020).

Portanto, dado a constante atualização de resoluções brasileiras pela ANEEL, criada no ano 2012 em ANEEL (2012) e atualizada no ano de 2015 em ANEEL (2015), a presente tese não somente preencherá estas lacunas de pesquisas e planejamento da geração desta energia compartilhada através de fonte renovável solar nestas localidades distantes dos grandes centros urbanos, em *off-grid*, mas também trará um estudo considerando a expansão do sistema elétrico existente nestas áreas rurais e remotas, ainda em *off-grid*, porém com a possibilidade de adição de usuários neste mesmo sistema gerador.

1.3.2 Justificativa Econômica

Incentivos governamentais, tais como o Programa LPT realizado no Brasil, conforme Fuso Nerini et al. (2014), ratificam uma relação custo *versus* benefício inviável às distribuidoras de energia elétrica para o fornecimento em áreas não urbanas. Além disto, equipamentos reguladores de tensão para o fornecimento desta energia com qualidade, são necessários dependendo da extensão da rede; estes possuem robustez em função dos níveis de tensão e corrente elétrica em que são submetidos, que fazem com que os custos destes também sejam muito expressivos (ANEEL, 2016).

Quando se analisa uma viabilidade econômico-financeira de um sistema fotovoltaico, retrata-se que

(...) Apesar do desenvolvimento tecnológico promover maior eficiência energética dos equipamentos e dispositivos, a demanda por energia aumenta com o crescimento da população e pela busca por mais conforto e bem-estar do ser humano. O crescimento sustentável passa por fontes de energias renováveis e de baixo custo. A posição geográfica do Brasil evidencia um alto potencial para energia solar fotovoltaica favorecendo a geração distribuída, porém, os investimentos iniciais são considerados limitantes para que haja uma maior participação na matriz elétrica brasileira (DE ANDRADE; BRANDALISE, 2020).

Como uma justificativa econômica para a presente pesquisa, observa-se uma necessidade de aprimorar o sistema de fornecimento de energia elétrica ou até mesmo de possibilitar isto às localidades distantes dos grandes centros urbanos, ou seja, em áreas rurais e remotas. Atualmente, são necessários incentivos governamentais para esta possibilidade, devido aos custos expressivos para as conexões às redes de distribuição de energia elétrica; existem estudos que corroboram este fim com a geração desta energia através de fontes renováveis, tais como citam ABRADÉE (2015), ANEEL (2020), Ferreira, Fardin e Rueda-Medina (2018), Yan et al. (2017), porém a presente tese objetiva uma contribuição para uma distribuição de energia elétrica combinada de acordo com a demanda de cada fornecedor em determinada área, com a aplicação do Design Construtal e complementando com a projeção futura de novas conexões com as fontes geradoras existentes nestas localidades, aplicando a metodologia de RNAs.

Em relação a geração de energia elétrica, a eletrificação crescente é uma tendência verificável no período decenal de 2016 a 2026, citado por EPE (2016). Desta forma, espera-se que o consumo total de eletricidade cresça cerca de 50% a mais que a economia brasileira, fato refletido no indicador de elasticidade-renda de 1,51. Este indicador é afetado diretamente pelo incremento acelerado da autoprodução clássica, que cresce à taxa média anual de 4,5%, contra 3,6% do consumo na rede, o que proporciona um aumento de 3,7% ao ano do consumo total. Assim, segundo o Anuário Estatístico de Energia Elétrica, descrito por EPE (2020), os dez maiores consumidores do setor comercial totalizam 75% do consumo de energia. Dentre os participantes, os maiores destaques em 2019 foram o segmento de Alimentação, que engloba a agricultura, com aumento de 21,2% do consumo de energia e as Atividades de Serviços Financeiros com queda de 1,6%.

Desta forma, este trabalho tem como justificativa propor um modelo para reduzir o custo ou, em determinadas situações, possibilitar o fornecimento de energia elétrica em localidades

rurais e remotas, implementado com sistema de energia solar e desconexo ao sistema elétrico urbano, no caso *off-grid*, aplicando a Lei Construtal. Assim, calcular quando a configuração individual (até quantos indivíduos e em que condições) é mais econômica do que as configurações em rede (radial ou dendrítica), analisado através de RNAs.

1.3.3 Justificativa Social

De acordo com o Ministério de Minas e Energia (MME), MME (2013), para se chegar a algumas localidades na região amazônica do Brasil, pode-se levar até 14 dias, partindo da capital Manaus. Assim, a chegada da eletricidade poderá diminuir a vulnerabilidade social e econômica destas áreas, fortalecendo o bem-estar e a dignidade para a vida dessas pessoas, bem como o exercício da cidadania.

Por causa das condições geográficas e ambientais de famílias que moram distantes das redes elétricas, existe um impedimento, em termos de condições técnicas ou econômicas, para estender as redes até essas localidades. Assim, o MME possui programas para utilizar os mais recentes avanços da geração de energia elétrica, inclusive fonte solar, instalando sistemas individuais ou coletivos pelas distribuidoras locais, que serão responsáveis pela operação e manutenção desses sistemas, garantindo assim a geração contínua de energia para os novos consumidores.

A área rural, sem energia, não tem como aprimorar as matérias primas cultivadas, por falta de equipamentos que beneficiem os produtos, por exemplo, conforme retrata Shayani, Oliveira e Camargo (2006). Logo, os trabalhadores vão buscar novas oportunidades nas cidades, onde a oferta de trabalho, entretanto, não é abundante, aumentando assim a quantidade de favelas. Segundo o estudo de demanda de energia elétrica salientado por EPE (2016), aponta que como o setor agropecuário será o principal vetor de crescimento econômico do País até 2026, as outras classes, são as que mais crescem ao longo do decênio, impulsionadas pelo consumo rural.

Portanto, em comunidades rurais, além da energia elétrica facilitar o acesso aos programas públicos de âmbito social, educacional e sanitário e de permitir, nas atividades agrícolas, o uso de máquinas em substituição ao esforço físico humano, o Brasil possui uma projeção necessária de crescimento no setor agropecuário. Por isso, a eletrificação das áreas rurais, principalmente as isoladas, é fundamental para se alcançar o desenvolvimento sustentável (ARAÚJO, 2014).

1.4 Delimitações

Para que o presente trabalho seja viabilizado, são aplicadas as delimitações as quais descrevem o parecer dos objetivos elencados. Desta forma, este limita-se ao estudo de distribuição de energia elétrica através de geração renovável do tipo fotovoltaica, em localidades rurais e remotas, situadas no Brasil.

Para esta possibilidade supracitada, pesquisas de âmbito teórico do estado da arte sobre a geração de energia elétrica através de fontes renováveis, e mais especificadamente a do tipo solar, serão utilizadas como base para o desenvolvimento de uma estrutura de rede que permita o fornecimento desta energia, aos usuários que residem em localidades rurais e até mesmo remotas, brasileiras. Limita-se, também, pela geração desta energia elétrica de acordo com as normativas brasileiras de fornecimento de energia elétrica, tais como fatores de qualidade desta energia.

Neste sentido, adicionalmente ao estudo sobre fontes renováveis de geração de energia elétrica, pesquisas sobre a legislação no Brasil, conceitos básicos sobre eletricidade, consumo médio e por demanda desta energia para cada fornecimento, topologia e tipologia de redes de distribuição e programas governamentais de incentivo ao fornecimento de energia elétrica nestas localidades, serão necessárias para o trabalho de comparação ao sistema que será proposto.

Portanto, é proposto a análise de geração de energia elétrica compartilhada através de fonte renovável fotovoltaica, aplicando a Lei Construtal e RNA.

1.5 Estrutura do Trabalho

A tese está organizada em cinco capítulos. O primeiro, de caráter introdutório, trata a contextualização do tema e aborda aspectos relacionados a geração de energia renovável, através do sistema fotovoltaico, para aplicação em áreas remotas e rurais. Neste capítulo introdutório, também são apresentadas as justificativas e os objetivos do estudo, seguidos da relevância e delimitação da presente pesquisa.

O segundo capítulo expõe conceitos, discorrendo sobre o método de geração de energia elétrica através do sistema fotovoltaico, descrevendo a demanda e critérios técnicos necessários para o fornecimento desta energia, tais como a queda de tensão e limites conforme regulamentação brasileira. Outro fator apresentado, refere-se ao processo de conexão desta estrutura, chamada de *off-grid*, com as redes de distribuição de energia elétrica rural dos demais usuários.

No terceiro capítulo, são explicados os procedimentos metodológicos utilizados na pesquisa, a fim de caracterizá-la e de esclarecer as etapas realizadas. Para tanto, é realizado o delineamento da pesquisa, do método de trabalho, do procedimento de coleta de dados e dos procedimentos de análise de dados. São também apresentadas as perspectivas de continuação do trabalho, além do cronograma descrevendo as etapas realizadas e futuras para conclusão da tese.

No capítulo quatro, são efetuadas as análises de dados a partir dos estudos problematizados na revisão sistemática da literatura, classificando-os de forma que possam ser realizadas comparações divergentes de sistema de geração desta energia. As etapas de construção do método para a aplicação do sistema fotovoltaico bem como as avaliações teóricas dos métodos aplicados nas localidades rurais e remota, seja individual ou coletivo, são descritos neste capítulo.

Por fim, no quinto capítulo, são apresentadas as conclusões e considerações finais do estudo, seguidas de sugestões para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Teoria Construtal

De acordo com Bejan e Lorente (2010), a Teoria Construtal é a visão de que a geração de imagens de *design* (padrão, ritmo) na natureza é um fenômeno da física fundamentado por um princípio (a Lei Construtal): "Para um sistema finito onde há escoamento persistir no tempo (viver), sua configuração deve evoluir livremente de tal maneira que facilite o acesso às suas correntes". Esta lei é sobre a necessidade de *design* ocorrer e sobre a direção temporal do fenômeno: a fita do 'filme' de evolução do *design* é executada de tal forma que as configurações existentes são substituídas por configurações de fluxo globalmente mais fáceis. A lei Construtal tem dois lados úteis: a predição de fenômenos naturais e a engenharia estratégica de novas arquiteturas, baseadas na lei Construtal, ou seja, não imitando a natureza.

A palavra *design* em seu significado segundo significado parece simples, descrito por Bejan (2015). A configuração, transformação ou montagem de materiais com um propósito específico, tomando algo hoje e intencionalmente mudando-o para que ele seja outra coisa amanhã. Por um lado, este é um dos conceitos mais óbvios e incontestado conhecidos pela humanidade. O mundo moderno é construído pelo processo simples de transformar matérias-primas, tais como metais e minerais, plantas e animais, em coisas úteis.

Bejan (2015) cita ainda que o *design* pode ser a base do mundo construído, mas é anátema quando a conversação se transforma na natureza. Suas seis letras tornaram-se a palavra de quatro letras de biologia e física. Se afirmar que rios, árvores, ou flocos de neve refletem o projeto, a pergunta surge naturalmente: desenhado por quem, para quê?

A Lei Construtal, segundo Reis (2006) considera o evolução do *design* e usa configurações de fluxo de energia (por exemplo, o fluxo de tensões através da estrutura) para explicar e prever a seta do tempo da mudança e do projeto evolutivo na natureza. Ainda, destaca que a Lei Construtal afirma que, se um sistema tem liberdade para se transformar, ele desenvolve no tempo a arquitetura de fluxo que fornece acesso mais fácil às correntes que fluem através dele.

Conforme pesquisas observadas na plataforma *Scopus*, a Tabela 4 mostra os critérios de pesquisa utilizados, aplicando palavras-chave, na busca de referências do assunto em todos os campos dos artigos:

Desta forma, como demonstrado nas pesquisas supracitadas na Tabela 4, a aplicação do objetivo principal da presente Tese, conforme Seção 1.2.2 de elaborar um estudo sobre o modelo mais eficaz de distribuição de energia elétrica à área remota, individual por fornecimento e/ou coletivo (utilizando a Lei Construtal), não apresentou trabalhos relacionados diretamente

Tabela 4: Artigos de busca nas bases de dados Scopus.

Ordem	Crítérios de Pesquisa	SCOPUS (N Artigos)
1º	"constructal law"	1.218
2º	"constructal law"AND "electricity distribution"	0
3º	"constructal law"AND "renewable energy"AND "rural"	3
4º	"constructal law"AND "photovoltaic"	54
5º	"constructal law"AND "photovoltaic"AND "off-grid"	0
6º	"constructal law"AND "electricity"	65
7º	"constructal law"AND "electricity"AND "rural"	1

Fonte: Elaborado pelo Autor.

assemelhados ao tema em questão.

Portanto, na análise dos poucos artigos relacionados às palavras supracitadas na Tabela 4, observa-se uma referência sobre energias térmicas entre outros. Sendo assim, nenhum descreve a referência da proposta do presente trabalho.

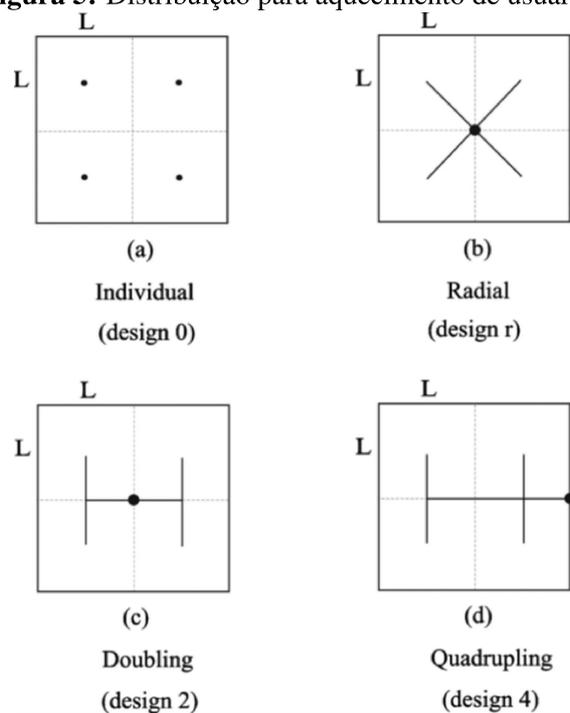
No entanto, um trabalho apresentado por Rocha, Lorente e Bejan (2010), com o conceito de “sistemas de energia distribuída” com a produção e distribuição de água quente em uma área, possui uma correlação interessante para a construção do presente tema da pesquisa. Neste artigo, os autores demonstram que a produção e o uso de aquecimento em uma área devem ser distribuídos em grupos organizados, de modo que as perdas associadas aos centros de produção sejam equilibradas pelas perdas associadas às linhas de distribuição, onde os *designs* utilizados são demonstrados na Figura 5.

Na Figura 5, são apresentados quatro projetos para distribuir o aquecimento para usuários igualmente espaçados em um território:

- a) um aquecedor para cada usuário;
- b) um aquecedor para um *cluster* de usuários conectados por dutos de tubos radiais;
- c) um aquecedor central para um *cluster* de usuários conectado através de uma rede dendrítica dicotômica;
- d) um aquecedor por grupo de usuários conectados através de uma rede dendrítica gerada com base em uma regra de quadruplicar.

As diferentes composições dos *designs* trouxeram diferentes resultados do estudo de Rocha, Lorente e Bejan (2010), comparando com a eficiência do sistema de distribuição de água. Desta forma, como resultado, o artigo de Rocha, Lorente e Bejan (2010) conclui descrevendo

Figura 5: Distribuição para aquecimento de usuários.



Fonte: Rocha, Lorente e Bejan (2010).

os *designs* para cada quantitativo de fornecimentos, cujas comparações dos *designs* "r", "2" e "4" com o *design* "0", da Figura 5, e descobriram três transições: os projetos com estrutura de fluxo têm um desempenho melhor que o *design* individual, quando o número de usuários é maior.

Sendo assim, analogamente, o *Design Construtal* pode ser aplicado para o objetivo de distribuição do fornecimento de energia elétrica em localidades remotas, através da energia renovável fotovoltaica e em *off-grid*. Os diferentes *designs* serão utilizados, visando o crescimento no quantitativo de fornecimentos ao longo do tempo, sem perda na confiabilidade eficiente do sistema.

2.2 Sistema Brasileiro de Distribuição de Energia Elétrica

2.2.1 Demanda de energia elétrica

2.2.1.1 Conceito

Demanda de energia elétrica significa a demanda de potência elétrica medida em quilowatt (kW), a qual se faz necessária para o atendimento de cargas da unidade dentro de um determinado período de tempo. Ou seja, é possível descrever que demanda de energia elétrica representa a quantidade de potência em kW que um determinado equipamento necessita da rede elétrica para funcionar (CRUZ; ANICETO, 2019).

A demanda de energia elétrica é representada pela média das potências elétricas ativas ou reativas, solicitadas ao sistema elétrico pela parcela da carga instalada em operação na unidade consumidora, durante um intervalo de tempo especificado, expressa em quilowatts (kW) e quilovolt-ampère reativo (kVAr), respectivamente (CEEE, 2017).

A potência elétrica média solicitada por um equipamento, barramento, subestação, agentes da operação, subsistema ou sistema elétrico, durante um determinado intervalo de tempo Yukizaki et al. (2020). Portanto, a demanda é o resultado da soma da potência elétrica dos equipamentos pelo fator de demanda, como expresso na equação 2.1,

$$Pd = \sum_{n=1}^{\infty} (P_{inst} \times FD) \quad (2.1)$$

onde:

- Pd = Potência demandada de energia elétrica, dada em kW;
- n = Número de equipamentos;
- P_{inst} = Potência instalada, dada em kW;
- FD = Fator de demanda.

O FD é fornecido pelas distribuidoras de energia elétrica que atende a localidade a qual a unidade consumidora está ou será instalada. No entanto, aplica-se um cálculo de demanda máxima (D_{max}), que é a maior média da demanda que ocorre em um determinado tempo e verificada em um determinado período. Esta D_{max} é representada pela equação 2.2:

$$D_{max} = FD \times P_{inst} \Rightarrow FD = \frac{D_{max}}{P_{inst}} \quad (2.2)$$

Sendo assim, o fator de demanda é a relação entre a demanda máxima e a potência instalada na unidade consumidora (CEEE, 2017), (CEMIG, 2014).

Portanto, a demanda é a potência dada em Volt Ampère (VA) ou Quilovolt Ampère (kVA) absorvida em um determinado instante da instalação. Sendo assim, observado por Cruz e Aniceto (2019), a demanda é uma potência que varia ao longo do dia, dependendo das cargas em funcionamento simultâneo. A demanda tem um perfil diferente em função do local onde se situa a unidade consumidora, da estação do ano (condições climáticas), número de moradores, entre outros fatores.

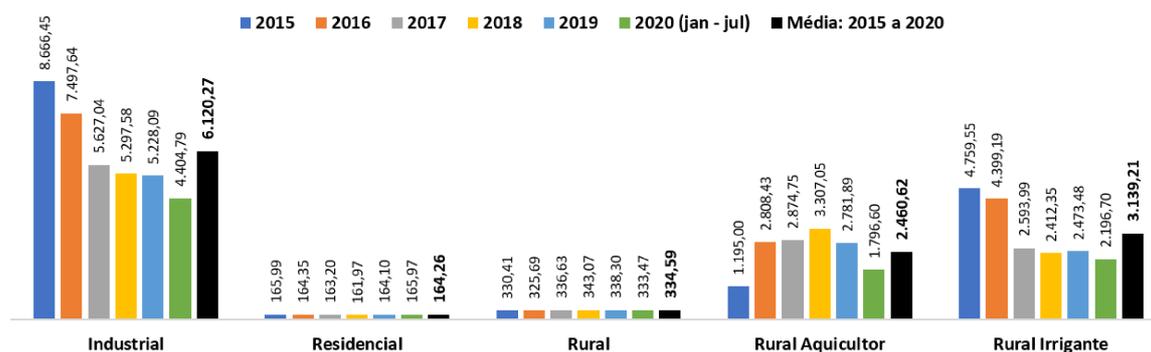
Em relação ao *FP*, nas residências e estabelecimentos comerciais de pequeno porte a carga reativa é baixa, assim como o seu próprio período de utilização; para efeito de definição de modalidade de fornecimento, aplica-se o $FP = 1$ (CRUZ; ANICETO, 2019). Porém, observa que, conforme os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), para unidade consumidora ou conexão entre distribuidoras com tensão inferior a 230 Quilovolt (kV), o fator de potência no ponto de conexão deve estar compreendido entre 0,92 e 1,00 indutivo ou entre 1,00 e 0,92 capacitivo, de acordo com regulamentação vigente (ANEEL, 2016).

Conforme relatórios da ANEEL do ano de 2020, o consumo médio de energia elétrica por unidade consumidora da classe residencial rural no Brasil, vem se mantendo estável quando comparamos de 2015 até julho de 2020. No entanto, para as classes descritas como "Rural Aquicultor" e "Rural Irrigante", observa-se uma redução deste consumo, comparando o mesmo período supracitado. Estes dados são ilustrados na Figura 6:

Como definição pela EPE, as classes de consumo, dado em Quilowatt-hora (kWh) apresentadas na Figura 6, têm classificação dos consumidores de energia elétrica conforme sua característica principal, de acordo com a Resolução Normativa ANEEL nº 414 de 9 de setembro de 2010 e suas atualizações. São classes de consumo: Residencial, Industrial, Comercial, Rural, Poder Público, Iluminação Pública, Serviço Público e Outros Consumos. As classes são subdivididas em subclasses de consumo conforme a finalidade principal das unidades de consumo (YUKIZAKI et al., 2020), (ANEEL, 2021).

Quando se trata de dimensionamento de transformadores de potência na rede de energia elétrica, as distribuidoras também definem padrões de demanda, aplicando fatores específicos.

No exemplo da Norma Técnica de Distribuição da CEEE (2017), descrita como NTD-

Figura 6: Consumo Médio de Energia Elétrica no Brasil / Classe [kWh / Unidade Consumidora]

Fonte: Adaptado de ANEEL (2020).

00.001, a demanda do circuito secundário deve ser o maior valor entre a soma das demandas diurnas e a soma das demandas noturnas, convenientemente diversificadas em função do número total de consumidores de força do circuito.

(...) na determinação da demanda noturna deve ser considerada a demanda dos consumidores de luz residenciais, a demanda da iluminação pública e a demanda dos consumidores de luz não residenciais, de força e especiais, que funcionam no período noturno (18h - 6h). Na determinação de demanda diurna devem ser consideradas 20% da demanda noturna dos consumidores de luz residenciais e a demanda dos consumidores de luz não residenciais, de força e especiais, que funcionam no período diurno (6h - 18h) (...) (CEEE, 2017)

Na Tabela 5, observa-se a variação do dimensionamento do equipamento transformador, de acordo com a quantidade de consumidores:

Em relação a distribuidora Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL), considerada uma das maiores empresas do setor elétrico brasileiro segundo a EPE (2018b), referente à norma técnica "GED - 120: Distribuição Projetos de Redes Aéreas de Distribuição Rural",

(...) a demanda usada para o dimensionamento do transformador de isolamento é a demanda final do ramal atendido pelo transformador. O carregamento do transformador de isolamento no final da vida útil do ramal deve ser menor que 187%, onde carregamento é a relação entre a demanda calculada e a potência nominal do transformador (...) (?).

Desta forma, no caso da CPFL, o dimensionamento do transformador é tratado de forma

Tabela 5: Percentagem de redução da demanda individual correspondente ao número de consumidores de força no mesmo circuito secundário.

