



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

VANTAGENS E DESVANTAGENS DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E ESTUDO DE CASO DE UM SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE ELÉTRICA

Denise Tieko Naruto

Projeto de Graduação apresentado ao
Curso de Engenharia Elétrica da Escola
Politécnica, Universidade Federal do
Rio de Janeiro, como parte dos
requisitos necessários à obtenção do
título de Engenheiro.

Orientador: Sebastião Ércules Melo de
Oliveira, D.Sc.

Rio de Janeiro
Janeiro de 2017

VANTAGENS E DESVANTAGENS DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E
ESTUDO DE CASO DE UM SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO
CONECTADO À REDE ELÉTRICA

Denise Tieko Naruto

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO
ELETRICISTA.

Examinado por:

Prof. Sebastião Ércules Melo de Oliveira, D.Sc.

Prof. Sergio Sami Hazan, Ph.D.

Prof. Oumar Diene, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

JANEIRO DE 2017

Naruto, Denise Tieko

Vantagens e Desvantagens da Geração Distribuída e Estudo de Caso de um Sistema Solar Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica/Denise Tieko
Naruto – Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2017.

XIII, 73 p.: il.: 29,7cm.

Orientador: Sebastião Ércules Melo de Oliveira, D.Sc.

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/Curso de Engenharia Elétrica, 2017.

Referência Bibliográficas: p. 77-84

1. Geração distribuída. 2. Energia solar fotovoltaica 3. Vantagens e Desvantagens. I. Oliveira, Sebastião Ércules Melo II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Elétrica. III. Título.

Agradecimentos

À sociedade brasileira pela oportunidade de estudar em uma universidade pública com ensino gratuito e de qualidade.

Ao Programa Fomento à Formação de Recursos Humanos em Engenharia Elétrica por meio da criação do PRH-PB 219 da PETROBRAS.

Aos professores e funcionários da Universidade Federal do Rio de Janeiro por se dedicarem à universidade e aos estudantes.

Aos meus familiares pelo exemplo, apoio e confiança.

Aos meus amigos pela presença e apoio.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista

**VANTAGENS E DESVANTAGENS DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E ESTUDO
DE CASO DE UM SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO CONECTADO À
REDE ELÉTRICA**

Denise Tieko Naruto

Janeiro/2017

Orientador: Sebastião Ércules Melo de Oliveira

Curso: Engenharia Elétrica

O potencial e crescimento acelerado da geração distribuída no Brasil e no mundo provocaram inúmeras discussões com relação aos seus benefícios e impactos na sociedade e no sistema elétrico convencional. Com isso, para que a geração distribuída consiga se desenvolver de maneira aceitável, é necessária a realização de pesquisas a fim de possibilitar o seu desenvolvimento de forma otimizada, economicamente viável e eficiente.

O objetivo deste trabalho é apresentar um estudo contextualizado sobre a geração distribuída, englobando, principalmente, os seus impactos na rede elétrica e na sociedade em geral, incluindo não somente aspectos técnicos referentes ao sistema elétrico, como também econômicos, políticos e sociais. Dessa forma, o trabalho apresenta definições, referências e indicadores sobre o assunto e por fim, um estudo de caso de um sistema de minigeração fotovoltaico conectado à rede elétrica da distribuidora de energia local, como exemplo prático para o sistema de geração distribuída de maior aplicação no cenário atual.

Palavras-chave: *Geração distribuída, vantagens e desvantagens, sistema fotovoltaico.*

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/ UFRJ as a partial fulfillment of
the requirements for the degree of Electrical Engineer

**ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF DISTRIBUTED GENERATION
AND CASE STUDY OF A SOLAR PHOTOVOLTAIC SYSTEM CONNECTED
TO THE GRID**

Denise Tieko Naruto

January/2017

Advisor: Sebastião Ércules Melo de Oliveira

Course: Electrical Engineering

The potential and accelerated growth of distributed generation in Brazil and in the world caused numerous discussions regarding their benefits and their impacts in society and in the conventional electric power system. Thus, for distributed generation to be able to develop in a tolerable way, it is necessary to conduct research and its dissemination to enable an optimized, economically viable and efficient development.

The objective of this work is to present a contextualized study on distributed generation, regarding its impacts on the electricity grid and society in general, including not only technical aspects, but also economic, political and social subjects. In this way, this work presents definitions, references and indicators about distributed generation and, finally, it shows a case study of a photovoltaic minigeneration system connected to the grid of the local energy utility, as a practical example for the currently most common distributed generation system in the world.