Número de Consumidores	Redução Demanda	Número de Consumidores	Redução Demanda
1,00	1,00	11,00	0,72
2,00	0,92	12,00	0,72
3,00	0,86	13,00	0,72
4,00	0,82	14,00	0,71
5,00	0,79	15,00	0,71
6,00	0,77	16,00	0,71
7,00	0,75	17,00	0,71
8,00	0,74	18,00	0,71
9,00	0,73	19,00	0,71
10,00	0,72	20 ou mais	0,70

Fonte: (CCEE, 2009)

interna, onde os projetos em redes de distribuição de energia elétrica pública são internalizados.

Outrossim, na CEMIG, conforme norma técnica "ND - 3.1 - Projetos de Redes de Distribuição Aéreas Urbanas", é descrito que

(...) das novas unidades consumidoras, a informação necessária para determinar a demanda desses consumidores é a classificação das unidades consumidoras conforme ND-5.1, ND-5.2 (Tipo A, Tipo B e Tipo C), a quantidade de novos consumidores e tipo de consumidor (residencial, comercial, industrial e outros). O usuário deve preencher os campos da planilha com as informações solicitadas (CEMIG, 2014).

2.2.1.2 Demanda por Energia Elétrica

Conforme descreve Schmidt e Lima (2004), a demanda residencial por energia elétrica pode ser descrita como um resultado de um problema de maximização de utilidade, sujeita a uma restrição orçamentária. Com relação as demandas comercial e industrial, estas podem ser melhor descritas como um problema de minimização de custo, sujeito a um certo nível de produção.

Assim, Schmidt e Lima (2004) deduzem uma equação linear de demanda por energia elétrica, descrita por

$$\text{Log}C_t = \text{Log}k + \alpha\text{Log}P_t + \beta\text{Log}Y_t + \delta\text{Log}L_t + \Phi\text{Log}S_t \quad (2.3)$$

onde:

- C_t : consumo (residencial, comercial ou industrial) de energia elétrica no tempo t ;
- P_t : tarifa (residencial, comercial ou industrial) de energia elétrica no tempo t ;
- Y_t : renda (rendimento do trabalhador, no caso residencial, e PIB nos casos comercial e industrial) no tempo t ;
- L_t : preço dos aparelhos eletrodomésticos (residencial) ou eletrointensivos (ligados ao comércio ou à indústria) no tempo t ;
- S_t : preço de um bem substituto à energia elétrica no tempo t (o único segmento que tem um possível bem substituto à energia elétrica e o industrial);
- $\xi_p = \alpha$ é a elasticidade-preço, $\xi_r = \beta$ é a elasticidade-renda e $\xi_l = \delta$ é a elasticidade-preço do estoque dos aparelhos eletrodomésticos e/ou eletrointensivos, $\xi_l = \phi$ é a elasticidade-preço do bem substituto e k é uma constante.

2.2.2 Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica

Um dos fatores de grande relevância para o atendimento às unidades consumidoras rurais, é a distância as quais estas se encontram dos centros urbanos. Este fator, por sua vez, pode representar perdas técnicas significativas em relação ao nível de tensão primária e até mesmo secundária, apropriado para utilização de equipamentos eletro-eletrônicos. Desta forma, a variação de tensão ou também chamada de queda de tensão, precisa ser avaliada para o atendimento adequado de Qualidade de Energia Elétrica (QEE) (VOGEL; CROVATO, 2018).

Quando trata-se de qualidade de energia elétrica, os procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica, abordando a qualidade do produto e a qualidade do serviço prestado pelas distribuidoras de energia elétrica (PRODIST), segundo o ANEEL (2016), devem ser seguidos para garantir além do fator qualidade, definir a terminologia, caracterização dos fenômenos, parâmetros e valores de referência relativos à conformidade de tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda de tensão.

2.2.2.1 Queda de Tensão

Em relação aos níveis regulados de tensão, Norma Brasileira (NBR) da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) número 5410 ((Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004)), a queda de tensão verificada não deve ser superior aos seguintes valores, dados em relação ao valor da tensão nominal da instalação; sendo assim, com referência ao presente trabalho, observam-se os seguintes critérios para a queda de tensão:

- 5%, calculados a partir do ponto de entrega, nos demais casos de ponto de entrega com fornecimento em tensão secundária de distribuição;
- 7%, calculados a partir dos terminais de saída do gerador, no caso de grupo gerador próprio.

As distribuidoras de energia elétrica padronizam suas respectivas normas técnicas, baseadas na legislação vigente, definida pela ANEEL. Desta forma, estas fornecem aplicativos para que possa ser dimensionada a queda de tensão, com origem no transformador de distribuição e que situam-se acima de 20 e/ou 30 metros de distância deste (de acordo com a norma técnica da distribuidora). O cálculo, como exemplo de um sistema trifásico para a distribuidoras CEMIG (2014), Companhia Paulista de Força e Luz - CPFL (2016) e CEEE (2017), é representado pelo seguinte,

$$D_V = \frac{\sqrt{3} \times I \times \ell \times Z}{V_n} \times 100 \quad (2.4)$$

onde:

- D_V = queda de tensão, dada em %;
- I = corrente da carga, dada em A;
- ℓ = comprimento do circuito, dado em km;
- Z = impedância do condutor, dada em Ω ;
- V_n = tensão de linha do circuito, dado em V.

Os valores para a impedância Z dos condutores podem ser calculados por tabelas pré-definidas das distribuidoras, que ilustram as resistências e reatâncias destes. O equacionamento é obtido através de

$$Z = R \cos \varphi + jX \sin \varphi \quad (2.5)$$

onde:

- R = resistência do condutor, dada em Ω (tabelado);
- X = reatância do condutor, dada em Ω (tabelado).

Descrito pela Companhia Paulista de Força e Luz - CPFL (2016) em sua Norma Técnica nº 3667, no caso de extensão de rede ou de reforma, deve ser feito o cálculo de queda de tensão para o circuito ou para a extremidade da rede secundária de maior queda. Desta forma,

Para consumidores residenciais, utilizar os coeficientes de queda de tensão com fator de potência unitário; para consumidores comerciais e industriais utilizar os coeficientes de queda de tensão para o fator de potência, de 0,92 (Companhia Paulista de Força e Luz - CPFL, 2018).

Desta forma, é demonstrado na tabela 6 a seguir com as informações dos coeficientes de queda de tensão unitária para rede secundária 380/220 V, tabelado pela Companhia Paulista de Força e Luz - CPFL (2018).

Tabela 6: Coeficientes de Queda de Tensão Unitária para condutores de alumínio isolado multiplexados.

Configuração do Condutor	SISTEMA 380/220 V	
	FP = 0,92	FP = 1,00
3P120(A70)	0,0213	0,0204
3P70(A70)	0,0388	0,0393
3P50(A50)	0,0504	0,0515

Fonte: Adaptado de Companhia Paulista de Força e Luz - CPFL (2018).

onde:

- 3P120(A70) = condutor de alumínio do tipo multiplexado, com os condutores fase de diâmetro de 120 mm^2 e o condutor neutro de 70 mm^2 ;
- 3P70(A70) = condutor de alumínio do tipo multiplexado, com os condutores fase e neutro de diâmetro de 70 mm^2 ;

- 3P50(A50) = condutor de alumínio do tipo multiplexado, com os condutores fase e neutro de diâmetro de 50 mm^2 .

Os valores supracitados na tabela 6 foram calculados com base nesta normativa da Companhia Paulista de Força e Luz - CPFL (2018) com as especificidades de cada tipo de condutor, considerando as equações 2.4 e 2.5, supracitadas nesta seção.

Portanto, considerando este fenômeno da queda de tensão, a distância entre o ponto de conexão do interessado no fornecimento de energia elétrica com a fonte de fornecimento desta energia, bem como a demanda dimensionada deste ponto de conexão, são cruciais para as definições comparativas do presente trabalho.

2.3 Geração Renovável Solar de Energia Elétrica

A energia solar pode ser utilizada para diversos fins, como em processos de aquecimento residencial e industrial, dessalinização e para a geração de energia elétrica. Nesse último, cuja a necessidade é da conversão direta de energia solar para elétrica, ocorre com a utilização de módulos fotovoltaicos que possuem diversas especificações e parâmetros, determinando a sua eficiência e forma de instalação, com o objetivo de maximizar a conversão de energia. Por ser uma forma de geração de energia elétrica limpa e sustentável, o seu uso está se expandindo a cada dia, em especial nos pequenos geradores independentes (LOPES, 2020).

O Brasil e o Chile são os países da América do Sul com o maior crescimento de instalações de sistemas e centrais fotovoltaicas e são caracterizados por climas com elevadas variações de temperatura no ano. No Brasil, a partir de 2016, ocorreu um crescimento exponencial da potência instalada. Até outubro de 2017 haviam sido instalados 129 MW em sistemas de geração distribuída e 311 MW em centrais fotovoltaicas (ARAUJO et al., 2018).

Descrito por Lopes (2020) com base nas informações da ANEEL, o Brasil possui 3.870 centrais de geração fotovoltaicas, que totalizam uma potência de aproximadamente 2.500 MW, correspondendo a cerca de 1,5% da capacidade de geração do país, exceto sistemas de geração privados instalados nos consumidores. Assim, o número total de centrais fotovoltaicas no país é muito maior.

Segundo Iioka et al. (2018), a capacidade da estação fotovoltaica de grande escala, cuja capacidade é superior a 1 MW e dos sistemas fotovoltaicos de telhado que estão instalados em área residencial, está crescendo continuamente. Por outro lado, a flutuação da saída do sistema fotovoltaico pode resultar na necessidade de método de controle avançado para regulação de tensão na rede de distribuição de energia elétrica.

No que tange ao processo de geração deste tipo de energia renovável, Fenyu et al. (2018)

descrevem que, devido à aleatoriedade e intermitência de energia solar, usinas fotovoltaicas não podem expressar a capacidade real com a produção nominal. No planejamento do sistema de energia, se faz necessário avaliar a contribuição da rede fotovoltaica conectada para a confiabilidade de todo o sistema, por isso é preciso estudar a capacidade confiável de geração deste tipo de energia.

Em complemento à este tipo de análise, observando o meio industrial, principalmente, Freitas et al. (2020) salientam que, para avaliar as incertezas do processo de geração de energia solar, um valor em risco ao investidor condicional (CVaR) é usado. Simulações com a opção de investimento estão relacionadas nesta complementação energética. O risco de fonte intermitente envolve a empresa usando a avaliação CVaR. Portanto, um modelo tendendo a soluções mais conservadoras quando a aversão ao risco é maior, confirmando na literatura a existência de um *trade-off* entre aversão ao risco e retorno esperado.

De acordo com Viswanath et al. (2021), a crescente demanda por energia e a necessidade de fontes de energia limpa criaram um grande impacto no setor de energia renovável. Uma dessas fontes de energia renovável, a energia solar, está ganhando impulso em várias aplicações, como sistemas de energia elétrica, aquecedores de água e muito mais. A estimativa da energia solar é importante porque ajuda os engenheiros da rede a tomar decisões como o controle de tensão e frequência, que é parte integrante do funcionamento da rede.

2.3.1 Normativa Brasileira de Geração Distribuída: ANEEL

Desde 2012, após a REN nº 482 da ANEEL (2012), uma pessoa física pode injetar eletricidade na rede brasileira, se a energia é produzida por fontes renováveis, o que motivou a indústria a desenvolver tecnologia nessa área. Desta forma, existem este processo de injeção e também de compensação de custos. Este ponto preliminar é salientado pelo Capítulo I, Art.2º da REN nº 482:

(...) III - sistema de compensação de energia elétrica: sistema no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa (ANEEL, 2012).

No entanto, conforme o texto da REN nº 482 da ANEEL (2012) descrito, um sistema que seja *on-grid* possui restrições para fornecer energia à múltiplas unidades consumidoras. Este ponto é descrito no Capítulo II, Art. 4º da REN nº 482:

(...) §3º - É vedada a divisão de central geradora em unidades de menor porte para se enquadrar nos limites de potência para microgeração ou minigeração distribuída, devendo a distribuidora identificar esses casos, solicitar a readequação da instalação e, caso não atendido, negar a adesão ao Sistema de Compensação de Energia Elétrica(ANEEL, 2012).

Sendo assim, através da REN nº 482, a ANEEL estabeleceu as condições gerais para o acesso de microgeração (até 1 MW) e minigeração (até 100 kW) aos sistemas de distribuição de energia elétrica, assim como o sistema de compensação da tarifação da energia elétrica gerada. Consequentemente o aumento, desde então, de pedidos para conexão de sistemas fotovoltaicos à rede elétrica de baixa e média tensão tem sido realizados (MELO, 2014).

Em 2015, a ANEEL atualizou a normativa em relação à geração distribuída de determinados artigos da REN nº 482 da ANEEL (2012), com a REN nº 687 da ANEEL (2015), no que tange à geração compartilhada:

Art. 1º Alterar o art. 2º da Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, que passa a vigorar com a seguinte redação: (...) VII – geração compartilhada: caracterizada pela reunião de consumidores, dentro da mesma área de concessão ou permissão, por meio de consórcio ou cooperativa, composta por pessoa física ou jurídica, que possua unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída em local diferente das unidades consumidoras nas quais a energia excedente será compensada (...) (ANEEL, 2015).

2.3.2 Sistema Fotovoltaico: Módulos ou Painéis Solares

Quando a luz ou a radiação eletromagnética do Sol incide sobre uma célula composta de materiais semicondutores com propriedades específicas, acontece o efeito que descreve-se como fotovoltaico, permitindo a conversão direta da luz em eletricidade. É a partir desse efeito que as células fotovoltaicas funcionam. Estas, por sua vez, são compostas por duas camadas de materiais semicondutores tipo N e P, depositados sobre uma base metálica e com uma grade de coletores metálicos em sua superfície. Desta forma, quando a luz solar atinge a célula, os elétrons e lacunas dos materiais semicondutores saltam a barreira de potencial criada na junção e geram corrente elétrica. Esses elétrons em movimento são coletados pelos eletrodos metálicos (LOPES, 2020).

Dentre as células solares, existem as mais comuns que são utilizadas, segundo Lopes (2020) e ANEEL (2019), que utilizam diferentes tecnologias de fabricação:

- Silício monocristalino: desenvolvido a partir de blocos de silício ultrapuros, aquecidos

a altas temperaturas e submetidos a um processo de cristalização. Os lingotes formados nesse processo geram finas placas de silício puro (*wafers*), que recebem impurezas em ambas as partes, criando as camadas de material P e N que são a base da célula fotovoltaica. Então, a célula semiacabada recebe uma película metálica em uma das faces, uma grade metálica na outra e um material antirreflexivo na face que irá receber luz.

- Silício policristalino: nesse tipo de célula, os lingotes que geram os *wafers* são formados por um aglomerado de pequenos cristais, com tamanhos e orientações diferentes. O processo de dopagem e acabamento é semelhante ao que ocorre no silício monocristalino.
- Filmes finos: fabricados a partir da deposição de finas camadas de materiais (silício e outros) sobre uma base. Podem ser encontrados células com filmes finos de silício amorfo, silício microcristalino, telureto de cádmio e CIGS (cobre-índio-gálio-selênio).

As células de silício monocristalino são as mais eficientes disponíveis comercialmente em larga escala, com um rendimento que chega a até 19%. Porém, seu custo é mais alto que as de silício policristalino, que podem chegar a um rendimento de até 17%. Um painel, placa ou módulo solar fotovoltaico é composto por um arranjo de diversas células solares e outros elementos. Podem ser encontrados, comercialmente, painéis com potências a partir de 1 W, utilizados em sistemas embarcados, a até cerca de 400 W (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Segundo Lopes (2020), o ponto de operação de um painel fotovoltaico depende da carga elétrica que está conectada a ele. Desta forma, uma relação elétrica entre corrente-tensão e potência-tensão em um painel fotovoltaico, deve ser analisado na projeção de um sistema.

Além da carga, a eficiência de um painel fotovoltaico depende de dois fatores fundamentais, a radiação solar e a temperatura, e ambos impactam na corrente gerada pelo painel. A radiação solar ideal para a operação de um módulo deve ser de ao menos 1000 W/m^2 , fazendo com que ele consiga fornecer a corrente elétrica máxima especificada em sua folha de dados. Na condição ideal de radiação solar, a corrente nominal do módulo acontece na temperatura de 25° C . Temperaturas superiores a essa também causam uma redução na corrente gerada (LOPES, 2020).

Segundo Machado e Miranda (2015), o país mais desenvolvido na área de células solares é a Alemanha, que instituiu programas de incentivo à utilização dessa tecnologia. Apesar de possuir altos níveis de radiação solar e ter uma das maiores reservas de quartzo do mundo, o Brasil apenas deu seus primeiros passos.

2.3.3 Modelagem de um Sistema de Painéis Fotovoltaicos

Para a projeção de um sistema utilizando a fonte renovável solar fotovoltaica, é necessário modelar, aplicando alguns equacionamentos descritos a seguir, conforme cita Ferreira, Fardin e Rueda-Medina (2018).

A potência gerada pelos painéis fotovoltaicos é calculada usando a equação,

$$P_{pv} = G\eta_{pv}S \quad (2.6)$$

onde:

- G = radiação solar, dada em kW/m²;
- η_{pv} = rendimento da célula fotovoltaica;
- S = área da superfície dos painéis, dada em m².

O rendimento da célula fotovoltaica é função da temperatura da própria célula fotovoltaica, e pode ser calculado pelas equações

$$\eta_{pv} = n_r [1 - b_{pv} (T_c - T_{ref})] \quad (2.7)$$

com:

$$T_c = T_a + \frac{G(NOCT - 20)}{0,8} \quad (2.8)$$

onde:

- n_r = rendimento da célula operando na temperatura de referência;
- b_{pv} = coeficiente de temperatura;
- T_c = temperatura da célula fotovoltaica;
- T_{ref} = temperatura de referência;
- T_a = temperatura ambiente;
- $NOCT$ = temperatura normal de operação da célula fotovoltaica.

A geração de energia elétrica, salientado por Bajay et al. (2018), Lopes (2020), Villalva e Gazoli (2012) e Machado e Miranda (2015), descreve que os painéis solares geram energia elétrica através de corrente contínua (CC). No entanto, para que seja possível o consumo final em equipamentos/eletrodomésticos, se faz necessária a conversão desta para corrente alternada (CA), na frequência de 60 Hz (sistema brasileiro).

2.3.4 Inversor CC/CA

Dentro de um sistema fotovoltaico, salientado por Villalva e Gazoli (2012) e Lopez (2012), o inversor tem a função de converter e adequar os níveis de tensão e de corrente contínua (CC) em tensão e corrente alternada (CA). Ele é necessário pois a grande maioria dos equipamentos que conhecemos é construída para trabalhar em tensão alternada (127 V ou 220 V) a 60 Hz. Desta forma, em análise a um inversor para um sistema *off-grid*, além do tipo de onda de saída, devem ser consideradas diversas especificações e características, como a potência nominal e máxima, tensão de saída CA, frequência de saída, regulação de tensão, eficiência, distorção harmônica e proteções contra curto-circuito e reversão de polaridade.

Portanto, o inversor CC/CA possui as seguintes características:

- Realizam a conversão de corrente contínua para corrente alternada;
- Podem possuir diferentes formatos da onda de saída;
- Modelos diferentes, conforme a forma de operação:
 1. *on-grid*: fonte de corrente elétrica;
 2. *off-grid*: fonte tensão elétrica;
- Principais especificações:
 1. Potências e tensões de entrada e saída;
 2. Proteções, eficiência e distorção harmônica;
 3. Numero de *strings* de entrada (*on-grid*).

Desta forma, salientado por Villalva e Gazoli (2012), os inversores para a operação *on-grid* são diferentes daqueles utilizados no sistema *off-grid*, sendo que no primeiro caso ele opera como uma fonte de corrente e no segundo como uma fonte de tensão. O inversor *on-grid* funciona apenas quando está conectado à rede elétrica, assim, caso ela não esteja disponível, garante a segurança de equipamentos que estão ligados na instalação elétrica e outros usuários da rede.

2.3.5 Tipos de Sistemas de Geração de Energia Fotovoltaica

Apesar de existirem meios para transformar a energia térmica solar em energia elétrica, a utilização da energia fotovoltaica ainda é a forma mais direta para a conversão, além de ser a mais viável para pequenas unidades de geração. A produção de energia fotovoltaica pode ser facilmente integrada às edificações, o que viabiliza a aproximação entre geração e consumo de energia elétrica. (MOREIRA; VALE; OLIVEIRA, 2020).

Basicamente, existem dois tipos de sistemas de microgeração ou minigeração de energia elétrica solar, segundo Akinyele, Rayudu e Nair (2015): *on-grid* e *off-grid*.

2.3.5.1 Sistema *on-grid*

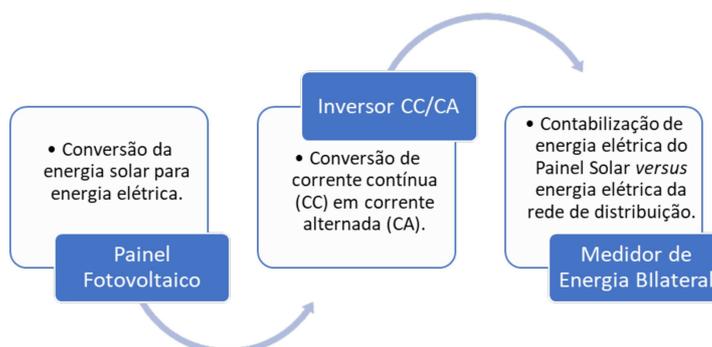
Um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica, ou sistema *on-grid*, opera em paralelo com a rede elétrica, com o objetivo de gerar energia para o consumo local, reduzindo ou eliminando o consumo de energia da rede, ou até gerando excedente de energia (LOPEZ, 2012).

O sistema *on-grid*, que consiste na conexão do fornecimento de energia elétrica com o sistema de distribuição urbano desta energia. Desta forma, a geração através do método fotovoltaico conectado à rede também é conhecido como *on-grid* ou *grid tie*. Esse sistema nada mais é do que um gerador de eletricidade que utiliza como fonte de energia a energia proveniente do sol. Os sistemas *on-grid* dispensam o uso de baterias, pois toda potência gerada pelo sistema fotovoltaico é consumida pelas cargas ou é injetada diretamente na rede elétrica (MACHADO; MIRANDA, 2015).

Desde a aprovação da Resolução Normativa (REN) nº 482 da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL (2012), os sistemas fotovoltaicos podem ser conectados à rede elétrica, dando maior viabilidade de utilização para o usuário final. Além disso, o preço dos módulos fotovoltaicos caíram substancialmente nos últimos anos. Desta forma, descrito por Machado e Miranda (2015), na Figura 7 é demonstrado o esquema simples de microgeração ou minigeração de funcionamento fotovoltaico.

Portanto, este sistema conexo à rede de distribuição de energia elétrica urbana é caracterizado pelas regras do órgão regulador, no caso do Brasil é a ANEEL, onde é necessário o enquadramento da microgeração ou minigeração de energia através de um sistema renovável, na legislação pertinente.

Figura 7: Sistema fotovoltaico conectado à rede de distribuição de energia elétrica.



Fonte: Adaptado de Machado e Miranda (2015).

2.3.5.2 Sistema *off-grid* (autônomos)

Também chamados de sistemas fotovoltaicos isolados, os sistemas autônomos são aqueles que não são ligados na rede elétrica, por isso, em inglês, recebem o nome de *off-grid*. Usualmente, tais sistemas são utilizados em locais que não são atendidos pela rede elétrica, principalmente em zonas rurais remotas ou comunidades isoladas (LOPES, 2020).

No sistema de energia solar *off-grid*, desconexo à rede da distribuidora de energia elétrica, portanto, 100% da eletricidade será gerada por seus painéis solares e armazenada em baterias solares para uso durante a noite e/ou quando não houver incidência de radiação solar. Os sistemas isolados ou também conhecidos como *off-grid*, não são muito utilizados em países em desenvolvimento, como por exemplo, no Brasil. Eles operam desconectados da rede de energia elétrica oriunda dos centros urbanos e são constituídos por equipamentos com a finalidade de gerar esta para suprir a demanda não atendida pela rede elétrica. Tais sistemas apresentam inversores, comutados de forma automática, que não necessitam de uma referência da rede elétrica para alimentar cargas isoladas (RÜTHER; ZILLES, 2011).

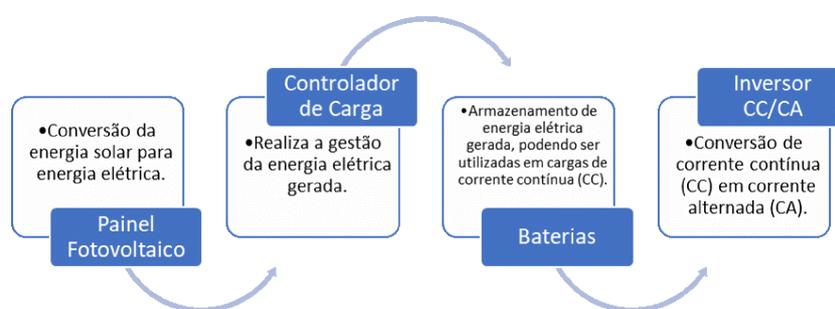
Um sistema *off-grid* de microgeração ou minigeração depende, unicamente, da radiação solar para gerar energia elétrica através dos painéis fotovoltaicos. Esse tipo de sistema, geralmente, possui um esquema de armazenamento de energia constituído por um banco de baterias e necessita, dependendo da aplicação, de controladores de carga e inversores de corrente elétrica contínua para alternada (CC/CA). Observa-se, no entanto, que estas baterias apresentam tempo de vida útil relativamente curto e ainda um elevado custo, dada a tecnologia atual (SOS-NINA; SHALUKHO, 2017).

Um sistema fotovoltaico autônomo tem por objetivo substituir ou compensar a falta da rede

elétrica em um local, o qual é composto por: painéis solares, banco de baterias, controlador de carga e inversor (VILLALVA; GAZOLI, 2012). Neste sistema, a energia é gerada em corrente contínua pelos painéis e armazenada nas baterias, que tem seu processo de carregamento regulado pelo controlador de carga. Para ser utilizada na alimentação dos equipamentos de uma residência, por exemplo, a energia passa pelo inversor, que converte a corrente contínua armazenada nas baterias e gerada pelos painéis em corrente alternada (LOPES, 2020).

Como ilustrado na Figura 8, os sistemas isolados funcionam de forma independente, chamado de *off-grid*, utilizados principalmente em regiões remotas, embarcações, entre outras:

Figura 8: Sistema fotovoltaico desconectado da rede de distribuição de energia elétrica.



Fonte: Adaptado de Machado e Miranda (2015).

2.3.5.3 Sistema de Armazenamento de Energia Elétrica: Baterias

Descrito por Tavora, Silva e Mendonça (2020), o atual crescimento da capacidade instalada de energias renováveis não-despacháveis, torna cada vez mais importante a aposta no armazenamento de energia. As baterias são uma das formas mais promissoras de armazenamento de eletricidade. Segundo o autor, um crescimento no número de patentes de baterias para o fim supracitado, vem evoluindo significativamente.

O sistema de armazenamento de energia elétrica através de baterias, funciona continuamente em ciclos de carga e descarga, de intensidade e duração variáveis em função da intermitência da geração desta energia e dos diversos tipos de consumo. Este, por sua vez, opera em situações de carga e descarga irregulares (COPETTI; MACAGNAN, 2007).

A bateria de armazenamento é fundamental nos sistemas autônomos de energia solar fo-

tovoltaica (FV), sendo o componente responsável por garantir o fornecimento constante de energia elétrica, mesmo nos períodos de baixa ou nenhuma geração, segundo descreve Coppetti e Macagnan (2007). No entanto, ainda é o componente que possui a necessidade de maior estudo, onde observa-se que experiências demonstram falhas de sistemas, tanto pelo dimensionamento quanto na sua utilização e controle.

Em um sistema autônomo, a geração de energia, que varia durante o dia devido à radiação solar, dificilmente coincide com o consumo. Assim, é necessário um elemento que seja capaz de armazenar a energia gerada, a fim de proporcionar o fornecimento de energia para o usuário, mesmo em momentos em que a geração seja mínima ou inexistente, como no período da noite ou em dias nublados e chuvosos. O elemento responsável por isso é a bateria (LOPES, 2020).

Conforme descreve Lopez (2012), existem diversos tipos de baterias que podem ser utilizadas em um sistema autônomo, sendo uma das mais conhecidas e utilizadas, a de chumbo ácido. Esta, por sua vez, que pode ser de ácido líquido ou em gel, podem ser seladas ou abertas. Essas baterias são constituídas de placas de chumbo mergulhadas em uma solução ácida e a energia é carregada e descarregada por meio de reações químicas do chumbo com o ácido.

As baterias com eletrólito em gel possuem maior vida útil e permitem um maior número de ciclos de carga e descarga quando comparadas com as de eletrólito líquido. Já a vantagem das seladas é que não necessitam de manutenção, ao passo que as abertas requerem a adição periódica de água. Normalmente, os modelos com eletrólito em gel são seladas e são chamadas de VRLA (do inglês, *valve regulated lead acid*) devido à presença de uma válvula de segurança que permite a liberação de gases no caso de sobrecarga (LOPES, 2020).

Um gerador *off-grid* é aquele utilizado sem o auxílio da rede de energia local. Desta forma, toda a energia produzida por placas solares será consumida ou armazenada em baterias solar para consumo durante a noite ou quando não houver um nível de radiação suficiente. Sendo assim, a quantidade de baterias para energia solar deve ser calculada com folga para evitar falta de energia.

Naturalmente, segundo descreve Ferreira, Fardin e Rueda-Medina (2018), quando a energia proveniente do sol não for suficiente para suprir a demanda, a bateria, se estiver carregada, fornecerá a energia necessária às cargas. Nas ações de gerenciamento, o estado de carga da bateria desempenha um papel fundamental. De fato, a operação bem-sucedida de uma microrrede é altamente dependente da operação e controle adequados dos dispositivos de armazenamento de energia durante contingências.

Contudo, a profundidade da descarga durante cada ciclo de uso da bateria, tem impacto em sua vida útil. Desta forma, aplica-se uma limitação, para fins de cálculo da bateria através do seguinte equacionamento:

$$SOC_{min} \leq SOC \leq SOC_{max} \quad (2.9)$$

onde:

- SOC_{min} = estado de carga mínimo permitido para a bateria;
- SOC_{max} = estado máximo de bateria determinado.

Desta mesma forma, também a taxa de descarga/carga da bateria apresenta uma limitação, expressa na seguinte equação:

$$P_{batmin} \leq P_{bat} \leq P_{batmax} \quad (2.10)$$

onde:

- P_{batmin} = taxa de descarga/carga mínima da bateria;
- P_{batmax} = taxa de descarga/carga máxima da bateria.

Os sistemas solares fotovoltaicos têm encontrado um mercado crescente, graças à redução de custos de fabricação e à melhoria da qualidade dos módulos fotovoltaicos, que hoje já alcançam um alto grau de desenvolvimento tecnológico (COPETTI; MACAGNAN, 2007).

Para um eficiente dimensionamento, onde o objetivo também deve ser a durabilidade do sistema, se faz necessário entender como funciona o acumulador e sua relação com os outros elementos. Selecionar adequadamente o tipo, o tamanho e as características do acumulador, assim como a estratégia de controle que deve ser aplicada ao mesmo.

Portanto, dada a complexidade que uma bateria ou banco de baterias necessita para o atendimento a um sistema de geração de energia elétrica fotovoltaica e considerando a progressiva redução no preço das células solares, estas baterias têm uma fração importante da inversão total requerida em uma instalação, que pode variar em 20% e 30% do custo do sistema.

2.3.5.4 Controlador de Carga

O controlador de carga é o dispositivo que faz o controle da carga do banco de baterias de um sistema *off-grid*, evitando que a bateria seja sobrecarregada ou excessivamente descarregada. Especificamente, as funções que o controlador de carga desempenha são: proteção de

sobrecarga; proteção de descarga excessiva e gerenciamento de carregamento (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Um controlador de carga possui uma importante função no sistema de geração de energia elétrica fotovoltaica, conforme descreve Lopes (2020) e Lopez (2012): gerenciar a energia elétrica consumida com a ser armazenada nas baterias, ou seja, fornecer a potência instalada utilizada pelos equipamentos e armazenar nas baterias, o excedente de energia gerada pelos painéis fotovoltaicos.

2.3.5.5 Dimensionamento de um Sistema Fotovoltaico *off-grid*

Para a elaboração de um projeto de um sistema isolado, devem ser observados alguns parâmetros básicos: a demanda de energia elétrica, o nível de irradiação solar do local da instalação e a capacidade do armazenamento de energia, mais caracterizado como um banco de baterias (AKINYELE; RAYUDU; NAIR, 2015).

Segundo Lopes (2020), o primeiro passo de um sistema *off-grid* é determinar o consumo energético que ele deverá suprir, considerando a potência dos equipamentos e por quanto tempo eles ficam ligados por dia. Sendo assim, devem ser especificadas as seguintes características:

1. Definição da tensão elétrica de alimentação dos equipamentos os quais serão conectados aos sistema;
2. Definição do tempo de sustentação das baterias para o sistema;
3. Definição do tipo de bateria que será utilizado no sistema;
4. Definição do controlador de carga a ser utilizado;
5. Definição da potência elétrica necessária dos painéis fotovoltaicos;
6. Definição do inversor CC/CA que será utilizado.

Os sistemas *off-grid* ainda não são muito populares no Brasil, pelo alto custo das baterias necessárias para realizar o armazenamento da energia gerada; porém vários países da Europa aprovam práticas de isenção fiscal para este tipo de sistema, visando fomentar o comércio e a disseminação da prática em seus países. Desta forma, o mundo vem observando os benefícios econômicos que a energia solar fotovoltaica pode oferecer (MACHIARELLI et al., 2016).

2.4 Redes Neurais Artificiais (RNAs)

O trabalho em RNAs ou também chamado de redes neurais, tem sido motivado pelo reconhecimento de que o cérebro humano processa as informações de uma forma distinta a um computador digital convencional. O cérebro é um computador complexo, não linear e paralelo. Uma rede neural é uma máquina implementada por simulação de programação computacional ou por componentes eletrônicos, que é projetada para modelar a maneira como nosso cérebro realiza uma tarefa particular ou função de interesse. Portanto,

(...) Uma rede neural é um processador maciçamente paralelamente distribuído constituído de uma unidade de processamento simples, que têm a propensão natural para armazenar conhecimento experimental e torná-lo disponível para o uso. Ela (a rede neural) se assemelha ao cérebro humano em dois aspectos: no primeiro, o conhecimento é adquirido pela rede a partir de seu ambiente através de um processo de aprendizagem e no segundo, a força de conexão entre seus neurônios, conhecidas como pesos sinápticos, são utilizados para armazenar o conhecimento adquirido (HAYKIN, 2017).

Desta forma, o método de aprendizagem da aplicação de uma RNA é fundamental para a projeção de crescimento de um sistema, no caso deste trabalho de distribuição de energia elétrica, observando uma projeção com o objetivo de tornar um sistema *off-grid* em área rural, capaz de adicionar um maior número de conexões em mesma fonte de geração desta energia, por métodos de sistema renovável solar.

Uma rede neural recorrente possui, ao menos, um laço de alimentação. Desta forma, a "adaptação computacional" ocorre baseada em um processo realizado por várias simulações computacionais, realimentando o sistema e "ensinando" a máquina a obter um comportamento de maior eficiência (HAYKIN, 2017).

Sendo assim, tendo uma adaptabilidade de uma RNA a capacidade de se adaptar seus pesos sinápticos às modificações do meio ambiente, esta rede pode ser projetada para demonstrar informações de confiança para uma tomada de decisão (BRAGA; CARVALHO; LUDERMIR, 2007).

Portanto, o processamento através de RNA descreve, de forma simples, que

(...) O processo de aprendizagem de uma RNA pode ocorrer de duas maneiras distintas: aprendizado supervisionado e aprendizado não supervisionado, tendo como principal diferença a presença ou não de um supervisor externo. Uma das principais vantagens da RNA é a capacidade de aprender e genera-

lizar, ou seja, produzir saídas adequadas para entradas inexistentes durante o processo de aprendizagem. Em termos práticos a aplicação de uma RNA não ocorre de maneira simples, uma vez que, inúmeros problemas podem ocorrer durante o processo de implementação. Assim, pesquisas constantes são necessárias a fim de se chegar a uma arquitetura computacional que possibilite ampliar as atividades de modelagem, simulação e controle (FLECK et al., 2016).

Na revisão da literatura referente às RNAs, foram utilizadas as bases de dados compreendidas na plataforma *Scopus*. Sendo assim, a presente proposta deste trabalho de tese visa o entendimento dos sistemas de energias renováveis, objetivando, principalmente, o estudo da viabilidade para a utilização de um sistema fotovoltaico para geração de energia elétrica.

Em análise ao retratado por Meerpohl et al. (2012), a pesquisa requer uma pergunta clara, uma definição estratégica de busca, um estabelecimento de critérios de inclusão e exclusão dos artigos e, acima de tudo, uma análise criteriosa da qualidade da literatura selecionada. O processo de desenvolvimento de determinado estudo de revisão inclui caracterizar cada estudo selecionado, avaliar a qualidade deles, identificar conceitos importantes, comparar as análises estatísticas apresentadas e concluir sobre o que a literatura informa em relação a determinada intervenção. Contudo, apontar problemas/questões que necessitam de novos estudos.

Neste contexto, Salim et al. (2019) revelam as futuras direções da pesquisa relacionadas a painéis fotovoltaicos e do sistema de armazenamento de energia da bateria (BESS), examinando as tendências metodológicas e geográficas entre os anos de 2000 e 2018. Este, por sua vez, descreve que os sistemas fotovoltaicos são reconhecidos como uma fonte de energia eficiente e ecológica. Operação típica de baixo impacto, porém isso não significando necessariamente que a energia solar esteja completamente livre de impactos ambientais e à saúde humana ao longo de seu ciclo de vida. Quando os painéis fotovoltaicos, inversores e o BESS chegarem ao fim de seus ciclos de vida individuais, eles formarão uma grande quantidade de lixo eletrônico.

Nos últimos anos, diferentes trabalhos relacionados às aplicações da Inteligência Artificial (IA) na tecnologia fotovoltaica foram realizados, comparando estudos com modelos estatísticos. Desta forma, concluíram que, dentre outras demais técnicas, que o método de Redes Neurais Artificiais (RNAs) se demonstra uma ferramenta eficaz para a previsão de recursos solares, utilizando parâmetros atmosféricos e operacionais medidos (MAY TZUC et al., 2018).

Conforme Urraca et al. (2015) enfatizam, uma ampla gama de técnicas de computação eletrônica foram desenvolvidas considerando variáveis como temperaturas e chuvas para estimativa de irradiação solar; no entanto, RNAs estão entre as técnicas mais utilizadas para este fim.

Segundo Bose (2017), a interconexão de neurônios artificiais ou também chamado de Redes Neurais Artificiais pode ser usada para resolver muitos problemas de engenharia, científicos e problemas da vida real. Essas redes geralmente podem ser classificadas em *feedforward* e *feedback* arquiteturas, dependendo das direções do sinal fluxo.

Portanto em análise ao tema do presente trabalho, buscando os métodos aplicados e contextualizando o de RNA, conforme uma revisão sistemática da literatura em seu estado da arte na plataforma *Scopus*, a inserção de palavras chave foi utilizada para a elaboração da pesquisa.

Na parametrização da busca literária, observou-se uma limitação nos seguintes critérios:

- palavras-chave encontradas no título, *abstract* ou *keywords*;
- inserção gradual de palavras-chave;
- limitação por artigos, publicados entre os anos de 2015 e 2019.

Esta objetiva limitar o quantitativo de referências, trazendo o parecer de vários autores quanto a aplicação de RNAs no sistema de geração de energias renováveis, especificadamente do tipo fotovoltaica. A Tabela 7 demonstra os resultados obtidos:

Tabela 7: Artigos encontrados nas bases de dados Scopus.

Ordem	Crítérios de Pesquisa	SCOPUS (N Artigos)
1º	"renewable energy"	32.111
2º	"renewable energy"AND "fotovoltaic"	4.738
3º	"renewable energy"AND "fotovoltaic"AND "artificial neural networks"	83
4º	"renewable energy"AND "fotovoltaic"AND "artificial neural networks" AND "generation"	42
5º	"renewable energy"AND "fotovoltaic"AND "artificial neural networks" AND "generation"AND "grid"	39
6º	"renewable energy"AND "fotovoltaic"AND "artificial neural networks" AND "generation"AND "grid"AND "modeling"	8

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Neste contexto, conforme pesquisa realizada, observou-se uma grande quantidade de artigos relacionados à geração de energias renováveis. No decorrer da inserção de demais palavras de limitação que compõem a pesquisa, uma redução expressiva no número de artigos encontrados resultou em 8 artigos que se assemelham a um dos objetivos do presente trabalho.

Segundo Anagnostos et al. (2017), o crescimento contínuo das instalações fotovoltaicas em nível global, traz a esperança para um futuro sustentável, mas também impõe desafios a todos os níveis de produção e distribuição de energia. Para a comparação de produção de energia

fotovoltaica, um modelo detalhado de produção de energia eletro-térmica baseado em física é validado juntamente com outros modelos de última geração e executa aumento na precisão de 25%. Além disso, a aplicação de um modelo de rede neural nos resultados da modelagem dinâmica, demonstrou-se um aumento na precisão de até seis vezes melhor do que qualquer solução paramétrica.

Nos últimos anos, houve um forte crescimento nas indústrias de geração de energia solar. A necessidade de sistemas de energia térmica solar altamente eficientes e otimizados, sistemas fotovoltaicos autônomos ou conectados à rede, aumentou substancialmente. No trabalho de Yaïci et al. (2017), que objetiva investigar o efeito do número de variáveis de entrada tanto na precisão quanto na confiabilidade do desempenho de energia solar ao longo do dia, a aplicação do método de RNAs para prever estes parâmetros de desempenho, são realizadas. Desta forma, os resultados deste estudo demonstram que a técnica de RNA é uma abordagem eficaz para prever o desempenho de sistemas de energia altamente não lineares.

A mudança global para a produção de energia renovável combinada com a esperada entrada de carros elétricos, o aumento do uso de energia dos centros de computação em nuvem e a transformação da própria rede elétrica em direção à *Smart Grid*, requer novas soluções em todos os níveis de produção e gerenciamento de energia (ANAGNOSTOS et al., 2019).

Outrossim, Liu, Meng e Liu (2016) apresentam uma comparação de métodos para analisar o desempenho máximo de um sistema fotovoltaico, através de técnicas utilizando redes neurais, dentre outras, e comparando com, por exemplo, exame de partículas. As estratégias de controle do consumo de energia elétrica em tempo real e o agendamento ideal para o dia seguinte, salientado por Gu et al. (2014), devem ser combinados para estabelecer um método robusto de gerenciamento de energia que forneça bom desempenho mesmo quando o valor da energia renovável prevista se desviar significativamente do valor real.

Portanto, baseado nos resultados apresentados por vários autores, conforme citado na presente Seção, a aplicabilidade de RNAs no estudo de modelagem de um sistema com maior precisão, se demonstrou promissora. Diante deste fator e convergindo a um dos objetivos descritos na Seção 1.2.2 deste trabalho, serão comparados através de RNAs, os *designs* para o fornecimento da energia elétrica através de fonte geradora compartilhada, no sistema *off-grid*.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Neste capítulo, são apresentados os passos metodológicos que suportam a presente tese. No que diz respeito às teorias utilizadas, a Teoria Construtal foi aplicada para a contextualização e evolução dos *designs* e a RNA foi aplicada para a realização de simulações e iterações do processo evolutivo de configuração destes *designs*.

3.1 Classificação da Pesquisa

A pesquisa científica é a aplicação prática de um conjunto de procedimentos objetivos, utilizados por um pesquisador (cientista), para o desenvolvimento de um experimento, a fim de produzir um novo conhecimento, além de integrá-lo àqueles pré-existentes (FONTELLES et al., 2008).

Para garantir que uma pesquisa seja reconhecida como sólida e potencialmente relevante, tanto pelo campo acadêmico quanto pela sociedade em geral, ela deve demonstrar que foi desenvolvida com rigor e que é passível de debate e verificação. É neste âmbito que um método de pesquisa robusto se torna imprescindível para o sucesso na condução de um estudo (LACERDA et al., 2013).

Toda pesquisa de certa magnitude tem que passar por uma fase preparatória de planejamento. A própria necessidade de sua realização deve ser obrigatoriamente posta em questão. Essa exigência de planejamento pode ser flexível de tal forma que a característica principal do planejamento da pesquisa, atendam as estratégias previstas e não bloqueiem a criatividade e a imaginação crítica do investigador (KÖCHE, 2011).

O planejamento de uma pesquisa depende tanto do problema a ser investigado, da sua natureza e situação espaço-temporal em que se encontra, quanto da natureza e nível de conhecimento do investigador. Isso significa que pode haver um número sem fim de tipos de pesquisa. Serão desconsideradas as diferentes classificações desses tipos para utilizar apenas uma: a que leva em conta o procedimento geral que é utilizado para investigar o problema (KÖCHE, 2011).

Desta forma, Köche (2011) descreve que se pode distinguir no mínimo três tipos de pesquisa: a bibliográfica, a experimental e a descritiva:

- a pesquisa bibliográfica é a que se desenvolve tentando explicar um problema. Sendo o objetivo de conhecer e analisar as principais contribuições teóricas existentes sobre um

determinado tema ou problema, tornando-se um instrumento indispensável para qualquer tipo de pesquisa;

- a pesquisa experimental descreve que o investigador deve analisar o problema, construir suas hipóteses e trabalhar na manipulação dos possíveis fatores, das variáveis que se referem ao fenômeno observado, avaliando as relações com as hipóteses;
- a pesquisa descritiva, não-experimental estuda as relações entre duas ou mais variáveis de um dado fenômeno, sem manipulá-las. Sendo assim, os resultados deste tipo de pesquisa devem permanecer restritos às condições experimentais.

Quando a respeito de uma das características da pesquisa, podendo até enquadrar-se como um dos primeiros passos de uma pesquisa, o pesquisador baseia-se em estudos já realizados por teóricos anteriores e pesquisas, a fim ter a certeza do método a ser trabalhado e se realmente está com o delineamento correto. Portanto, Samir Dalfovo, Adilson Lana e Silveira (2008) também resumem em três objetivos de métodos de pesquisa:

- descritiva: estando dentro de análises quantitativas e qualitativas, quando há um levantamento de dados e o porquê destes dados;
- exploratória: a investigação de algum objeto de estudo que possui poucas informações;
- explicativa: informar e explicar a ocorrência de algum fenômeno.

Correlacionado ao citado no trabalho de Freitas et al. (2019), a presente pesquisa se classifica como uma pesquisa quantitativa empírica normativa, pois objetiva desenvolver ações ou estratégias para melhorar a situação presente de um ambiente real. As pesquisas quantitativas apresentam quatro preocupações na sua abordagem: Mensurabilidade; Causalidade; Generalidade; e Replicabilidade. As variáveis precisam ser passíveis de mensuração com a finalidade de se testar hipóteses. Essas hipóteses buscam, de modo geral, criar relações de causalidade entre variáveis.