Key words: *Distributed generation, advantages and disadvantages, photovoltaic system.*

Sumário

Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas.....	xi
Lista de Equações.....	xii
1. Introdução.....	1
1.1. Motivação	1
1.2. Objetivo e Estrutura dos Capítulos	1
1.3. Breve Histórico	3
2. Fundamentos Teóricos	7
2.1. Geração Distribuída	7
2.2. Energia Solar Fotovoltaica.....	9
3. Estudo das Vantagens e Desvantagens.....	12
3.1. Vantagens.....	12
3.1.1. Vantagens Econômicas	13
3.1.1.1. Consumidor Final	13
3.1.1.2. Incentivo Fiscal	15
3.1.1.3. Custo das Falhas Técnicas da Rede.....	15
3.1.1.4. Área Ocupada	15
3.1.1.5. Sistema de Compensação de Energia (ou Net Metering)	17
3.1.1.6. Redução nos Custos da Geração, Transmissão e Distribuição.....	18
3.1.2. Vantagens Políticas	20
3.1.3. Vantagens Sociais	22
3.1.3.1. Minimização dos impactos no entorno.....	22
3.1.3.2. Minimização das desapropriações	23
3.1.3.3. Aumento da qualidade na saúde	23
3.1.3.4. Geração de Emprego	23
3.1.3.5. Alcance da Energia em Áreas remotas	24
3.1.4. Vantagens Técnicas.....	26
3.1.4.1. Reduzir o Fornecimento de Energia da Rede durante os Picos de Carga.....	27
3.1.4.2. Diminuição das Perdas no Sistema Elétrico	28
3.1.4.3. Diminuição das Faltas do Sistema de Transmissão.....	29
3.1.4.4. Compensação de Reativo.....	30
3.1.4.5. Sobretensão.....	32

3.1.4.6.	Controle da Rede	33
3.1.4.7.	Microrredes.....	36
3.2.	Desvantagens	38
3.2.1.	Desvantagens Econômicas	40
3.2.1.1.	Custos de Distribuição.....	40
3.2.1.2.	Custos de Operação	40
3.2.1.3.	Custos na Geração	41
3.2.1.4.	Custos da Rede Inteligente	41
3.2.2.	Desvantagens Políticas	43
3.2.3.	Desvantagens Técnicas	43
3.2.3.1.	Alteração dos Procedimentos de Rede	44
3.2.3.2.	Sistema de Proteção.....	46
3.2.3.2.1.	Fluxo de Potência Reverso	46
3.2.3.2.2.	Coordenação e Seletividade.....	47
3.2.3.2.3.	Ilhamento	48
3.2.3.2.4.	Correntes Desbalanceadas e de Curto-Circuito	49
3.2.3.3.	Controle de Tensão e Frequência	50
3.2.3.3.1.	Flutuação da Geração.....	50
3.2.3.3.2.	Sobretensão	52
3.2.3.4.	Harmônicos.....	52
3.2.3.5.	Potência Reativa	55
3.2.3.6.	Sincronismo	57
4.	Estudo de Caso: Geração Distribuída Solar Fotovoltaica	59
4.1.	Local de Instalação	59
4.2.	Características Gerais	60
4.2.1.	Irradiação Solar	60
4.2.2.	Geração Solar Estimada	63
4.2.3.	Fator de Capacidade	65
4.3.	Equipamentos Principais.....	66
4.3.1.	Módulo Fotovoltaico	66
4.3.2.	Inversor Fotovoltaico Grid-Tie	67
4.4.	Conexão Elétrica.....	69
4.5.	Proteção	72
4.6.	Diagrama Unifilar	73
5.	Conclusão	75