No que tange à classificação do tipo de pesquisa abordado, descreve-se que o presente trabalho está classificado como empírico quantitativo normativo, pois busca criar modelos para prescrever ou indicar a solução. Segundo Fontelles et al. (2008),

...pesquisa quantitativa é aquela que trabalha com variáveis expressas sob a forma de dados numéricos e emprega rígidos recursos e técnicas estatísticas para classificá-los e analisá-los, tais como a porcentagem, a média, o desvio

padrão, o coeficiente de correlação e as regressões, entre outros. Em razão de sua maior precisão e confiabilidade, os estudos quantitativos são mais indicados para o planejamento de ações coletivas, pois seus resultados são passíveis de generalização, principalmente quando as amostras pesquisadas representam, com fidelidade, a população de onde foram retiradas (FONTELLES et al., 2008).

Desta forma, para o presente trabalho, observa-se que a pesquisa é caracterizada por um processo descritivo e exploratório e, segundo Samir Dalfovo, Adilson Lana e Silveira (2008) e Köche (2011), caracterizada como aplicada: é a práxis para resolver determinado problema ou, em outras palavras, possui a natureza de propor novos conhecimentos para a aplicação prática. Quanto a abordagem, esta pesquisa é classificada como quantitativa, considerando que os dados podem ser quantificáveis, demonstrados através de números. Desta forma, este tipo de análise possui ausência de questões subjetivas, transcrevendo opiniões e informações em dados numéricos. Caracteriza-se, portanto, em um problema de otimização linear.

3.1.1 *Design Science Research*

Segundo a correlação com a área de atuação da Engenharia de Produção designada pela ABEPRO (2008), o presente trabalho é conduzido sob a área supracitada, classificando-o na área de pesquisa operacional, com o método de *Design Science Research* (DSR). Descrito por Lacerda et al. (2013), a característica de pesquisa classificada como "Típico Produto de Pesquisa" utiliza modelo causal e/ou lei quantitativa em programas de pesquisa orientados para a descrição e teste fundamentado para regra tecnológica testada, para programas de pesquisa orientados para a prescrição. Neste contexto, a metodologia do presente trabalho possui observação, tanto quantitativa quanto estatística, cujo o DSR é salientado parcialmente pelo desenvolvimento, medindo os impactos do sistema como um todo. Importante salientar que a parcialidade do método DSR é descrita pelo fato deste trabalho não apresentar um artefato.

O *Design Science Research* é um método que fundamenta e operacionaliza pesquisas, o qual tem o objetivo a proposição de artefatos ou uma prescrição, orientado à resolução de problemas. Em outros termos, uma vez que o problema é compreendido, ocorre a construção e avaliação de artefatos fazendo com que estes alterem a realidade observada, resultado na solução dos problemas observados ou melhorando o desempenho do sistema (LACERDA et al., 2013).

Desta forma, a DSR é uma metateoria que investiga a geração de conhecimento no processo de concepção de artefatos e sobre como métodos de *design* podem constituir pesquisa

de caráter científico. Esta envolve construir, investigar, validar e avaliar artefatos, tais como construtos, arcabouços, modelos, métodos e instâncias de sistema de informações, a fim de resolver novos problemas práticos. Além disso, o estudo de métodos, comportamentos e melhores práticas relacionadas com a análise do problema e com o processo de desenvolvimento de artefato são abrangidos (BAX, 2013).

Se compreende a DSR como fonte de validade um conjunto de procedimentos para garantir que os resultados gerados pelo artefato provêm do ambiente interno projetado e o ambiente externo em que foi preparado para operar.

Para a construção de um método de pesquisa, no caso o DSR apresentado como o tipo utilizado no presente trabalho, é necessário, conforme descreve Lacerda et al. (2013):

- explicitar o ambiente interno, o ambiente externo e os objetivos clara e precisamente;
- explicitar como o artefato pode ser testado;
- descrever os mecanismos que gerarão os resultados a serem controlados/acompanhados.

3.2 Metodologia do Trabalho

Para que os objetivos específicos sejam atingidos, a presente metodologia foi dividida em cinco etapas buscando a sumarização da metodologia de pesquisa. Na primeira etapa, de levantamento bibliográfico, foi conduzida uma revisão sistemática da literatura acerca dos temas descritos. A segunda etapa busca descrever a modelagem do problema de pesquisa, elencando as variáveis abordadas para as simulações computacionais. A terceira etapa indica descreve o fluxo da Lei Construtal para aplicação ao problema de pesquisa. A quarta etapa, descreve a forma de elaboração da simulação computacional e a quinta etapa, descreve a metodologia de análise dos resultados.

3.2.1 Primeira Etapa: Levantamento Bibliográfico

Nesta etapa do trabalho, foram efetuados levantamentos bibliográficos, através de palavras-chave definidas para o tema de pesquisa em bases de dados como *Scopus* e *CAPES*, cujo objetivo foi de trazer a questão do método inédito aplicado na presente tese.

Portanto, a pesquisa foi segregada da seguinte forma:

1. Literatura nacional: artigos acadêmicos, teses e dissertações do Brasil, cujo o tema se relaciona com geração distribuída e energia solar;

2. Literatura internacional: artigos acadêmicos sobre a aplicação de Teoria Construtal e RNAs no método de análise, filtrando por pesquisas relacionadas à geração de energia elétrica através de sistemas renováveis;
3. Normativas: normas e regulamentos relacionados à geração de energia elétrica através de sistema solar, no Brasil.

3.2.2 Segunda Etapa: Modelagem do Problema de Pesquisa

Através dos fatores observados no levantamento bibliográfico, foi possível identificar algumas semelhanças na proposta a ser aplicada no presente trabalho, porém para assuntos distintos.

No trabalho apresentado por Rocha, Lorente e Bejan (2010), foram definidos *designs* que resultaram em uma simulação eficiente de um sistema de aquecimento de água, distribuído para N usuários. O método se mostrou capaz de aplicação em um sistema de geração de energia elétrica, desde que fosse tratado com as características de distribuição de energia elétrica: geração e armazenamento, queda de tensão, demanda entre outros demais fatores.

3.2.2.1 Variáveis da Modelagem

Com a análise das pesquisas bibliográficas, as variáveis foram definidas para a composição dos cálculos apresentados neste trabalho de tese:

1. distância média entre unidades consumidoras de classe rural: empiricamente para fins de cálculos, 100, 150 e 200 metros ¹;
2. tipo de classe rural: residencial;
3. consumo médio mensal de energia elétrica por unidade consumidora da classe residencial rural no Brasil: 334,59 kWh (ANEEL, 2020), cuja definição será de 11,15 kWh diários (média de 30 dias / mês);
4. demanda de energia elétrica por consumidor: 5 kVA;
5. limites máximo de definição para queda de tensão: 5%, conforme Vogel e Crovato (2018) e Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004);

¹Não é encontrado na literatura, um padrão de distância entre as residências em localidades rurais. Desta forma, os valores utilizados foram parametrizados para o objetivo matemático de análise.

6. cálculo de demanda para a quantidade de consumidores: conforme Tabela 5;
7. tipo de condutores de distribuição de energia elétrica em baixa tensão: conforme normativas da Companhia Paulista de Força e Luz - CPFL (2016);
8. topologia de rede de distribuição de baixa tensão: convencional ², segundo descreve Haykin (2017), conforme Normativas Técnicas das concessionárias de energia elétrica Companhia Paulista de Força e Luz - CPFL (2016) e Companhia Estadual de Energia Elétrica - CEEE-D (2013), CEMIG (2013).
9. sistema de geração de energia fotovoltaica: *off-grid*, com a utilização de baterias para armazenamento de energia elétrica;
10. *designs*: individual, radial ³, dendrítico dicotômico e dendrítica quadruplicada.

Conforme normativa técnica nº 3668 da Companhia Paulista de Força e Luz - CPFL (2018), é possível a aplicação de função matemática denominada como *kVAS* que permite converter, para o processamento dos cálculos elétricos da rede de distribuição, a demanda (*kVA*) a partir dos consumos de faturamento (*kWh*) dos clientes ligados na baixa tensão. Esta função é dada conforme equação 3.1:

$$kVAS = A \times kWh^B \quad (3.1)$$

onde:

- *kVAS* = demanda estatística dos consumidores de um circuito, obtida a partir dos consumos;
- *kWh* = energia consumida pelos consumidores, em baixa tensão, do circuito;
- *A* e *B* = constantes para os municípios na área de concessão da CPFL Paulista, sendo os valores de 0,037 e 0,803, respectivamente.

²Existem quatro tipos de redes de distribuição de energia elétrica. Dentre elas, a Rede de Distribuição Aérea Convencional que é o tipo de rede elétrica mais encontrado no Brasil, na qual os condutores são nus (sem isolamento) (ABRADEE, 2017).

³Segundo Fuhrmann e Abaide (2016), existem três tipos de sistemas radiais: simples, com recurso e seletivo. No presente trabalho, refere-se ao simples que é empregado em áreas rurais e de carga rarefeita, onde os requisitos de continuidade de serviço por parte dos consumidores não justificam arranjos de maior complexidade.

Desta forma, para o valor da variável descrita no item 4 das Variáveis de Modelagem 3.2.2.1, foi realizada a aplicação do cálculo de kVAS da equação 3.1, considerando o consumo médio mensal de energia elétrica por unidade consumidora da classe residencial rural no Brasil descrito no item 3 (334,59 kWh), resultando no valor de 3,94 kVA e com a variabilidade para os valores dos coeficientes A e B para diferentes regiões ⁴, foi arbitrado 5 kVA para fins de cálculos.

3.2.3 Terceira Etapa: Fluxograma da Lei Construtal

Com a utilização de um sistema desconexo à rede de energia elétrica urbana, o *off-grid*, foi aplicado o dimensionamento para projetar o fornecimento desta energia ao atendimento doméstico, individualmente. Desta forma, a projeção visa o abastecimento através da média de consumo deste tipo de classe, em área rural, descrevendo as questões técnicas (potência, capacidade de geração, perdas técnicas). Posteriormente, limitando ao valor máximo queda de tensão admissível descrito pela ANEEL, foi projetado a expansão do sistema para atendimento coletivo com o objetivo de apresentar um modelo capaz de trazer eficiência técnica para N clientes.

Segundo o estudo realizado por Rocha, Lorente e Bejan (2010) e que pode ser análogo a energia elétrica, o desempenho de um sistema de geração própria está associado ao *design* e ao quantitativo de usuários conectados à este sistema. Ou seja, a geração de energia elétrica para o fornecimento individual precisa ser comparada a um fornecimento coletivo, utilizando diferentes *designs* para uma resultante de melhor eficiência. Desta forma, os passos da Figura 9 a seguir, descrevem o fluxo para a análise Construtal.

Em referência à Figura 9, o primeiro passo para método de trabalho é a definição dos *designs*, os quais são aplicados como base a projeção de utilização de demanda de energia elétrica. Desta forma, é analisado um posto de geração desta energia para atendimento à um interessado e, posteriormente, aos demais interessados em diferentes configurações. No passo seguinte, observa-se que o que escoa é a energia elétrica.

Como identificação do desempenho do sistema, no terceiro passo, tem a significância de reduzir ao máximo o número de postos geradores de energia através do sistema fotovoltaico, para o maior número de interessados conectados à este.

No quarto passo foi realizada a modelagem matemática para os *designs* definidos, abrangendo os fatores de demanda e os requisitos de queda de tensão, regulados. Ou seja, uma modelagem matemática da demanda de energia elétrica, queda de tensão e quantidade de inte-

⁴Tabela segregada por regiões, conforme Companhia Paulista de Força e Luz - CPFL (2018).

ressados conectados ao sistema, calculados pelas equações 2.1, 2.2 e pela tabela 5 de demanda, bem como os valores resultantes pelo cálculo de queda de tensão, conforme equações 2.4 e 2.5. Desta forma, são analisadas as variações do número de conexões ao sistema para pontos determinados de área, ocupados pelos interessados no fornecimento de energia elétrica.

No quinto passo, é preciso descrever as constantes ou restrições do sistema, que se referem à área de ocupação dos interessados conectados.

No sexto passo, uma análise paramétrica foi realizada nas diversas configurações, de acordo com o número de usuários conectados, bem como a distância de localização destas, a um único ou vários sistemas de geração de energia solar. Desta forma, uma correção poderá ser realizada para indicar a melhor configuração, dependendo do número de usuários e parâmetros utilizados.

Como último passo, o sétimo, trouxe uma análise de configuração capaz de equalizar o melhor desempenho do sistema com o número de interessados que poderão se conectar ao mesmo ponto de geração desta energia.

No entanto, para a aplicação das técnicas supracitadas, se faz necessária a apresentação do sistema de geração de energia elétrica através da fonte renovável solar, bem como demonstrar a regulação para este sistema desconexo à rede da concessionária; estes fatores, por sua vez, possibilitaram uma comparação em nível de investimento necessário do sistema *on-grid* com o *off-grid*.

3.2.3.1 Aplicação da Lei Construtal

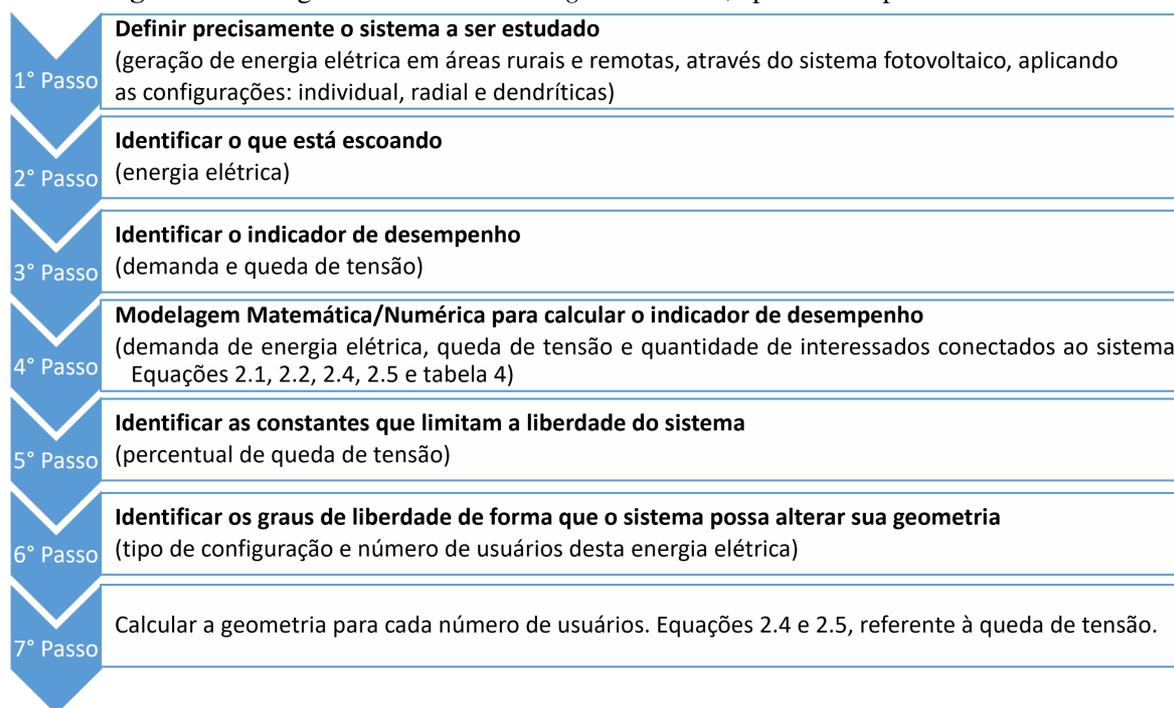
A aplicação do modelo Construtal com os *designs* e com as variáveis definidas neste capítulo 3, ocorreu com a utilização de arquivo do software da Microsoft, o Excel.

Inicialmente, se construiu um arquivo capaz de informar o resultado do equacionamento de queda de tensão, dado pela equação 2.4, entre o ponto gerador e ponto consumidor desta energia elétrica. Nesta aplicação, foram utilizados e projetados todos *designs* salientados neste capítulo 3.

A segunda forma foi a aplicação dos resultados de queda de tensão nos *designs*, no conceito de demanda de energia elétrica. Ou seja, alterações na potência de geração de energia elétrica sendo alterada de acordo com N consumidores, conforme salientado na Tabela 5.

Por fim, com os equacionamentos de queda de tensão e demanda necessária para aplicação ao sistema de geração de energia elétrica fotovoltaica, bem como da utilização das variáveis supracitadas nesta seção, se parametrizou a configuração para o sistema de fonte geradora de energia elétrica compartilhada.

Figura 9: Fluxograma do Método *Design Construtal*, aplicado no presente trabalho.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.2.4 Quarta Etapa: Aplicação de RNA

A aplicação da RNA complementou o presente estudo com o objetivo de projeção da conexão de estrutura de rede de distribuição de energia elétrica para N usuários. Assim, demonstrou-se um comparativo de iterações com seleção randômica das variáveis definidas neste capítulo, resultado na análise do sistema *off-grid*, de fonte de energia solar.

As redes neurais artificiais ou somente RNA, descritas por Haykin (2017), têm raízes em disciplinas como neurociência, matemática, estatística, física, ciência da computação e engenharia. Suas aplicações podem ser encontradas em campos tão diversos quanto modelagem, análise de séries temporais, reconhecimento de padrões, processamento de sinais e controle.

Para o desenvolvimento do presente trabalho, a aplicação das RNAs terá o fundamento de análise do crescimento do sistema de distribuição de energia elétrica urbano para a conexão futura, ao sistema *off-grid* com a geração desta energia através do sistema fotovoltaico. Desta forma, será utilizada a ferramenta Microsoft Excel, sendo este um software de código em linguagem *Visual Basic for Application* (VBA).

A grande vantagem da programação em VBA no Office, segundo a Microsoft (2021), é que quase todas as operações que podem ser executadas com um mouse, teclado ou uma caixa

de diálogo também podem ser realizadas usando o VBA. Além disso, se a operação pode ser realizada uma vez com o VBA, ela pode ser feita com a mesma facilidade centenas de vezes. Na verdade, a automatização de tarefas repetitivas é um dos usos mais comuns do VBA no Office. Outrossim, há outras duas vantagens significativas:

- A primeira é que ele é um software incluído no pacote do Office da Microsoft, amplamente utilizado no mundo;
- A segunda é que ele é altamente extensível, ou seja, pode ser utilizado para realizar qualquer atividade computacional, desde que compatível com suas capacidades. Isto é feito através da criação de funções próprias e dos pacotes, conjuntos de códigos/comandos relacionados a determinados temas.

Além da capacidade de criar *scripts* com o VBA para acelerar as tarefas diárias, use o VBA para adicionar novas funcionalidades a aplicativos do Office ou solicitar e interagir com as pessoas que usam seus documentos de formas específicas para atender às suas necessidades de negócios. Por exemplo, você poderia gravar um código VBA que exibisse um mensagem *popup* lembrando os usuários de salvar um documento em uma determinada unidade de rede na primeira vez que eles tentassem salvá-lo.

Estes algoritmos de aprendizagem são caracterizados pela utilização de saídas (*outputs*, resultados ou ainda variáveis dependentes), as quais são comparadas com o valor predito pela rede neural, adaptando dinamicamente os valores dos parâmetros de modo que o "erro" seja minimizado.

Os parâmetros de uma rede neural, segundo Haykin (2017) no aprendizado supervisionado, são os seus pesos. Todos os pesos são geralmente iniciados com valores aleatórios provenientes de uma distribuição normal padrão. Durante um processo iterativo de formação da rede, as seguintes etapas são repetidas:

- A rede neural calcula uma saída de $o(\mathbf{x})$ para as entradas dadas \mathbf{x} e para os parâmetros correntes (pesos atuais). Se o processo de formação ainda não estiver concluído, os resultados previstos serão diferentes da saída y observada.
- Uma função de erro, como a Soma dos Quadrados dos Erros (SSE - Sum of Squared Errors), na equação 3.2:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{l=1}^L \sum_{h=1}^H (o_{lh} - y_{lh})^2 \quad (3.2)$$

No presente trabalho, a contextualização de RNA não foi aplicada em sua integralidade: foram realizadas 2.000 iterações 34.447 subiterações, com a limitação das variáveis salientadas neste capítulo.

Portanto, foi aplicada a IA para, randomicamente, selecionar estas variáveis para compor cada uma das iterações, contendo um *loop* de subiterações, resultando em uma situação final:

- Primeira subiteração
 1. seleção do *design*;
 2. seleção da quantidade de usuários deste *design*;
 3. seleção do tipo de condutor de energia elétrica;
 4. seleção da distância entre os usuários e a fonte de energia compartilhada do *design*
- Próximas subiterações
 1. item 1 ao 4 supracitados na primeira subiteração;
 2. seleção do ponto de conexão do *design* da primeira subiteração;

Sendo assim, à cada subiteração ocorre a seleção da próxima conexão ao sistema em continuidade aos N fatores, principalmente, de queda de tensão. Este cálculo baseia-se no resultado da seleção do ponto de conexão definido aleatoriamente. O *loop* é finalizado quando o valor de queda de tensão for igual ou superior ao definido de 5%.

3.2.5 Quinta Etapa: Análise dos Resultados

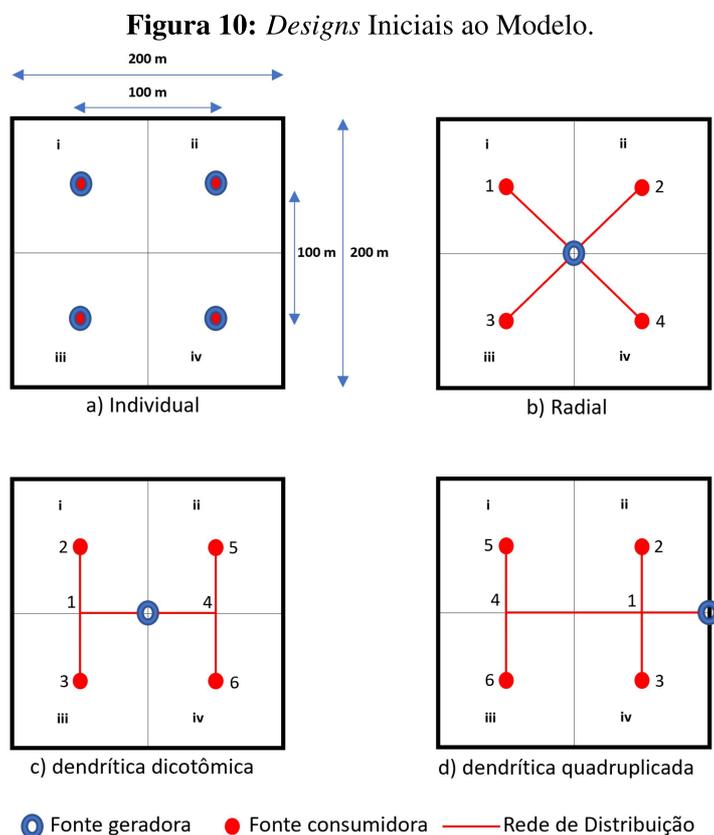
A partir da realização da quarta etapa proposta no presente trabalho, a análise dos *designs* em relação aos fator técnico principal de queda de tensão, foi realizada através de avaliação com a utilização da ferramenta da Microsoft Excel e do Minitab.

Na avaliação dos resultados com base nas variáveis do modelo, a utilização de tabelas para apresentação dos valores de queda de tensão é demonstrada, segregando para cada *design*. Posteriormente, são aplicadas junções de multiplicação dos *designs* dendrítico dicotômico e dendrítico quadruplicado.

A análise utilizando os parâmetros randômicos das variáveis do modelo, foi realizada através de configurações gráficas, objetivando a demonstração da quantidade média de fornecimentos por fontes de geração, tais como: resultados de cada iteração, frequência da média de fornecimentos por fontes de geração (histograma) e quantitativo de iterações e subiterações (diagrama de caixa para representar a variação de dados observados de uma variável numérica).

4 RESULTADOS

Nos estudos realizados para o entendimento da proposta do presente trabalho de tese, foram aplicados nos *designs* da Teoria Construtal, os cálculos apresentados neste trabalho. Desta forma, os *designs* analisados são ilustrados a seguir, na Figura10:



Fonte: Adaptado de Rocha, Lorente e Bejan (2010).

As configurações da Figura10 são caracterizadas com 04 conexões (i, ii, iii e iv), também chamadas de fornecimentos, distribuídos de forma com geração de energia elétrica individual, *design* "a" ou geração desta energia para o atendimento coletivo, *designs* "b", "c" e "d".

Desta forma, a análise de cálculo de queda de tensão de cada configuração de *design*, é descrita a seguir.

4.0.1 Análise da queda de tensão dos *designs* iniciais

Utilizando a metodologia de cálculo aplicado em Companhia Paulista de Força e Luz - CPFL (2018), foi desenvolvido um arquivo para o dimensionamento de cada situação, con-

tendo o algoritmo para a possibilidade de realização de iterações:

a) *Design Individual*

No sistema individual, conforme imagem "a" da Figura10, o fator de queda de tensão é inexistente devido a geração da energia elétrica através do sistema fotovoltaico, estar localizado no ponto de conexão de consumo desta. Ou seja, cada consumidor possui uma geração própria de energia elétrica conectada diretamente para consumo, não sendo compartilhada.

b) *Design Radial*

Neste sistema radial, conforme imagem "b" da Figura10, inicia-se o processo de análise de compartilhamento de geração de energia elétrica através do sistema fotovoltaico. O resultado deste cálculo é apresentado na Tabela 8, com parâmetros padrão de distância e tipo de condutor,

Tabela 8: Cálculo de queda de tensão de um sistema Radial.

TRECHO		CARGA			CONDUTORES	QUEDA DE TENSÃO		
Designação	Comprimento	Distribuída no Trecho	Acumulada no fim do Trecho	Total (C/2+D)*B		Unitária	No Trecho (E*G)	Total
A	B	C	D	E	F	G	H	I
SECUNDÁRIA	100 m	KVA	KVA	KVA*100 m	AWG / mm ²	%	%	%
GERAÇÃO - I	1	5	0	2,5	3P50(A50)	0,0515	0,13	0,13

Fonte: Adaptado de Companhia Paulista de Força e Luz - CPFL (2018).

onde,

- A: descrição do ponto de conexão do sistema de energia elétrica;
- B: distância entre o ponto A em relação ao fornecimento, dado em m ;
- C: potência elétrica no ponto de fornecimento, dado em kVA ;
- D: potência elétrica acumulada do ponto A até o ponto de fornecimento;
- E: soma de potência elétrica do fornecimento com a potência elétrica acumulada até o trecho, considerando a distância do ponto A, dada em kVA ;
- F: descrição do tipo de condutores de energia elétrica utilizados;
- G: valor tabelado de queda de tensão percentual característico do condutor, dado em %;
- H: queda de tensão calculada no trecho do ponto A até o fornecimento, dada em %;
- I: resultado total de queda de tensão, dado em %.

A Tabela 8 demonstra o resultado da queda de tensão para um dos quatro consumidores, situados igualmente a 100 metros da fonte geradora, com a demanda de 5 kVA e utilizando um condutor de energia elétrica trifásico de seção 50 mm² (fases e neutro). Portanto, o resultado de 0,13% para esta configuração (da geração até o consumidor 1 ou "i") é igual para os demais três consumidores (2 ou "ii", 3 ou "iii" e 4 ou "iv") conectados à mesma fonte geradora, da Figura 10.

Porém, além do fator de queda de tensão, o fator de demanda relacionado à quantidade de consumidores, que neste caso são 04, conforme Tabela 5, deverá ser aplicado. No caso, o valor é 0,86. Desta forma, o resultado final para o sistema será conforme apresentado na Tabela 9:

Tabela 9: Cálculo de queda de tensão de um sistema Radial (fator de demanda de 0,86).

TRECHO		CARGA			CONDUTORES	QUEDA DE TENSÃO		
Designação	Comprimento	Distribuída no Trecho	Acumulada no fim do Trecho	Total (C/2+D)*B		Unitária	No Trecho (E*G)	Total
A	B	C	D	E	F	G	H	I
SECUNDÁRIA	100 m	KVA	KVA	KVA*100 m	AWG / mm ²	%	%	%
GERAÇÃO - 1	1	4,3	0	2,15	3P50(A50)	0,0515	0,11	0,11
GERAÇÃO - 2	1	4,3	0	2,15	3P50(A50)	0,0515	0,11	0,11
GERAÇÃO - 3	1	4,3	0	2,15	3P50(A50)	0,0515	0,11	0,11
GERAÇÃO - 4	1	4,3	0	2,15	3P50(A50)	0,0515	0,11	0,11

Fonte: Adaptado de Companhia Paulista de Força e Luz - CPFL (2018).

A Tabela 9 demonstra o resultado da queda de tensão das quatro segmentações aplicadas, diferenciando da Tabela 8 pela aplicação do fator de demanda. Portanto, o resultado de 0,11% para esta configuração para cada consumidor, descreve que o fator de demanda influencia na redução desta queda de tensão no ponto de consumo.

As informações descritas nas Tabelas 8 e 9, com base em Companhia Paulista de Força e Luz - CPFL (2018), são:

- Comprimento: comprimento do circuito em lances de 100 metros. Ex: Para um circuito de 150 metros, o preenchimento deverá ser "1,5";
- Carga distribuída no trecho: carga em kVA compreendida entre os pontos inicial e final do circuito a ser calculado. nesse campo a carga do início e final do circuito é desconsiderada;
- Carga acumulada no final do trecho: é a carga localizada exatamente no final do trecho a ser estudado acrescido das cargas posteriores ligadas no mesmo circuito;
- Carga total: relação entre as cargas distribuídas no trecho a ser estudado e a carga acumulada no final do circuito;
- Queda de tensão unitária: valor obtido na Tabela 6;

- Queda de tensão no trecho: multiplicação da queda de tensão unitária pela carga total;
- Queda de tensão total: queda de tensão no trecho. Se houver queda de tensão à montante do circuito, esta deverá ser somada à queda de tensão total.

c) *Design* Dendrítico Dicotômico

Neste sistema dendrítico, conforme imagem "c)" da Figura 10, o processo de análise de compartilhamento de geração de energia elétrica através do sistema fotovoltaico contém quedas de tensão acumuladas no trecho. O resultado deste cálculo é apresentado na Tabela 10:

Tabela 10: Cálculo de queda de tensão de um sistema Dendrítico Dicotômico (fator de demanda de 0,86).

TRECHO		CARGA			CONDUTORES	QUEDA DE TENSÃO		
Designação	Comprimento	Distribuída no Trecho	Acumulada no fim do Trecho	Total (C/2+D)*B		Unitária	No Trecho (E*G)	Total
A	B	C	D	E	F	G	H	I
SECUNDÁRIA	100 m	KVA	KVA	KVA*100 m	AWG / mm ²	%	%	%
GERAÇÃO - 1	0,5	0	8,6	4,30	3P50(A50)	0,0515	0,22	0,22
1 ao 2	0,5	4,3	0	1,08	3P50(A50)	0,0515	0,06	0,28
1 ao 3	0,5	4,3	0	1,08	3P50(A50)	0,0515	0,06	0,28
GERAÇÃO - 4	0,5	0	8,6	4,30	3P50(A50)	0,0515	0,22	0,22
4 ao 5	0,5	4,3	0	1,08	3P50(A50)	0,0515	0,06	0,28
4 ao 6	0,5	4,3	0	1,08	3P50(A50)	0,0515	0,06	0,28

Fonte: Adaptado de Companhia Paulista de Força e Luz - CPFL (2018)

A Tabela 10 demonstra o resultado da queda de tensão de todas as segmentações aplicadas nesta configuração de *design*. A linha que descreve "GERAÇÃO - 1" demonstra o valor de queda de tensão da fonte geradora até a primeira derivação apresentada na Figura10 "c", ou seja, o ponto "1"; deste ponto, ocorre a derivação para os consumidores "i" (linha que demonstra "1 ao 2") e "iii" (linha que demonstra "1 ao 3"). Na sequência da Tabela 10, a linha que descreve "GERAÇÃO - 4" demonstra o valor de queda de tensão da fonte geradora até a segunda derivação apresentada na Figura10 "c", ou seja, o ponto "4"; deste ponto, ocorre a derivação para os consumidores "ii" (linha que demonstra "4 ao 5") e "iv" (linha que demonstra "4 ao 6").

Desta forma, observa-se que as quedas de tensão são apresentadas para cada um dos lados da imagem, sendo idêntica para ambos. Ou seja, todos os consumidores deste *design* possuem o mesmo valor de queda de tensão de 0,28%.

d) *Design* Dendrítico Quadruplicado

Neste sistema dendrítico quadruplicado, conforme imagem "d)" da Figura10, o processo de análise de compartilhamento de geração de energia elétrica através do sistema foto-

voltaico contém quedas de tensão acumuladas no trecho. O resultado deste cálculo é apresentado na Tabela 11:

Tabela 11: Cálculo de queda de tensão de um sistema Dendrítico Quadruplicado (fator de demanda de 0,86).

TRECHO		CARGA			CONDUTORES	QUEDA DE TENSÃO		
Designação	Comprimento	Distribuída no Trecho	Acumulada no fim do Trecho	Total (C/2+D)*B		Unitária	No Trecho (E*G)	Total
A	B	C	D	E	F	G	H	I
SECUNDÁRIA	100 m	KVA	KVA	KVA*100 m	AWG / mm ²	%	%	%
GERAÇÃO - 1	0,5	0	17,2	8,60	3P50(A50)	0,0515	0,44	0,44
1 ao 2	0,5	0	12,9	6,45	3P50(A50)	0,0515	0,33	0,78
1 ao 3	0,5	0	12,9	6,45	3P50(A50)	0,0515	0,33	0,78
1 ao 4	1	8,6	8,6	12,90	3P50(A50)	0,0515	0,66	1,44
4 ao 5	0,5	12,9	0	3,23	3P50(A50)	0,0515	0,17	1,61
4 ao 6	0,5	12,9	0	3,23	3P50(A50)	0,0515	0,17	1,61

Fonte: Adaptado de Companhia Paulista de Força e Luz - CPFL (2018).

A Tabela 11 demonstra o resultado da queda de tensão de todas as segmentações aplicadas nesta configuração de *design*. A linha que descreve "GERAÇÃO - 1" demonstra o valor de queda de tensão da fonte geradora até a primeira derivação apresentada na Figura10 "d", ou seja, o ponto "1"; deste ponto, ocorre a derivação para os consumidores "ii" (linha que demonstra "1 ao 2") e "iv" (linha que demonstra "1 ao 3"). Na sequência da Tabela 11, a linha que descreve "1 ao 4" demonstra a próxima derivação para uma nova conexão. O valor de queda de tensão até esta segunda derivação apresentada na Figura10 "d", ou seja, do ponto "1" ao "4", é de 1,44%; deste ponto, ocorre a derivação para os consumidores "i" (linha que demonstra "4 ao 5") e "iii" (linha que demonstra "4 ao 6").

Observa-se neste tipo de sistema, que os valores de queda de tensão tornam-se acumulativos para os consumidores mais distantes das fontes geradoras, ou seja para este *design*, o "i" e o "iii", que apresentaram queda de tensão de 1,61% enquanto os consumidores "ii" e o "iv", próximos à fonte geradora, descreveram uma queda de tensão de 0,78%.

4.1 Considerações dos *Designs* Iniciais: Queda de Tensão

Como resultado dos *designs* iniciais, observa-se que os valores de queda de tensão estão muito inferiores aos descritos pela ANEEL, como máximo. Ou seja, o observado de 1,22% no *design* dendrítico quadruplicado resultou abaixo dos 5% salientados por Vogel e Crovato (2018). Este fator descreve uma viabilidade de implementação de quaisquer um dos sistemas individual, radial e dendríticos, sem a observação do fator de custos envolvidos.

4.1.1 Evolução dos Sistemas Distribuídos

Segundo a Teoria Construtal salientada no presente trabalho, com a aplicação do descrito por Rocha, Lorente e Bejan (2010), é fundamental observar os princípios de sistemas de energia distribuída, o que torna-os mais eficientes, mais resistentes e mais adaptáveis do que outras arquiteturas. Desta forma, demonstrando os princípios que governam a geração de padrões, *clusters* de sistemas de energia, centralização versus descentralização, e transições no tempo de uma configuração para outra.

Desta forma, os *designs* iniciais apresentados com a organização de cada situação radial e dendrítico, possuem uma evolução necessária em sua arquitetura, buscando analisar como o sistema de geração compartilhada se comporta por N usuários acrescidos à este.

4.1.1.1 Análise da queda de tensão dos *designs* em evolução

a) *Design* Dendrítico Dicotômico

Nesta configuração, a evolução segue a arquitetura inicial do *design* para a evolução deste, incluindo a aplicação de N usuários ao sistema, quadruplicando esta quantidade da avaliação inicial, conforme demonstrado na Figura 11:

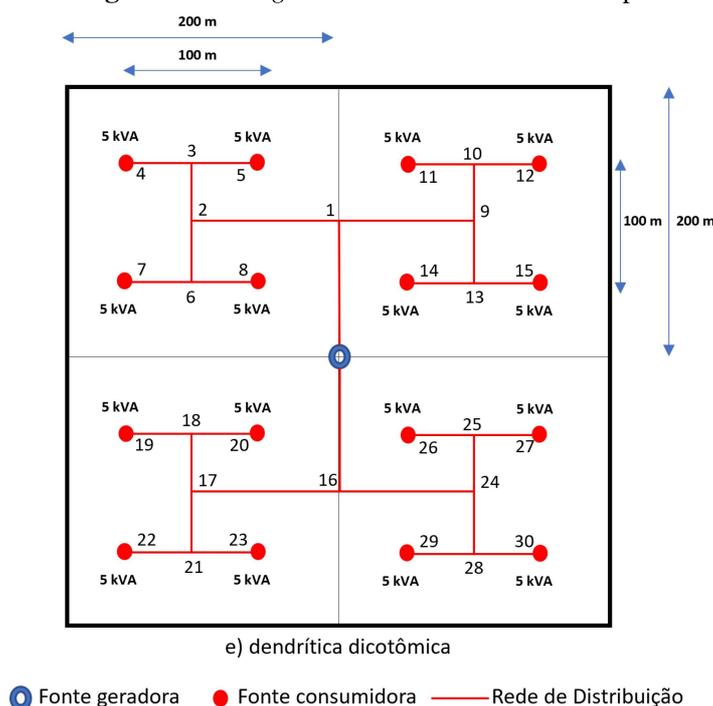
Com este *design* evolutivo, no sistema dendrítico dicotômico duplicado, conforme imagem "e" da Figura 11, o processo de análise de compartilhamento de geração de energia elétrica através do sistema fotovoltaico contém quedas de tensão acumuladas no trecho. O resultado deste cálculo é apresentado na Tabela 12. Cabe salientar que o fator de demanda relacionado à quantidade de consumidores, que neste caso são 08 na parte superior e 08 na parte inferior da imagem em relação à geração de energia, conforme Tabela 5, deverá ser aplicado. No caso, o valor é 0,71.:

Tabela 12: Cálculo de queda de tensão de um sistema Dendrítico Dicotômico Duplo (fator de demanda de 0,71).

TRECHO		CARGA			CONDUTORES	QUEDA DE TENSÃO		
Designação	Comprimento	Distribuída no Trecho	Acumulada no fim do Trecho	Total (C/2+D)*B		Unitária	No Trecho (E*G)	Total
A	B	C	D	E	F	G	H	I
SECUNDÁRIA	100 m	KVA	KVA	KVA*100 m	AWG / mm ²	%	%	%
GERAÇÃO - I	1	0	28,4	28,40	3P50(A50)	0,0515	1,46	1,46
1 ao 2	1	14,2	14,2	21,30	3P50(A50)	0,0515	1,10	2,56
2 ao 3	0,5	24,9	7,1	9,78	3P50(A50)	0,0515	0,50	3,06
3 ao 4	0,5	24,9	3,55	8,00	3P50(A50)	0,0515	0,41	3,47
3 ao 5	0,5	24,9	3,55	8,00	3P50(A50)	0,0515	0,41	3,47

Fonte: Adaptado de Companhia Paulista de Força e Luz - CPFL (2018)

A Tabela 12 demonstra o resultado da queda de tensão de todas as segmentações aplicadas nesta configuração, parte superior, do *design*. A linha que descreve "GERAÇÃO

Figura 11: Design Dendrítico Dicotômico Duplo

Fonte: Adaptado de Rocha, Lorente e Bejan (2010).

- 1" demonstra o valor de queda de tensão da fonte geradora até a primeira derivação apresentada na Figura 11, ou seja, o ponto "1"; deste ponto, ocorre uma nova a derivação para o ponto "2" e uma para o ponto "9"; conseqüentemente, do ponto "2" é realizada uma nova a derivação para os pontos "3" e "6", possibilitando a conexão dos quatro consumidores situados no quadrante superior esquerdo desta Figura 11 e do ponto "9", é realizada uma nova a derivação para os pontos "10" e "13", possibilitando a conexão de outros quatro consumidores situados no quadrante superior direito desta Figura 11.

Sendo assim, Tabela 12 apresenta os resultados de queda de tensão dos consumidores "4" e "5", referentes as linhas "3 ao 4" e "3 ao 5" da respectiva tabela, de 3,47%. Este resultado é o mesmo atribuído aos demais consumidores deste *design*, ou seja, para os consumidores situados nos pontos "7", "8", "11", "12", "14", "15", "19", "20", "22", "23", "26", "27", "29" e "30", o valor final de queda de tensão obtido são os mesmos 3,47%.

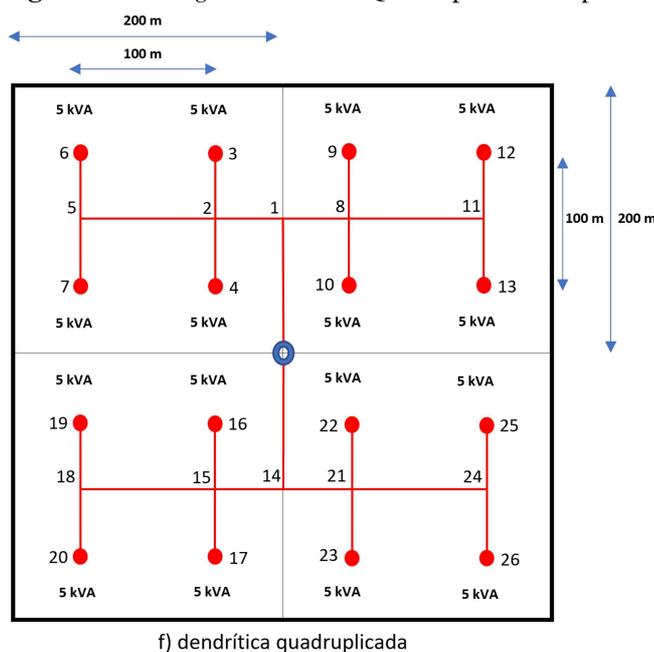
Portanto, para o caso deste *design* em específico, os pontos apresentados nos cálculos da Tabela 12 descrevem os fatores relacionados ao quadrante superior esquerdo da Figura 11; porém, estes resultados também são aplicados aos demais quadrantes, com os

resultados iguais.

b) *Design* Dendrítico Quadruplicado

Nesta configuração, a evolução segue a arquitetura inicial do *design* para a evolução deste, incluindo a aplicação de N usuários ao sistema, quadruplicando esta quantidade da avaliação inicial, conforme demonstrado na Figura 12:

Figura 12: *Design* Dendrítico Quadruplicado Duplo



● Fonte geradora ● Fonte consumidora — Rede de Distribuição

Fonte: Adaptado de Rocha, Lorente e Bejan (2010).

Com este *design* evolutivo, no sistema dendrítico quadruplicado, conforme imagem "f)" da Figura 12, o processo de análise de compartilhamento de geração de energia elétrica através do sistema fotovoltaico contém quedas de tensão acumuladas no trecho. O resultado deste cálculo é apresentado na Tabela 13. Cabe salientar que o fator de demanda relacionado à quantidade de consumidores, que neste caso são 08 na parte superior e 08 na parte inferior da imagem em relação à geração de energia, conforme Tabela 5, deverá ser aplicado. No caso, o valor é 0,71.:

A Tabela 13 demonstra o resultado da queda de tensão de todas as segmentações aplicadas nesta configuração, parte superior, do *design*. A linha que descreve "GERAÇÃO - 1" demonstra o valor de queda de tensão da fonte geradora até a primeira derivação

Tabela 13: Cálculo de queda de tensão de um sistema Dendrítico Quadruplicado Duplo (fator de demanda de 0,71).

TRECHO		CARGA			CONDUTORES	QUEDA DE TENSÃO		
Designação	Comprimento	Distribuída no Trecho	Acumulada no fim do Trecho	Total (C/2+D)*B		Unitária	No Trecho (E*G)	Total
A	B	C	D	E	F	G	H	I
SECUNDÁRIA	100 m	KVA	KVA	KVA*100 m	AWG / mm ²	%	%	%
GERAÇÃO - I	1	0	28,4	28,40	3P50(A50)	0,0515	1,46	1,46
1 ao 2	0,5	14,2	14,2	10,65	3P50(A50)	0,0515	0,55	2,01
2 ao 3	0,5	24,9	0	6,23	3P50(A50)	0,0515	0,32	2,33
2 ao 4	0,5	24,9	0	6,23	3P50(A50)	0,0515	0,32	2,33
2 ao 5	1	21,3	7,1	17,75	3P50(A50)	0,0515	0,91	3,25
5 ao 6	0,5	24,9	0	6,23	3P50(A50)	0,0515	0,32	3,57
5 ao 7	0,5	24,9	0	6,23	3P50(A50)	0,0515	0,32	3,57

Fonte: Adaptado de Companhia Paulista de Força e Luz - CPFL (2018)

apresentada na Figura 12, ou seja, o ponto "1"; deste ponto, ocorre uma nova a derivação para o ponto "2" e uma para o ponto "8"; conseqüentemente, do ponto "2" é realizada uma nova a derivação para o ponto "5", possibilitando a conexão de dois consumidores situados no quadrante superior esquerdo desta Figura 12 e do ponto "8", é realizada uma nova a derivação para o ponto "11", possibilitando a conexão de outros dois consumidores situados no quadrante superior direito desta Figura??.

Sendo assim, Tabela 13 apresenta os resultados de queda de tensão dos consumidores dos pontos "3" e "4", referentes as linhas "2 ao 3" e "2 ao 4" da respectiva tabela, de 2,33% e, na situação dos consumidores mais distantes da fonte geradora, apresenta os resultados de queda de tensão dos consumidores dos pontos "6" e "7", referentes as linhas "5 ao 6" e "5 ao 7" da respectiva tabela, de 3,57%. Este resultado é o mesmo atribuído aos demais consumidores deste *design*, ou seja, para os consumidores situados nos pontos "12", "13", "19", "20", "25" e "26", o valor final de queda de tensão obtido são os mesmos 3,57%.

Portanto, para o caso deste *design* em específico, os pontos apresentados nos cálculos da Tabela 13 descrevem os fatores relacionados ao quadrante superior esquerdo da Figura 12; porém, estes resultados também são aplicados aos demais quadrantes, com os resultados iguais.

4.2 Análise de Processo de Iterações com a Utilização de IA

Portanto, buscando o objetivo do presente trabalho para a análise quanto a geração de energia elétrica através do sistema fotovoltaico em áreas rurais e remotas, se faz possível a realização, através da composição evolutiva destes *designs* limitada pelos parâmetros elencados no capítulo 3, simular N situações as quais são descritas como iterações. Estas iteração são aplicadas utilizando inteligência artificial.

Sendo assim, o algoritmo de análise realiza, randomicamente, a ação de definição das conexões de futuros fornecimentos em mesmo sistema, como demonstrado na parametrização da Tabela 14 a seguir:

Tabela 14: Parâmetros de Definição Randômica.

Descrição	Parâmetro	Unidade
Design	Individual, Radial, Dendítrica Dicotômica ou Dendítrica Quadruplicada	Tipo
Fornecimentos	1 a 4	Quantidade
Ponto de Conexão	i, ii, iii, iv ou Geração	Tipo
Condutor	3P120(A70), 3P70(A70) ou 3P50(A50)	Tipo
Distância entre os Fornecimentos	100, 150 ou 200	m
Queda de Tensão Máxima admissível	5	%

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Com a utilização da composição básica dos *designs*, o processo de aleatoriedade da composição das variáveis salientadas na Tabela 14, proporciona a realização dos cálculos de queda de tensão. Outrossim, foi definido um *loop* cuja a limitação de iterações de cálculos corresponde a máxima queda de tensão admissível, definida como 5%; ou seja, a iteração se inicia com a escolha randômica dos parâmetros definidos, tem como sequência a definição de novos parâmetros para a evolução do *design* e se encerra quando atinge a queda de tensão de 5%, eliminando os fornecimentos que resultarem com valores superiores à esta.

No total, foram realizadas 2.000 iterações utilizando o método de definição aleatória através de algoritmo, possibilitando a análise de composição dos *designs* com maior eficiência, ou seja, conectar o máximo de fornecimentos a uma mesma fonte de geração de energia solar.

Neste sentido, a Figura 13 ilustra o exemplo de uma iteração completa, gerada randomicamente, promovendo a conexão do sistema anterior em ponto, aleatoriamente definido, para as conexões seguintes. Importante destacar que a cada evolução da iteração, dado à principalmente a distância entre os fornecimento, os valores de queda de tensão se elevam:

Nesta iteração completa simulada na Figura 13, os últimos 03 fornecimentos são excluídos pelo algoritmo devido ao resultado superior à definição da queda de tensão máxima de 5%. Geometricamente, a composição desta iteração é ilustrada na Figura 14, de forma não escalar:

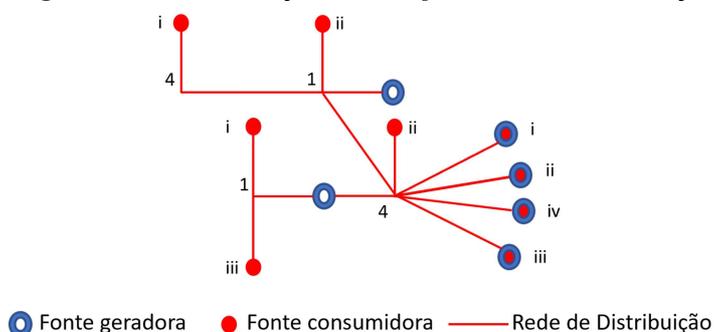
Portanto, o resultado desta iteração de simulação apresenta uma quantidade de 09 fornecimentos totais, porém, uma quantidade de 03 conexões em pontos dos *designs* ligados diretamente nas fontes de geração. Sendo assim, essa simulação descreve, no critério adotado como em média, um sistema de geração de energia elétrica do tipo solar fotovoltaica para cada

Figura 13: Demonstração do Resultado da Iteração.

Gerar Interações de QT				TRECHO		CARGA		QUEDA DE TENSÃO				
Ponto Conexão	Índice	Design	Qtde Clientes	Designação	Comprimento	Distribuída no Trecho	Acumulada no fim do Trecho	Total (C/2+D)*B	CONDUTORES	Unitária	No Trecho (E*G)	Total
				A	B	C	D	E	F	G	H	I
		1 Dendrítrica Dicotônica		SECUNDÁRIA	100 m	KVA	KVA	KVA*100 m	AWG / mm²	%	%	%
		2 Dendrítrica Dicotônica	1	GERAÇÃO - 1	0,50	0	10	5,00	3P120(A70)	0,02	0,10	0,10
		3 Dendrítrica Dicotônica	1	1 ao A	0,50	5	0	1,25	3P120(A70)	0,02	0,03	0,13
		4 Dendrítrica Dicotônica	1	1 ao C	0,50	5	0	1,25	3P120(A70)	0,02	0,03	0,13
		5 Dendrítrica Dicotônica	1	GERAÇÃO - 4	0,50	0	10	5,00	3P120(A70)	0,02	0,10	0,10
	4	6 Individual	1	4 ao B	0,50	5	0	1,25	3P120(A70)	0,02	0,03	0,13
		7 Individual	1	GERAÇÃO	1,00	5	0	2,50	3P50(A50)	0,00	0,00	0,10
		8 Individual	1	GERAÇÃO	1,00	5	0	2,50	3P50(A50)	0,00	0,00	0,10
		9 Individual	1	GERAÇÃO	1,00	5	0	2,50	3P50(A50)	0,00	0,00	0,10
	4	10 Dendrítrica Quadruplicada	1	GERAÇÃO - 1	1,00	0	20	20,00	3P50(A50)	0,05	1,03	1,13
		11 Dendrítrica Quadruplicada	1	1 ao B	1,00	0	15	15,00	3P50(A50)	0,05	0,77	1,90
		12 Dendrítrica Quadruplicada	1	1 ao D	1,00	0	15	15,00	3P50(A50)	0,05	0,77	1,90
		13 Dendrítrica Quadruplicada	1	1 ao 4	2,00	10	10	30,00	3P50(A50)	0,05	1,55	5,35
		14 Dendrítrica Quadruplicada	1	4 ao A	1,00	15	0	7,50	3P50(A50)	0,05	0,39	5,74
		15 Dendrítrica Quadruplicada	1	4 ao C	1,00	15	0	7,50	3P50(A50)	0,05	0,39	5,74

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 14: Demonstração do *Design* Resultante da Iteração.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

03 fornecimentos distintos.

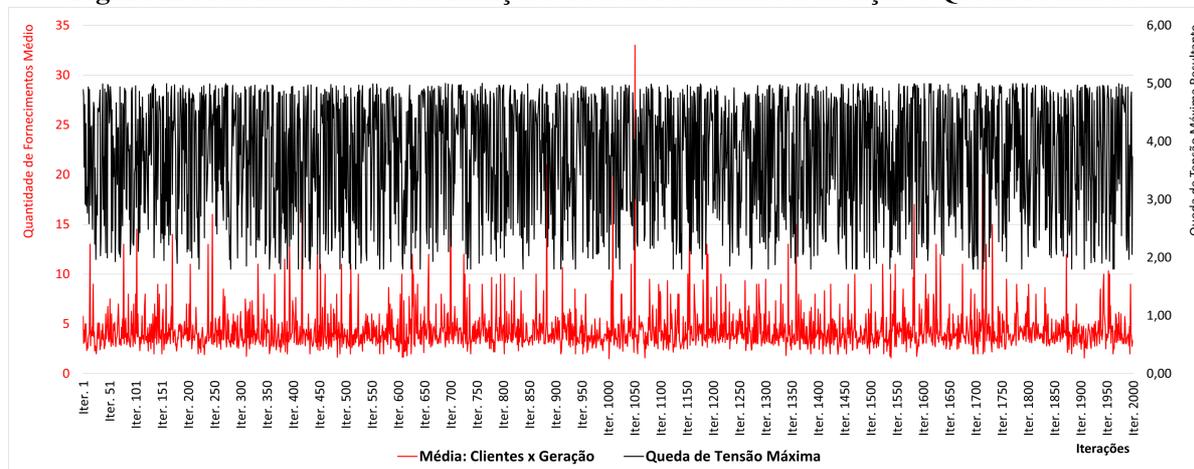
4.2.1 Resultado das Iterações

Com a realização das 2.000 iterações, alguns pontos são apresentados como de critério fundamental para a possibilidade de uma rede compartilhada de um sistema de geração de energia elétrica através de fonte renovável solar fotovoltaica. Estes, por sua vez, definem o comportamento simulado de um sistema em constante evolução com a conexão de novos fornecimentos. Sendo assim, o gráfico apresentado na Figura 15 ilustra o resultado dos valores obtidos de queda de tensão, cujo fator limitante foi de 5%, bem como do valor médio de fornecimentos/sistema de geração, obtido em cada iteração.

Um fator importante a ser considerado, é que cada iteração possui N subiterações. Em outras palavras, a cada uma das 2.000 iterações totais, subiterações foram geradas para a se-

leção randômica das variáveis e composição da iteração até que o valor atingisse o percentual máximo de queda de tensão. Portanto, foram realizadas totais 34.447 subiterações, sendo 17 em média para cada iteração completa.

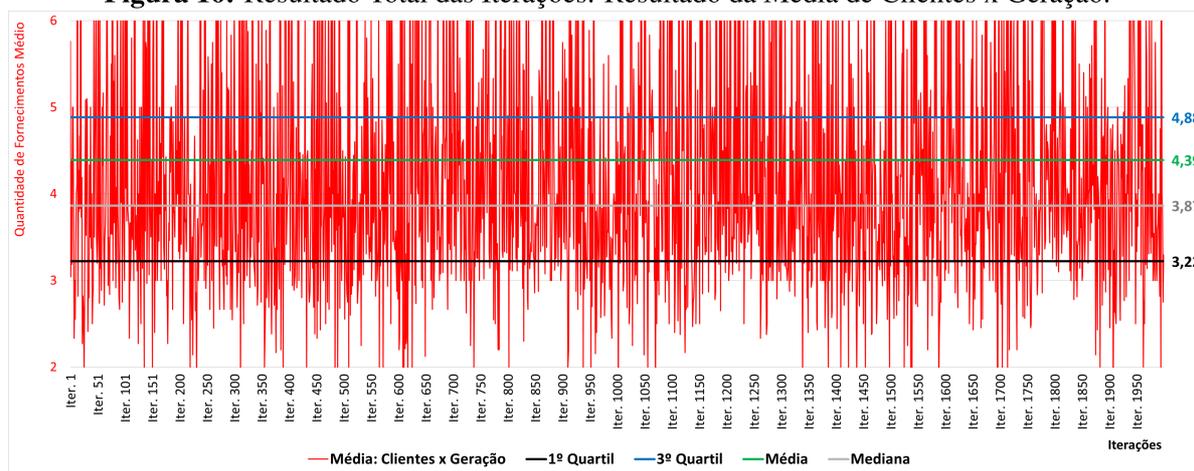
Figura 15: Resultado Total das Iterações: Média de Clientes x Geração e Queda de Tensão.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Quanto maior for o número de fornecimentos conectados a uma única fonte geradora de energia elétrica, obedecendo os critérios técnicos parametrizados, menor serão os custos de implementação deste. Observando este critério, a Figura 16 ilustra o filtro de iterações cujas resultantes se aproximam nos valores médios de clientes conectados por fontes de geração:

Figura 16: Resultado Total das Iterações: Resultado da Média de Clientes x Geração.



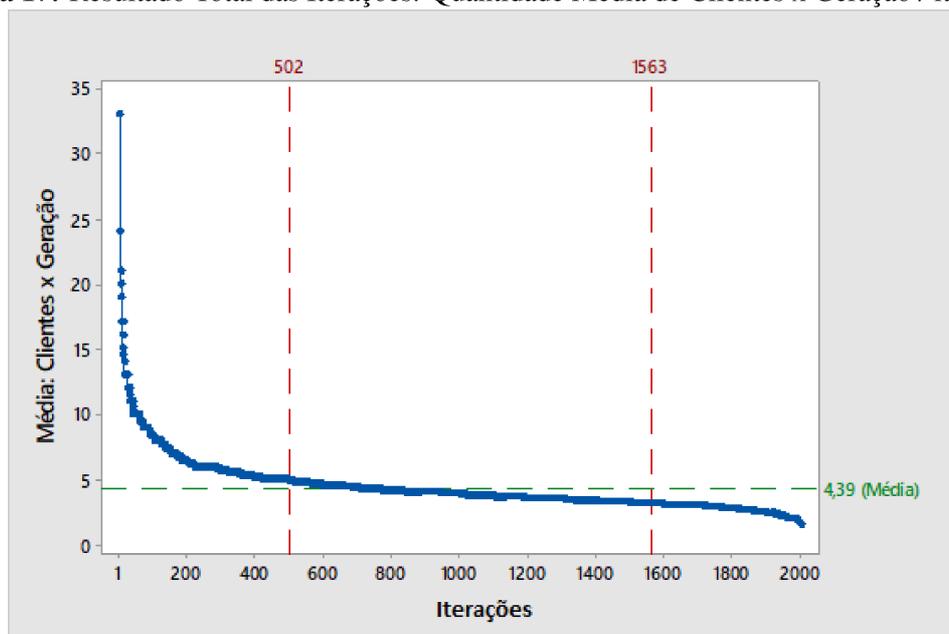
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Conforme ilustrado na Figura 16, as iterações remetem uma média de 4,39 fornecimentos

conectados à uma fonte geradora de energia elétrica. No entanto, 25% das iterações apresentaram resultados de médios 3,22 fornecimentos, inclusos neste primeiro quartil, e 25% apresentaram uma média de 4,89 fornecimentos nesta mesma condição, relacionados ao terceiro quartil.

No gráfico da Figura 17 a seguir, foram classificados de forma decrescente, os quantitativos médios de fornecimentos por fonte de geração obtidos pelas iterações realizadas.

Figura 17: Resultado Total das Iterações: Quantidade Média de Clientes x Geração / iterações.

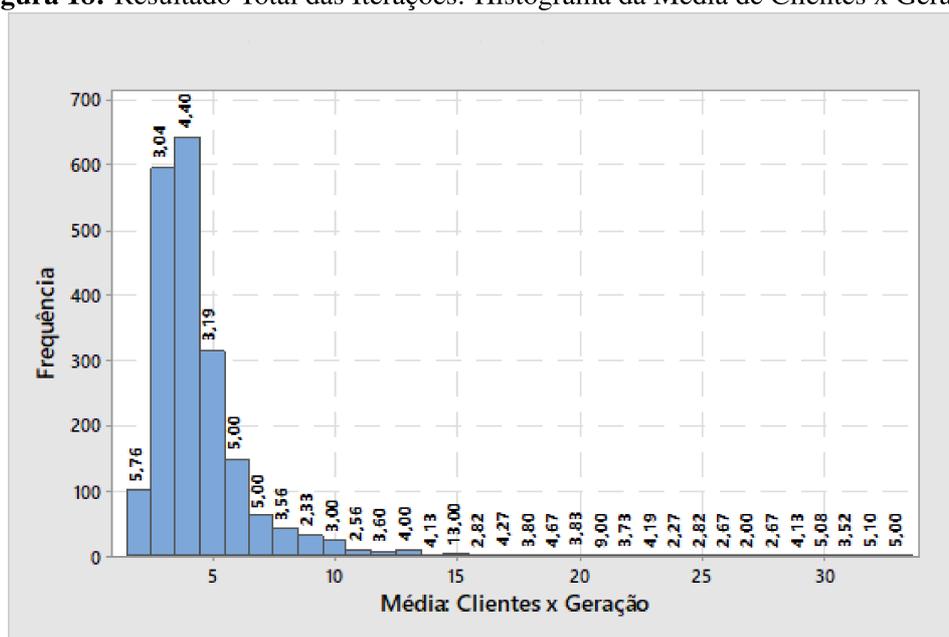


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na apresentação dos resultados analisados na Figura 17, é possível observar *outliers* em determinadas iterações. No entanto, analisando os demais fatores apresentados em cada iteração, identifica-se um padrão no volume de *designs* randomicamente selecionados com o resultado médio de fornecimentos por geração de energia elétrica, apresentado como 4,39.

No gráfico da Figura 18, o histograma que, basicamente, é uma ferramenta de análise e representação de dados quantitativos, os quais são agrupados em classes de frequência, permitindo a distinção da forma, do ponto central e da variação da distribuição. Outrossim, apresenta dados tais como amplitude e simetria na distribuição:

No histograma da Figura 18, observa-se um volume maior de frequência de resultados entre 3,04 e 4,40 clientes por fontes geradoras. Este resultado correlaciona-se com uma capacidade de atendimento de clientes em uma rede com fonte geradora de energia elétrica compartilhada, de máximos entre 4 e 5, capaz de manter os índices de qualidade de energia

Figura 18: Resultado Total das Iterações: Histograma da Média de Clientes x Geração.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

relacionados e discutidos no presente trabalho de tese.

No entanto, demais fatores foram mencionados e analisados para uma resolução de maior eficiência: comparação da composição dos *designs* correlacionados à média de clientes por fonte geradora. Desta forma, percentualmente, esta análise é ilustrada na Tabela 15:

Tabela 15: Resultados das Iterações em Relação à Média de Clientes x Geração.

Definição da Média de Clientes x Geração	Média de Clientes x Geração	% Individual	% Radial	% Dendrítica Dicotômica	% Dendrítica Quadruplicada
Menor que a média	3,37	24	22	31	24
Maior que a média	6,31	20	18	42	20
Total	4,39	23	21	34	23

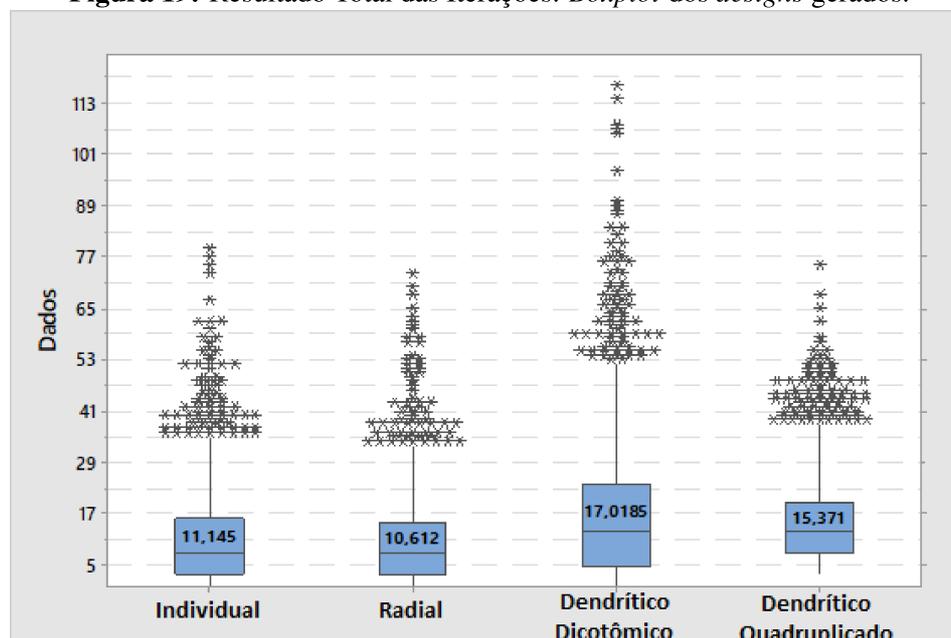
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na análise da Tabela 15 identifica-se que um número maior de subiteraões do *design* dendrítico dicotômico apresenta uma distribuição que converge para um número maior de fornecimentos conectados em um único sistema de geração, em média. Sendo assim, com uma média de 6,31 fornecimentos por fonte geradora, estes resultados representam 35% das 2.000 iterações. O restante de 65% das iterações, apresentaram uma média de 3,37 fornecimentos por fonte geradora.

A seleção randômica deste *design* dendrítico dicotômico ocorreu em maior quantidade

em avaliação da análise realizada. Esta disposição dos *designs*, aleatoriamente definidos, é ilustrada na Figura 19:

Figura 19: Resultado Total das Iterações: *Boxplot* dos *designs* gerados.

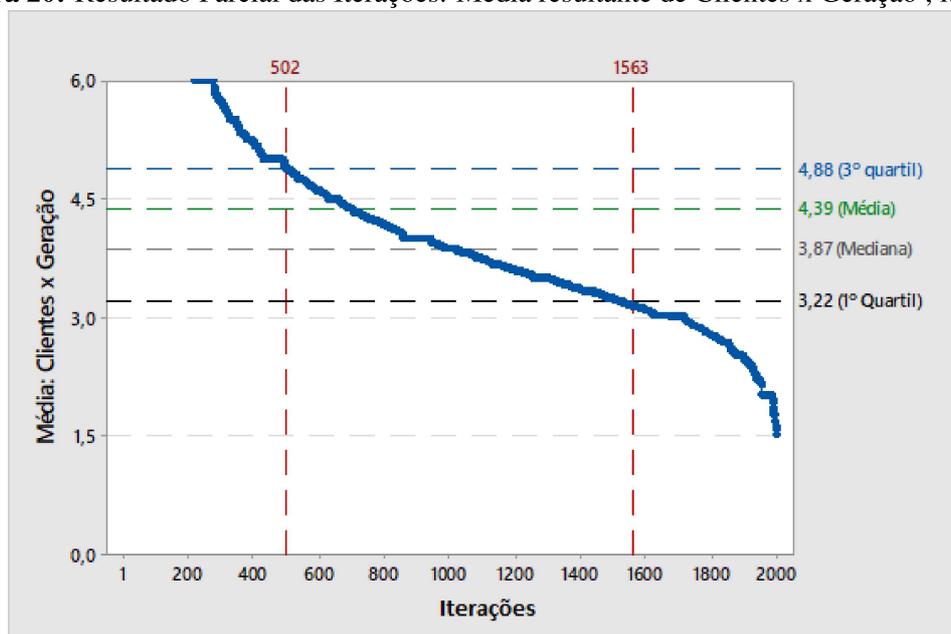


Fonte: Elaborado pelo Autor.

No gráfico da Figura 20, uma análise das iterações cujos os resultados de média de clientes conectados por fonte geradora, está entre os 50% das 2.000 realizadas, incluídas no primeiro e terceiro quartil estatístico. Observa então, que cerca de mais de 1.060 iterações possuem entre 3,22 e 4,88 clientes médios por fonte geradora.

Portanto, os resultados obtidos tanto pela análise que busca uma simetria na evolução de um sistema de fonte única de geração de energia elétrica para atendimento à N fornecimentos quanto para uma evolução aleatória, foram apresentados e analisados neste capítulo.

Figura 20: Resultado Parcial das Iterações: Média resultante de Clientes x Geração ; iteração.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho de tese apresentou como tema, um estudo sobre energias renováveis que vem cada vez mais sendo abordado no âmbito profissional em diferentes áreas das organizações, bem como no mundo acadêmico. Salientado por Mello et al. (2012), as fontes renováveis de produção de energia, principalmente a elétrica, promovem o desenvolvimento sustentável, onde com a redução anual do custo dos sistemas solares e a valoração dos custos ambientais e sociais da geração centralizada, o sistema solar tende a se tornar economicamente competitivo em curto prazo.

Com base nesta questão de energias renováveis, a geração de energia elétrica através de um sistema fotovoltaico, ou seja, através da radiação solar, é uma alternativa para o atendimento à pessoas situadas em localidades consideradas rurais e remotas não somente no Brasil, mas em todo o mundo. Neste sentido, o presente trabalho retrata a possibilidade de fornecimento desta energia elétrica nestas áreas rurais e consideradas remotas, através de um sistema fotovoltaico (energia solar) não somente para um único fornecimento, mas sim, através do compartilhamento desta fonte geradora a mais de uma unidade consumidora.

O objetivo geral deste trabalho de tese salienta demonstrar um sistema que possibilite o atendimento individual e/ou compartilhado de energia elétrica em localidades rurais e remotas, através de fonte renovável de energia solar e em *off-grid*, determinando as configurações com menor custo. Portanto, responder a seguinte questão: é possível a geração de energia elétrica fotovoltaica em áreas rurais e remotas, em sistema *off-grid* compartilhado, com um menor custo-benefício que os métodos atuais?

O presente trabalho evidencia uma necessidade de, além de simplesmente realizar o fornecimento de energia elétrica em localidades rurais e remotas, atender a legislação atual no país e regulado pela ANEEL, relacionado a qualidade deste fornecimento. Citado no capítulo 2 e referenciando ao descrito por Vogel e Crovato (2018), a QEE deve ser um fator que garanta o fornecimento de energia elétrica adequada à todos os consumidores, seja esta por geração pelas distribuidoras de energia elétrica, seja através de geração própria, no caso de um sistema do tipo *off-grid*:

O termo Qualidade de Energia Elétrica (QEE) tem sido usado em sentido amplo para expressar as mais variadas características da energia elétrica entregue pelas concessionárias aos consumidores. Abrangente, pode-se definir QEE como sendo uma medida eficiente da energia elétrica utilizada pelos consumidores. A QEE está relacionada com qualquer desvio que possa ocorrer na amplitude do sinal, na forma de onda ou na frequência da tensão e/ou

corrente elétrica. Esta designação também se aplica às interrupções de natureza permanente ou transitória que afetam o desempenho da distribuição e utilização da energia elétrica (VOGEL; CROVATO, 2018).

Como método, a aplicação de uma teoria ainda considerada em seu estágio inicial, segundo Bejan e Lorente (2008), é utilizada para uma distribuição de quatro *designs* distintos para análise: individual, radial, dendrítico dicotômico e dendrítico quadruplicado. Desta forma, considerando uma evolução não planejada de adição de número de usuários, mas seguindo essas premissas dos *designs* e atendendo a QEE salientada como princípio fundamental, pode-se elencar duas etapas de resultados obtidos: evolução simétrica dos *designs* de forma completa até o limite de 5% de queda de tensão e evolução selecionada e projetada randomicamente, com variáveis de pontos de conexão, quantidades de usuários, distâncias entre usuários e fonte geradora de energia elétrica, tipo de conexão e tipo de *design*.

Para a evolução simétrica através dos *design* definidos, trata-se de uma análise com planejamento definido, limitando o tipo de variável em relação às conexões e/ou adições de novos usuários. Desta forma, o capítulo 4 descreve níveis de queda de tensão admissíveis para os quatro *designs*, em conexão aos quatro usuários em cada: individual sem queda de tensão (fonte geradora no fornecimento); radial com queda de tensão de 0,13% em cada fornecimento e, aplicando a consideração de fator de demanda, com 0,11%; dendrítico dicotômico com máximo de 0,28% e o *design* dendrítico quadruplicado, chegando a 1,61% de queda de tensão no usuário mais distante da fonte geradora. Portanto, estes fatores descrevem uma viabilidade de implementação de quaisquer um dos sistemas em aplicação dos *designs*.

Em continuidade à evolução simétrica, o estudo de Rocha, Lorente e Bejan (2010) aplica para o sistema de aquecimento de água, a evolução de quadruplicar estes *designs* e conectados à uma única fonte geradora. Não obstante, a mesma simulação foi aplicada ao conceito de geração de energia elétrica por uma fonte, aos *designs* dendrítico dicotômico (tornando-se em Dendrítico Dicotômico Duplicado) e dendrítico quadruplicado (torando-se dendrítico quadruplicado), conectando 16 usuários em cada. Como resultado destas análises, os níveis máximos de queda de tensão foram apresentados com 3,47% e 3,57%, respectivamente.

Para a evolução aleatória através dos *design* definidos, porém selecionados e com um planejamento de N variáveis possíveis, o capítulo 4 descreve níveis de queda de tensão admissíveis até determinadas subiterações e iterações, geradas através de algoritmo de IA. Para uma avaliação com maior assertividade, foram geradas 2.000 iterações e mais de 34.000 subiterações.

Neste sentido, estas iterações representam uma evolução não simétrica no crescimento da população de determinada localidade rural e remota, bem como com variáveis de distância,

tipo e local de conexão desses novos usuários a um sistema existente de fonte geradora de energia elétrica fotovoltaica.

Como resultado deste tipo de iteração do sistema não simétrico, observa-se que, em média, entre 4 e 5 usuários podem compartilhar uma mesma fonte de geração e que o sistema pode se conectando, evoluindo mesmo que aleatoriamente, obedecendo este critério. Ou seja, a cada calculados 4,39 usuários, uma nova fonte geradora de energia elétrica fotovoltaica, deve ser adicionada. No entanto, se analisado um planejamento mínimo deste tipo de evolução não simétrico, é possível aumentar a média de 4,39 usuários para 6,31 em mesma fonte geradora; para esta possibilidade, o *design* dendrítico dicotômico tem destaque por representar 42% dos *designs* de utilização. Ou seja, aplicando a conexão por este *design* em estimados 42% da estrutura de rede compartilhada, a probabilidade de conectar um número maior de usuários, cerca de 6, por fonte geradora compartilhada, torna-se estatisticamente real.

Sendo assim, em avaliação à estrutura simétrica e não simétrica da evolução de uma rede compartilhada, a definição de um sistema planejado é, sem dúvidas, de melhor e mais eficiente aplicação: 16 usuários poderiam compartilhar uma fonte única. No entanto, esta não é uma situação que ocorre na realizada, visto não existir um padrão de posicionamento de unidades consumidoras no meio rural por vários aspectos. Por fim, na demonstração aleatória que condiz com uma realidade mais aproximada, o compartilhamento de até 6 usuários se torna possível, eficiente e de custo inferior, em avaliação à estrutura que uma fonte geradora de energia fotovoltaica, pode apresentar.

Portanto, para trabalhos futuros, são necessários estudos específicos para análise da influência de demais variáveis, tais como a implementação do fator de demanda na rede não simétrica, custos detalhadamente envolvidos (condutores, placas solares e demais equipamentos) aplicados no resultado, bem como na aplicação das RNAs na sua totalidade, fazendo com que o resultado de cada iteração não somente influencie na próxima, mas que descreva ajustes na configuração do *design* de nova subiteração, ponderando cada variável e tornando o sistema ainda mais eficiente, seja tecnicamente ou economicamente.

Outrossim, em relação aos futuros trabalhos para o tema do presente trabalho de tese, são necessárias análises estatísticas mais detalhadas, tais como avaliação de testes de hipótese dos resultados obtidos, normalidade dos dados para a resultante da média de consumidores por geração, segregação de famílias para a análise de gráficos tipo *Boxplot* e segregação dos dados relacionados ao gráfico de histograma, objetivando a definição da frequência dos resultados das iterações.

REFERÊNCIAS

- ABEPRO. **ABEPRO - Associação Brasileira de Engenharia de Produção**. 2008. 1 p. Citado na página 60.
- ABRADEE. **A Distribuição de Energia**. 2015. Citado na página 28.
- ABRADEE. Redes de Energia Elétrica. **ABRADEE (Associação Brasileira de Energia Elétrica)**, p. 1–5, 2017. Citado na página 63.
- AKINYELE, D. O.; RAYUDU, R. K.; NAIR, N. K. Global progress in photovoltaic technologies and the scenario of development of solar panel plant and module performance estimation - Application in Nigeria. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 48, p. 112–139, 2015. Citado 3 vezes nas páginas 23, 48 e 53.
- AKTER, S.; FU, X.; BREMERMAN, L.; ROSA, M.; NATTRODT, V.; VÄÄTÄNEN, J.; TEPLOV, R.; KHAIRULLINA, I. MNEs' contribution to sustainable energy and development: the case of "light for all" program in brazil. In: **International Business and Management**. 2017. v. 33, p. 195–224. Citado na página 24.
- ANAGNOSTOS, D.; GOVERDE, H.; CATTHOOR, F.; SOUDRIS, D.; POORTMANS, J. Systematic cross-validation of photovoltaic energy yield models for dynamic environmental conditions. **Solar Energy**, v. 155, p. 698–705, 2017. Citado na página 56.
- ANAGNOSTOS, D.; SCHMIDT, T.; CAVADIAS, S.; SOUDRIS, D.; POORTMANS, J.; CATTHOOR, F. A method for detailed, short-term energy yield forecasting of photovoltaic installations. **Renewable Energy**, v. 130, p. 122–129, 2019. Citado na página 57.
- ANEEL. **Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012**. 2012. Citado 6 vezes nas páginas 17, 26, 27, 43, 44 e 48.
- ANEEL. Resolução Normativa nº 687 de 2015 da ANEEL. **Aneel**, p. 24, 2015. Citado 4 vezes nas páginas 17, 26, 27 e 44.
- ANEEL. PRODIST – Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**, p. 1–76, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 27, 36 e 39.
- ANEEL. **Sistema de Informações de Geração da ANEEL - SIGA**. 2019. 1–33 p. Citado na página 44.
- ANEEL. **Relatórios de Consumo e Receita de Distribuição**. ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, 2020. Citado 4 vezes nas páginas 16, 28, 37 e 62.
- ANEEL. **Resolução Normativa nº 1000, de 07 de dezembro de 2021**. 2021. Citado na página 36.

ARAÚJO, C. d. F. **Eletrificação Rural em Comunidades Isoladas na Amazônia: introdução da energia solar fotovoltaica na reserva extrativista do rio unini, am.** 2014. Tese Universidade Federal do Amazonas, Manaus - Amazonas, 2014. Citado na página 29.

ARAUJO, N. D. D.; ZANESCO, I.; FUENTES, R. L.; MOEHLECKE, A.; GARCIA, S. B.; ARAÚJO, G. P. Evolução e análise de sistemas fotovoltaicos no Brasil e Chile. **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar**, 2018. Citado na página 42.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 5410: instalações elétricas de baixa tensão. **Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)**, p. 1–217, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 62.

BACELLAR, A. A.; ROCHA, B. R. Wood-fuel biomass from the Madeira River: a sustainable option for electricity production in the amazon region. **Energy Policy**, v. 38, n. 9, p. 5004–5012, 2010. Citado na página 16.

BAJAY, S.; Jannuzzi Gilberto; HEIDEIER, R.; VILELA, I.; PACCOLA, J.; GOMES, R. **Geração distribuída e eficiência energética**. 1º Edição. ed. Campinas - SPInternational Energy Initiative – IEI Brasil, 2018. 332 p. v. 1. Citado na página 47.

BAX, M. P. Design science: filosofia da pesquisa em ciência da informação e tecnologia design science: philosophy of research in information science and technology. **Ci. Inf.**, v. 42, n. 2, p. 298–312, 2013. Citado na página 61.

BEJAN, A. **Constructal Law: optimization as design evolution**. 2015. Citado na página 32.

BEJAN, A.; LORENTE, S. **Design with Constructal Theory**. 2008. Citado na página 86.

BEJAN, A.; LORENTE, S. The constructal law of design and evolution in nature. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 32.

BEZERRA, P. B. d. S.; CALLEGARI, C. L.; RIBAS, A.; LUCENA, A. F.; PORTUGAL-PEREIRA, J.; KOBERLE, A.; SZKLO, A.; SCHAEFFER, R. The power of light: socio-economic and environmental implications of a rural electrification program in brazil. **Environmental Research Letters**, v. 12, n. 9, 2017. Citado na página 23.

BOSE, B. K. Artificial Intelligence Techniques in Smart Grid and Renewable Energy Systems—Some Example Applications. **Proceedings of the IEEE**, v. 105, n. 11, p. 2262–2273, 2017. Citado na página 56.

BRAGA, A. d. P.; CARVALHO, A. P. d. L. F. d.; LUDERMIR, T. B. **Redes Neurais Artificiais: teoria e pratica**. 2007. Citado na página 54.

BRITO, M. C.; SILVA, J. A. Energia fotovoltaica: conversão de energia solar em electricidade. **O Instalador**, v. 25, n. 676, p. 07, 2006. Citado na página 20.

CASALE, R. M. **Eficiência da inserção da energia fotovoltaica no Brasil: uma abordagem por análise envoltória de dados**. 2018. 95 p. Tese, 2018. Citado na página 15.

CASTELLANOS, J. G.; WALKER, M.; POGGIO, D.; POURKASHANIAN, M.; NIMMO, W. Modelling an off-grid integrated renewable energy system for rural electrification in India using photovoltaics and anaerobic digestion. **Renewable Energy**, v. 74, p. 390–398, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.

CASTRO, R. M. G. Energias Renováveis e Produção Descentralizada. Citado na página 15., v. 2002, n. edição 0, 2002.

CCEE. **Regras de Comercialização: módulo 4 - garantias físicas**. 2009. Citado na página 38.

CEEE, A. S. R. Regulamento de Instalações Consumidoras de Baixa Tensão: ric bt. Citado 4 vezes nas páginas 35, 36, 37 e 40., p. 0–1, 2017.

CEMIG. ND 5.1 - Fornecimento de Energia Elétrica em Tensão Secundária - Rede de Distribuição Aérea - Edificações Coletivas. **Norma de Distribuição – ND-5.2**, p. 181, 2013. Citado na página 63.

CEMIG. ND - 3.1 - Projetos de Redes de Distribuição Aéreas Urbanas. **Manual de Distribuição**, p. 124, 2014. Citado 3 vezes nas páginas 36, 38 e 40.

Companhia Estadual de Energia Elétrica - CEEE-D. Elaboração de Projetos de Redes Aéreas de Distribuição Urbanas. **Procedimentos de Distribuição (Revisão de CEEE-D NTD-2013)**, p. 1–28, 2013. Citado na página 63.

Companhia Paulista de Força e Luz - CPFL. Norma Técnica: projeto de rede de distribuição - cálculo elétrico (ged 3667). **Normas Técnicas**, p. 1–54, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 40, 41 e 63.

Companhia Paulista de Força e Luz - CPFL. Norma Técnica: projeto de rede de distribuição - terminologia (ged 3668). **Companhia Paulista de Força e Luz - CPFL**, p. 1–34, 2018. Citado 11 vezes nas páginas 41, 42, 63, 64, 69, 70, 71, 72, 73, 74 e 77.

COPETTI, J.; MACAGNAN, M. Baterias em Sistemas Solares Fotovoltaicos. **Congresso Brasileiro de Energia Solar**, p. 10, 2007. Citado 3 vezes nas páginas 50, 51 e 52.

Érica (Ed.). **Instalações Elétricas: fundamentos, prática e projetos em instalações residenciais e comerciais**. 3 ed.. ed. São Paulo - SP: Erica, 2019, 2019. Pag. 1 - 456 p. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.

DE ANDRADE, H. M.; BRANDALISE, N. Análise de viabilidade econômico-financeira, pelo método de Monte Carlo, de um sistema fotovoltaico para geração distribuída. **Sistemas & Gestão**, v. 14, n. 4, p. 348–355, 2020. Citado na página 28.

DUPONT, F. H.; GRASSI, F.; ROMITTI, L. Energias Renováveis : buscando por uma matriz energética sustentável. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 19, n. 1, p. 70–81, 2015. Citado 3 vezes nas páginas 15, 19 e 20.

EPE. **Empresa de Pesquisa Energética: matriz energética**. 2016. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 29.

EPE. Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2018 no ano base de 2017. **Empresa de Pesquisa Energética (EPE)**, p. 249, 2018. Citado na página 23.

EPE. **Matriz Energética Brasileira**. 2018. Citado na página 37.

EPE. Anuário Estatístico De Energia Elétrica 2020. **Empresa de Pesquisa Energética**, p. 6, 2020. Citado na página 28.

EPE. Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2021 (2021 Statistical Yearbook of electricity). Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.

, 2021.

FENYU, H. F.; XI, Z.; WEI, J.; HAIHANG, L. I.; SHUMAN, S. U.; XIANYAO, M. O. Research on the Credible Capacity Model and Calculation Method of Photovoltaic Power Generation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED RESEARCH IN ENGINEERING SCIENCES, ARES 2018, 1., 2018. **Anais...** 2018. Citado na página 42.

FERREIRA, R. T.; FARDIN, J. F.; RUEDA-MEDINA, A. C. Gerenciamento de Energia em uma Microrrede Isolada Composta por Fontes Renováveis. **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar**, 2018. Citado 4 vezes nas páginas 15, 28, 46 e 51.

FLECK, L.; TAVARES, M. H. F.; EYNG, E.; HELMANN, A. C.; ANDRADE, M. A. d. M. Redes Neurais Artificiais: princípios básicos artificial neural networks: basic principles. **Revista Eletrônica Científica Inovação e Tecnologia**, 2016. Citado na página 55.

FONTELLES, M. J.; SIMÕES, M. G.; FARIAS, S. H.; GARCIA, R.; FONTELLES, S. **Metodologia de Pesquisa Científica: diretrizes para elaboração de um protocolo de pesquisa**. 2008. Citado 3 vezes nas páginas 58, 59 e 60.

FREITAS, R. A. d.; VOGEL, E. P.; KORZENOWISKY, A. L.; ROCHA, L. A. O. Stochastic Model to Aid Decision Making on Investments in Renewable Energy Generation : portfolio diffusion and investor risk aversion. **Renewable Energy**, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 59.

FREITAS, R. A. de; VOGEL, E. P.; KORZENOWSKI, A. L.; OLIVEIRA ROCHA, L. A. Stochastic model to aid decision making on investments in renewable energy generation: portfolio diffusion and investor risk aversion. **Renewable Energy**, v. 162, p. 1161–1176, 8 2020. Citado na página 43.

FUHRMANN, M. W.; ABAIDE, R. Sistemas De Distribuição De Energia Elétrica – Estudo. **Revista ENAP (Escola Nacional de Administração Pública)**, n. C, p. 1–13, 2016. Citado na página 63.

FUSO NERINI, F.; HOWELLS, M.; BAZILIAN, M.; GOMEZ, M. Rural electrification options in the Brazilian Amazon. A multi-criteria analysis. **Energy for Sustainable Development**, v. 20, n. 1, p. 36–48, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 27.

GÓMEZ, M. F.; SILVEIRA, S. Delivering off-grid electricity systems in the Brazilian Amazon. **Energy for Sustainable Development**, v. 16, n. 2, p. 155–167, 2012. Citado na página 24.

GU, W.; WU, Z.; BO, R.; LIU, W.; ZHOU, G.; CHEN, W.; WU, Z. Modeling, planning and optimal energy management of combined cooling, heating and power microgrid: a review. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, v. 54, p. 26–37, 2014. Citado na página 57.

HAYKIN, S. Redes neurais: princípios e prática. **Bookman**, 2017. Citado 5 vezes nas páginas 18, 54, 63, 66 e 67.

IBGE. **IBGE - Censo Demográfico 2010**. 2010. Citado na página 23.

IIOKA, D.; MIURA, K.; MACHIDA, M.; KIKUCHI, S.; IMANAKA, M.; BABA, J.; TAKAGI, M.; ASANO, H. Hosting capacity of large scale PV power station in future distribution networks. In: **IEEE INNOVATIVE SMART GRID TECHNOLOGIES - ASIA: SMART GRID FOR SMART COMMUNITY, ISGT-ASIA 2017**, 2017., 2018. **Anais...** 2018. p. 1–6. Citado na página 42.

IRENA - International Renewable Energy Agency. **Solar Energy: installed capacity**. 2020. Citado 3 vezes nas páginas 20, 21 e 24.

IRENA. IRENA (International Renewable Energy Agency). **Renewable Power Generation Costs in 2014**, n. October, p. 1–13, 2014. Citado na página 20.

VOZES, E. (Ed.). **Fundamentos de Metodologia Científica**. 1º. ed. Petrópolis, RJ: Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil, 2011. 1–185 p. Citado 2 vezes nas páginas 58 e 60.

LACERDA, D. P.; DRESCH, A.; PROENÇA, A.; ANTUNES JÚNIOR, J. A. V. Design Science Research: a research method to production engineering. **Gestão & Produção**, v. 20, n. 4, p. 741–761, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 58, 60 e 61.

LAGO, S. M. S.; DELABENETA, C. A Produção Científica Brasileira Sobre Energia Solar Fotovoltaica No Período De 2007 a 2017. **Revista de Administração de Roraima - RARR**, v. 8, n. 2, p. 416, 2018. Citado na página 27.

LIU, L.; MENG, X.; LIU, C. A review of maximum power point tracking methods of PV power system at uniform and partial shading. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 1500–1507, 2016. Citado na página 57.

- S.A., E. e. D. E. (Ed.). **Geração de energia elétrica de fontes alternativas**. 1º Edição. ed. Londrina / PR, 2020. 63 p. Citado 8 vezes nas páginas 42, 44, 45, 47, 49, 50, 51 e 53.
- Artliber (Ed.). **Energia solar para produção de eletricidade**. 1º Edição. ed. São Paulo - SP São Paulo : Artliber, 2012., 2012. 229 p. Citado 4 vezes nas páginas 47, 48, 51 e 53.
- MACHADO, C. T.; MIRANDA, F. S. Photovoltaic Solar Energy: a briefly review. **Revista Virtual de Química**, v. 7, n. 1, p. 126–143, 2015. Citado 6 vezes nas páginas 21, 45, 47, 48, 49 e 50.
- MACHIAVELLI, J. A.; KAEHLER, J. W. M.; MENDONÇA, C. M.; ALMEIDA, L. V. d. Energia Solar Fotovoltaica, montagem de um sistema off-grid. **Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão**, v. 7, n. 2, 3 2016. Citado na página 53.
- MAY TZUC, O.; BASSAM, A.; MENDEZ-MONROY, P.; DOMINGUEZ, I. Estimation of the operating temperature of photovoltaic modules using artificial intelligence techniques and global sensitivity analysis: a comparative approach. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v. 10, n. 3, 2018. Citado na página 55.
- MEERPOHL, J. J.; HERRLE, F.; ANTES, G.; ELM, E. von. Scientific value of systematic reviews: survey of editors of core clinical journals. **PLoS ONE**, v. 7, n. 5, p. 3–7, 2012. Citado na página 55.
- MELLO, A. P. A.; SPERANDIO, M.; PFITSCHER, L. L.; BERNADON, D. P. Planejamento da Reconfiguração Automática de Sistemas de Distribuição. **Congresso Brasileiro CBA**, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 85.
- 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**. 2014. Tese Universidade Federal de Uberlândia - UFU, 2014. Citado na página 44.
- Microsoft. **Introdução ao VBA no Office | Microsoft Docs**. 2021. 1–2 p. Citado na página 66.
- MME. **Ministério de Minas e Energia: energia no mundo - matrizes energéticas**. 2013. Citado na página 29.
- MOREIRA, E. A.; VALE, M. H. M.; OLIVEIRA, L. G. M. A modelagem da geração fotovoltaica distribuída e seus impactos na perspectiva do planejamento de sistemas elétricos. In: **Energia no Brasil – Volume 1**. 2020. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 48.
- MUNIZ, R. N.; DE SA, J. A.; DA ROCHA, B. R. Challenges and opportunities for universal access to electricity in the Amazon. **IYCE 2015 - Proceedings: 2015 5th International Youth Conference on Energy**, p. 1–6, 2015. Citado na página 16.
- PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L. d.; RÜTHER, R. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2017. 80 p. v. 2ª Ed. Citado 4 vezes nas páginas 15, 16, 19 e 20.

REIS, A. H. Constructal theory: from engineering to physics, and how flow systems develop shape and structure. **Applied Mechanics Reviews**, v. 59, n. 1-6, p. 269–282, 2006. Citado na página 32.

RIBEIRO, F. S.; KURAHASSI, L. F.; PAZZINI, L. H. A.; GALVÃO, L. C. R.; PELEGRINI, M. A. A evolução dos custos no programa de eletrificação rural do estado de São. Citado na página 22.

, p. 1–9, 2015.

ROCHA, L.; LORENTE, S.; BEJAN, A. Distributed energy tapestry for heating the landscape. **Journal of Applied Physics**, v. 108, n. 12, 2010. Citado 9 vezes nas páginas 33, 34, 62, 64, 69, 74, 75, 76 e 86.

RÜTHER, R.; ZILLES, R. Making the case for grid-connected photovoltaics in Brazil. **Energy Policy**, v. 39, n. 3, p. 1027–1030, 2011. Citado na página 49.

SALIM, H.; STEWART, R.; SAHIN, O.; DUDLEY, M. Drivers, barriers and enablers to end-of-life management of solar photovoltaic and battery energy storage systems: a systematic literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 211, p. 537–554, 2019. Citado na página 55.

SAMIR DALFOVO, M.; ADILSON LANA, R.; SILVEIRA, A. Métodos quantitativos e qualitativos: um resgate teórico. **Revista Interdisciplinar Científica Aplicada**, v. 4, p. 1–13, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 59 e 60.

SCHMIDT, C. A. J.; LIMA, M. A. M. A demanda por energia elétrica no Brasil. **Revista Brasileira de Economia**, v. 58, n. 1, p. 68–98, 2004. Citado na página 38.

SHAYANI, R. A.; OLIVEIRA, M. A. G. d.; CAMARGO, I. M. d. T. Comparação do Custo entre Energia Solar Fotovoltaica e Fontes Convencionais. **V Congresso brasileiro de planejamento energético**, p. 16, 2006. Citado na página 29.

SLOUGH, T.; URPELAINEN, J.; YANG, J. Light for all? Evaluating Brazil's rural electrification progress, 2000-2010. **Energy Policy**, v. 86, p. 315–327, 2015. Citado na página 23.

SOSNINA, E. N.; SHALUKHO, A. V. Operational Risk Study of a Power System with Renewable Energy Sources. Citado na página 49.
, 2017.

TABOSA, F. J. S.; COSTA, E. M.; FILHO, J. d. A.; NETO, N. T.; ARAUJO, J. A.; SANTOS, C. P. B. d. Análise da Demanda por Energia Elétrica no Meio Rural do Brasil. **IPEA - Planejamento e Políticas Públicas**, v. n. 52, p. 149 – 188, 2017. Citado na página 25.

TAVORA, G.; SILVA, J. A.; MENDONÇA, S. EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA NO ARMAZENAMENTO DE ENERGIA: uma perspectiva a partir das patentes de baterias. In: XIII CONGRESO IBEROAMERICANO DE ENERGIA SOLAR, 2020. **Anais...** 2020. Citado na página 50.

- URMEE, T.; MD, A. Social, cultural and political dimensions of off-grid renewable energy programs in developing countries. **Renewable Energy**, v. 93, p. 159–167, 2016. Citado na página 16.
- URRACA, R.; ANTONANZAS, J.; MARTÍNEZ-DE-PISÓN, F.; ANTONANZAS-TORRES, F. Estimation of solar global irradiation in remote areas. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v. 7, n. 2, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 55.
- VIANA, L. d. A.; ZAMBOLIM, L.; SOUSA, T. V.; TOMAZ, D. C. Melhoria da Qualidade de Vida em Regiões Rurais e sem Acesso à Energia Elétrica por meio da Geração Solar Fotovoltaica. **REVISTA ENGENHARIA NA AGRICULTURA - REVENG**, v. 27, n. 3, p. 204–211, 6 2019. Citado na página 16.
- Érica (Ed.). **Energia solar fotovoltaica : conceitos e aplicações**. 1º Edição. ed. São Paulo - SP São Paulo : Érica, 2012., 2012. 224 p. Citado 4 vezes nas páginas 45, 47, 50 e 53.
- VISWANATH, A.; KRISHNA, K.; CHANDRIKA, T.; PURUSHOTHAM, V.; HARIKUMAR, P. Development of a Mathematical Model for Solar Power Estimation Using Regression Analysis. In: **Advances in Intelligent Systems and Computing**. 2021. v. 1227, p. 589–597. Citado na página 43.
- VOGEL, E. P.; CROVATO, C. D. P. Study of Non-Contact and Non-Ground Voltage Signal Measurement System in Medium Voltage. Citado 5 vezes nas páginas 39, 62, 73, 85 e 86. , v. 16, n. 2, p. 416–421, 2018.
- YAÏCI, W.; LONGO, M.; ENTCHEV, E.; FOIADELLI, F. Simulation study on the effect of reduced inputs of artificial neural networks on the predictive performance of the solar energy system. **Sustainability (Switzerland)**, v. 9, n. 8, p. 1382, 2017. Citado na página 57.
- YAN, B.; LUH, P. B.; WARNER, G.; ZHANG, P. Operation and Design Optimization of Microgrids with Renewables. **IEEE Transactions on Automation Science and Engineering**, v. 14, n. 2, p. 573–585, 2017. Citado na página 28.
- YUKIZAKI, A. Y. G.; KONZEN, G.; ROSENBLUM, P. M.; RODRIGUES, T. A. P.; CHAGAS, T. T. **Nota Técnica - Metodologia: projeção de curva de carga horária**. EPE, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.

APÊNDICE A PSEUDOCÓDIGO EM VBA

No presente Apêndice é demonstrado o pseudocódigo desenvolvido pelo autor, em linguagem de programação VBA da ferramenta da Microsoft Excel, para a realização das iterações e subiteraões, o qual resultou nos dados apresentado no presente trabalho, capítulo 4:

```
1
2 ##### Inicio do processo
3
4 Algoritmo PROCESSO()
5
6 # Registrar horário de inicio
7
8     Ativa a planilha ("Info")
9     Selecciona("A4")
10    Ativa formula = "=NOW()"
11    Selecciona("A4")
12    Copia seleção
13    Cola seleção (especial)
14    Conclui função
15
16 # Definição de laço for
17
18 Iniciar em i = 1 para planilha "ANÁLISE" célula (33, 19)
19 % Definição do início e fim da quantidade de iterações a serem realizadas
20
21     # Limpar dados anteriores para o início das iterações
22
23     Ativa a planilha ("ANÁLISE")
24     Selecciona Range("A5:A1000")
25     Apaga dados da seleção
26     Selecciona Range("C5:M1000")
27     Apaga dados da seleção
28     Selecciona Range("W5:AH1000")
29     Apaga dados da seleção
30     Selecciona Range("AM5:AX20")
31     Apaga dados da seleção
32
33     Selecciona todas as células da planilha "ANÁLISE"
34     Organiza a largura das colunas
35     Selecciona ("A1")
36
```

```
37 # Definição do loop de cada subiteração
38
39 Fazer até que a planilha "ANÁLISE" célula (34, 16) seja maior que a
    planilha "ANÁLISE" célula(33, 16)
40 % Definição do "Do Until" loop até essa condição ser verdadeira
41
42 # Apagar o auxílio de cálculo anterior
43 % Etapa necessária para realizar os cálculos de queda de tensão da
    próxima subiteração, com base no valor de queda de tensão no
    ponto de conexão.
44
45     Selecionar planilha ("ANÁLISE")
46     Selecciona Range("AM6:AX20")
47     Apagar dados da seleção
48
49 # Definição do primeiro Design com suas variáveis
50
51 %_____Definição randômica do sistema de design inicial
52
53     % 0,00 a 0,25 = Individual
54     % 0,26 a 0,50 = Radial
55     % 0,51 a 0,75 = Dendrítica Dicotômica
56     % 0,76 a 1,00 = Dendrítica Quadruplicada
57
58     Declarar DESIGN é duplo
59     Declarar TIPO_DESIGN é uma variável
60
61     DESIGN = Rnd()
62     Planilha "ANÁLISE" célula (2, 15) = DESIGN
63     Selecciona Range ("O5")
64     Ativa formula = "=VLOOKUP(R[-3]C,R2C16:R5C18,3,2) "
65
66 %_____Definição randômica do sistema de quantidade de
    clientes
67
68     % 0,00 a 0,25 = 1
69     % 0,26 a 0,50 = 2
70     % 0,51 a 0,75 = 3
71     % 0,76 a 1,00 = 4
72
73     Declarar CLIENTES é duplo
74     Declarar QTDE_CLIENTES é uma variável
```

```
75
76     CLIENTES = Rnd()
77     Planilha "ANÁLISE" célula (8, 15) = CLIENTES
78     Selecciona ("O11")
79     Ativa formula = "=VLOOKUP(R[-3]C,R8C16:R11C18,3,2)"
80
81     %_____Definição randômica do sistema do ponto de conexão do
      novo design
82
83         % 0,00 a 0,20 = A
84         % 0,21 a 0,40 = B
85         % 0,41 a 0,60 = C
86         % 0,61 a 0,80 = D
87         % 0,81 a 1,00 = GERAÇÃO
88
89     Declarar CONEXÃO é duplo
90     Declarar PONTO_CONEXÃO é uma variável
91
92     CONEXÃO = Rnd()
93     Planilha "ANÁLISE" célula (14, 15) = CONEXÃO
94     Selecciona ("O17")
95     Ativa formula = "=VLOOKUP(R[-3]C,R14C16:R18C18,3,2)"
96
97     %_____Definição randômica do sistema do tipo de cabo a ser
      utilizado
98
99         % 0,00 a 0,33 = 3P120 (A70)
100        % 0,34 a 0,66 = 3P70 (A70)
101        % 0,67 a 1,00 = 3P50 (A50)
102
103     Declarar CABO é duplo
104     Declarar PONTO_CABO é uma variável
105
106     CABO = Rnd()
107     Planilha "ANÁLISE" célula (21, 15) = CABO
108     Selecciona ("O24")
109     Ativa formula = "=VLOOKUP(R[-3]C,R21C16:R23C18,3,2)"
110
111     %_____Definição randômica do sistema da distância entre os
      clientes
112
113         % 0,00 a 0,33 = 100 m
```

```
114      % 0,34 a 0,66 = 150 m
115      % 0,67 a 1,00 = 200 m
116
117      Declarar DISTANCIA é duplo
118      Declarar PONTO_DISTANCIA é uma variável
119
120      DISTANCIA = Rnd()
121      Planilha "ANÁLISE" célula (27, 15) = DISTANCIA
122      Selecciona ("O30")
123      Ativa formula = "=VLOOKUP(R[-3]C,R27C16:R29C18,3,2)"
124
125      Selecciona ("A1")
126
127      % Registrar o design inicial e quantidade de clientes do
128      design inicial
129
130      Planilha "ANÁLISE" célula (4, 21) = Planilha "ANÁLISE" célula
131      (5, 3)
132      Planilha "ANÁLISE" célula (5, 21) = Planilha "ANÁLISE" célula
133      (11, 15)
134
135      % Selecionar o primeiro design, caso ainda não tenha sido
136      gerado. Caso contrário, seguir com seleção posterior
137
138      Se Planilha "ANÁLISE" célula (1, 21) for menor que 5 então
139
140      # Realizar a primeira seleção
141
142      %_____Individual
143
144      Se planilha "ANÁLISE" célula (5, 15) = "Individual"
145      então
146
147      Ativar planilha ("PADRÃO_VBA")
148      Selecciona Range (Planilha "PADRÃO VBA" célula (5,
149      1), Planilha "PADRÃO VBA" célula (Planilha "ANÁ
150      LISE" célula (11, 15) + 4, 11))
151      Copia seleção
152
153      Conclui Se
154
155      %_____Radial
```

```
149
150     Se planilha "ANÁLISE" célula (5, 15) = "Radial" então
151
152         Ativar planilha ("PADRÃO_VBA")
153         Selecciona Range (Planilha "PADRÃO VBA" célula (10,
           1), Planilha "PADRÃO VBA" célula (Planilha "AN
           ÁLISE" célula (11, 15) + 9, 11))
154         Copia seleção
155
156     Conclui Se
157
158     %_____Dendrítica Dicotômica
159
160     Se planilha "ANÁLISE" célula (5, 15) = "Dendrítica
           Dicotômica" então
161
162         Declarar VARIACAO é variável
163         % Definição da quantidade de linhas de análise
164
165         Se planilha "ANÁLISE" célula (11, 15) = 1 então
166             VARIACAO = 2 + 14
167         Conclui Se
168
169         Se planilha "ANÁLISE" célula (11, 15) = 2 então
170             VARIACAO = 3 + 14
171         Conclui Se
172
173         Se planilha "ANÁLISE" célula (11, 15) = 3 então
174             VARIACAO = 5 + 14
175         Conclui Se
176
177         Se planilha "ANÁLISE" célula (11, 15) = 4 então
178             VARIACAO = 6 + 14
179         Conclui Se
180
181         Ativar planilha ("PADRÃO_VBA")
182         Selecciona Range (Planilha "PADRÃO VBA" célula
           (15, 1), Planilha "PADRÃO VBA" célula (
           Planilha "ANÁLISE" célula (11, 20) +
           VARIACAO, 11))
183         Copia seleção
184
```

```
185 Conclui Se
186
187 %_____Dendrítica Quadruplicada
188
189 Se planilha "ANÁLISE" célula (5, 15) = "Dendrítica
190 Quadruplicada" então
191
192 Declarar VARIACAO1 é variável
193 % Definição da quantidade de linhas de análise
194
195 Se planilha "ANÁLISE" célula (11, 15) = 1 então
196     VARIACAO1 = 2 + 21
197 Conclui Se
198
199 Se planilha "ANÁLISE" célula (11, 15) = 2 então
200     VARIACAO1 = 3 + 21
201 Conclui Se
202
203 Se planilha "ANÁLISE" célula (11, 15) = 3 então
204     VARIACAO1 = 5 + 21
205 Conclui Se
206
207 Se planilha "ANÁLISE" célula (11, 15) = 4 então
208     VARIACAO1 = 6 + 21
209 Conclui Se
210
211 Ativar planilha ("PADRÃO_VBA")
212 Seleciona Range (Planilha "PADRÃO VBA" célula
213     (22, 1), Planilha "PADRÃO VBA" célula (
214     Planilha "ANÁLISE" célula (11, 25) +
215     VARIACAO1, 11))
216 Copia seleção
217
218 Conclui Se
219
220 % Colar o resultado
221
222 Ativar planilha ("ANÁLISE")
223 Planilha "ANÁLISE" célula (Planilha "ANÁLISE" cé
224     lula (1, 21), 3)
225 Colar especial
226
```

```
222     Ou Se
223     % Caso não seja a primeira seleção
224
225         # Realizar a seleção posterior
226
227         %_____Individual
228
229         Se planilha "ANÁLISE" célula (5, 15) = "Individual"
230             então
231
232                 Ativar planilha ("PADRÃO_VBA")
233                 Seleciona Range (Planilha "PADRÃO VBA" célula (5,
234                     1), Planilha "PADRÃO VBA" célula (planilha "ANÁ
235                     LISE" célula (11, 15) + 4, 11))
236                 Copia seleção
237
238             End If
239
240         %_____Radial
241
242         Se planilha "ANÁLISE" célula (5, 15) = "Radial" então
243             então
244
245                 Ativar planilha ("PADRÃO_VBA")
246                 Seleciona Range (Planilha "PADRÃO VBA" célula (10,
247                     1), Planilha "PADRÃO VBA" célula (planilha "AN
248                     ÁLISE" célula (11, 15) + 9, 11))
249                 Copia seleção
250
251             End If
252
253         %_____Dendrítica Dicotômica
254
255         Se planilha "ANÁLISE" célula (5, 15) = "Dendrítica
256         Dicotômica" então
257
258             Declarar VARIACAO é variável
259             % Definição da quantidade de linhas de análise
260
261             Se planilha "ANÁLISE" célula (11, 15) = 1 então
262                 VARIACAO = 2 + 14
263             Conclui Se
```

```
258 Se planilha "ANÁLISE" célula (11, 15) = 2 então
259     VARIACAO = 3 + 14
260 Conclui Se
261
262 Se planilha "ANÁLISE" célula (11, 15) = 3 então
263     VARIACAO = 5 + 14
264 Conclui Se
265
266 Se planilha "ANÁLISE" célula (11, 15) = 4 então
267     VARIACAO = 6 + 14
268 Conclui Se
269
270     Ativar planilha ("PADRÃO_VBA")
271     Selecciona Range (Planilha "PADRÃO VBA" célula
272         (15, 1), Planilha "PADRÃO VBA" célula (
273             planilha "ANÁLISE" célula (11, 20) +
274                 VARIACAO, 11))
275     Copia seleção
276
277 Conclui Se
278
279 %_____Dendrítica Quadruplicada
280
281 Se planilha "ANÁLISE" célula (5, 15) = "Dendrítica
282     Quadruplicada" então
283
284     Declarar VARIACAO1 é variável
285     % Definição da quantidade de linhas de análise
286
287     Se planilha "ANÁLISE" célula (11, 15) = 1 então
288         VARIACAO1 = 2 + 21
289     Conclui Se
290
291     Se planilha "ANÁLISE" célula (11, 15) = 2 então
292         VARIACAO1 = 3 + 21
293     Conclui Se
294
295     Se planilha "ANÁLISE" célula (11, 15) = 3 então
296         VARIACAO1 = 5 + 21
297     Conclui Se
298
299     Se planilha "ANÁLISE" célula (11, 15) = 4 então
```

```
296          VARIACAO1 = 6 + 21
297          Conclui Se
298
299          Ativar planilha ("PADRÃO_VBA")
300          Selecciona Range (Planilha "PADRÃO VBA" célula
          (22, 1), Planilha "PADRÃO VBA" célula (
          planilha "ANÁLISE" célula (11, 25) +
          VARIACAO1, 11))
301          Copia seleção
302
303          Conclui Se
304
305          % Colar o resultado para auxílio de cálculo
306
307          Ativar planilha ("ANÁLISE")
308          planilha "ANÁLISE" célula (6, 40)
309          Ativar planilha e colar
310
311          % Congelar linha de subinserção para inserir o ponto
          de conexão
312
313          Ativar planilha ("ANÁLISE")
314          Selecciona Range ("U1")
315          Copia seleção
316          Selecciona Range ("AL5")
317          Cola especial
318
319          % Copiar o resultado da análise
320
321          Selecciona Range ("AN6:AX20")
322          Copia seleção
323
324          Planilha "ANÁLISE" célula (planilha "ANÁLISE" célula
          (1, 21), 3)
325          Cola especial
326
327          % Copiar o ponto de conexão
328
329          Ativa planilha ("ANÁLISE")
330          Selecciona Range ("AM5")
331          Copia seleção
332
```

```
333         Planilha "ANÁLISE" célula (planilha "ANÁLISE" célula
334             (5, 38), 1)
335         Cola especial
336     Conclui Se
337
338         %_____Definição randômica do ponto para continuação da an
339             álise
340
341         % Definição do ponto
342
343         Declarar ESCOLHA_PONTO é integral
344
345         ESCOLHA_PONTO = Int((Planilha "ANÁLISE" célula (7, 21) *
346             Rnd) + 1)
347         % definição do ponto to ao máximo dos índices
348
349         Ativar planilha ("ANÁLISE")
350
351         % Registrar iterações aleatórias
352
353         Seleciona Range (Planilha "ANÁLISE" célula (ESCOLHA_PONTO
354             + 4, 2), Planilha "ANÁLISE" célula (ESCOLHA_PONTO + 4,
355             13))
356         Copiar seleção
357
358         Seleciona Range (Planilha "ANÁLISE" célula (Planilha "ANÁ
359             LISE" célula (1, 37), 23), Planilha "ANÁLISE" célula (
360             Planilha "ANÁLISE" célula (1, 37), 34))
361         Colar especial
362
363         % Auxílio para Cálculo
364
365         Seleciona Range (Planilha "ANÁLISE" célula (ESCOLHA_PONTO
366             + 4, 2), Planilha "ANÁLISE" célula (ESCOLHA_PONTO + 4,
367             13))
368         Copiar seleção
369
370         Seleciona Range ("AM5:AX5")
371         Colar especial
372
373         Seleciona Range ("A1")
```

```
366
367 Loop
368 % Conclusão de 01 iteração no caso da condição do Fazer até ("Do Until
    ") ser verdadeira
369
370 % Limpar resultados de queda de tensão superior a queda de tensão má
    xima, para concluir processo
371
372 # Rotina para a limpeza da queda de tensão superior
373
374 # Definição de laço for
375
376 Iniciar em i = 5 para planilha "ANÁLISE" célula (1, 21) - 1
377
378 Se planilha "ANÁLISE" célula (i, 14) = 1 então
379
380     Selecciona Range (planilha "ANÁLISE" célula (i, 3),
        planilha "ANÁLISE" célula (i, 13))
381     Apaga valores da seleção
382
383     Conclui Se
384
385     Próximo
386
387 % Copiar resultado para composição de gráficos
388
389     Selecciona Range ("P33:P43")
390     Copiar seleção
391
392     Ativar planilha ("Resultados")
393
394     Selecciona Range (planilha "Resultados" célula (4, planilha "
        Resultados" célula (2, 1)), planilha "Resultados" célula (4,
        planilha "Resultados" célula (2, 1)))
395     Colar especial
396
397     Selecciona Range("A3")
398
399 % Copiar a configuração realizada, salvando a iteração completa em
    novo arquivo
400
401     Declarar PASTA é uma variável
```

```
402         Declarar ARQUIVO é uma variável
403
404         PASTA = planilha "Info" célula (1, 2)
405         ARQUIVO = PASTA & "Int. " & i & ".xls"
406         % definição de formato Excel
407
408         Ativar planilha ("ANÁLISE")
409         Copiar planilha ("ANÁLISE")
410
411         Salvar arquivo com o nome:=ARQUIVO, no formato:=
            xlOpenXMLWorkbook
412
413         Ativar e Fechar arquivo
414
415         % Retornar planilha de cálculos das iterações
416
417         Ativar planilha("ANÁLISE")
418         Selecionar todas as células
419         Configurar largura das colunas
420         Selecciona Range ("A1")
421
422 Próximo
423 % Realizado todas as subiterações, concluindo e salvando a iteração, segue
            para a próxima iteração. Portanto, este processo até este ponto foi
            realizado 2.000 vezes.
424
425 # Registrar horário final do processo realizado, após todas as iterações
426
427     Ativa a planilha ("Info")
428     Selecciona("A7")
429     Ativa formula = "=NOW()"
430     Selecciona("A7")
431     Copia seleção
432     Cola seleção (especial)
433     Conclui função
434
435 % Salvar arquivo
436
437     Ativar planilha ("ANÁLISE")
438     Selecciona Range("A1")
439
440     Ativar o Workbook/Arquivo e salvar
```

```
441  
442 Fim do Algoritmo PROCESSO()  
443  
444 ##### Final do Processo
```