Referências Bibliográficas.....	77
---------------------------------	----

Lista de Figuras

Figura 1 - Consumo mundial de energia entre 1800 e 2010 [1].....	4
Figura 2 - Elementos poluentes na atmosfera e suas origens [2].....	5
Figura 3 - Detalhe de um Célula Fotovoltaica de Silício Monocristalino [7]	10
Figura 4 – Detalhe de uma Célula Fotovoltaica de Silício Policristalino [7]	10
Figura 5 - Preço das células fotovoltaicas cristalinas, [8]	14
Figura 6 - Custo relativo da área rural e próxima às áreas urbanas, 2011 [9]	16
Figura 7 - Cobertura de estacionamento utilizando módulos fotovoltaicos, Rutgers University, 8MWp, New Jersey, Estados Unidos, 2013 [10].....	16
Figura 8 - Prédio com sistema solar integrado na cobertura, Gutleutviertel, Frankfurt, Alemanha, 2015 [11]	17
Figura 9 - Telha composta por células fotovoltaicas, Estados Unidos, 2016 [12]	17
Figura 10 - Custo das Linhas de Transmissão x Aumento da Demanda Energética, [14]	19
Figura 11 - Sistema Interligado Nacional do Brasil, ONS	20
Figura 12 - Evolução temporal do PIB e do consumo energético no Brasil [16].....	21
Figura 13 - Sistema Híbrido Fotovoltaico-Eólico instalado no Maranhão como parte do Programa Luz para Todos, 2011 [23]	26
Figura 14 - Unidade consumidora atendida pelo sistema híbrido solar-eólico no Maranhão como parte do Programa Luz para Todos, 2011 [23]	26
Figura 15 - Demandas Instantâneas Máximas (MW), 2015, ONS [24]	27
Figura 16 - Consumo faturado pelo medidor da Unidade Consumidora com gerador fotovoltaico produzindo potência ativa e reativa capacitiva [27].....	31
Figura 17 - Potência Ativa e Reativa entregues pelo inversor de um sistema de geração distribuída fotovoltaico à rede elétrica [29].....	32
Figura 18 - Comportamento do perfil de tensão em um ramal com e sem geração distribuída, [31]	33
Figura 19 - Divisão dos trabalhos do subgrupo para microgeração distribuída [33]	35
Figura 20 - Número de conexões de Micro e Mini Geradores Distribuídos, ANEEL, 2016 [30]	36
Figura 21 – Arquitetura de Microrrede Tipo 1 [36]	37
Figura 22 - Arquitetura de Microrrede Tipo 2 [36]	37

Figura 23 - Radiação solar recebida por uma geração fotovoltaica (superior) e por um sistema composto por 20 gerações fotovoltaicas (inferior), 2009 [39]	51
Figura 24 - Topologia DFIG de um gerador eólico [51]	54
Figura 25 - Topologia Full Converter de um gerador eólico [42]	54
Figura 26 - Variação da Potência aparente, reativa, fator de potência e economia gerada por um sistema fotovoltaico de 30 kW na Alemanha [28]	56
Figura 27 - Local da Subestação da Ilha do Fundão e do Sistema Fotovoltaico Hipotético	60
Figura 28 - Localização das estações de medição de dados climatológico [48]	61
Figura 29 - Atlas Solarimétrico do Brasil [48]	61
Figura 30 - Irradiação Solar Diária Média Mensal no Rio de Janeiro para uma inclinação de 23°, [49]	63
Figura 31 - Geração Solar Estimada do Projeto Fotovoltaico no Estudo de Caso	64
Figura 32 - Módulo Fotovoltaico de Silício Monocristalino de 72 Células Fotovoltaicas, [53]	67
Figura 33 - Algoritmo para operação do MPPT no inversor grid-tie, MatLAB [54]	68
Figura 34 - Diagrama Unifilar do Sistema Fotovoltaico de 408 kWp	74

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Eficiência das células e módulos fotovoltaicos, 2014 [5].	10
Tabela 2 - Demanda Instantânea Máxima (MW), 2015, ONS [24]	28
Tabela 3 - Cenários de investimentos para implantação das redes inteligentes no Brasil [47].	42
Tabela 4 – Limites individuais em porcentagem da tensão fundamental [43]	54
Tabela 5 - Irradiação Solar Diária Média Mensal no Rio de Janeiro para uma inclinação de 23°, dados retirados de [49]	62
Tabela 6 - Geração Solar Estimada Mensal (kWh)	63
Tabela 7 - Características do Módulo Fotovoltaico.....	66
Tabela 8 - Características do Inversor Grid-Tie	68
Tabela 9 - Conexão em Série e em Paralelo dos Módulos Fotovoltaicos para cada Inversor.....	70

Lista de Equações

Equação 1 – Equação de movimento.....	38
Equação 2 - Geração Solar Estimada (kWh).....	63
Equação 3 - Fator de Capacidade	65
Equação 4 - Fator de Capacidade do Sistema Fotovoltaico do Estudo de Caso	66
Equação 5 - Tensão em Circuito Aberto para uma Temperatura T.....	70
Equação 6 - Corrente em Curto-Circuito para uma Temperatura T.....	71
Equação 7 - Dimensionamento do Fusível.....	72
Equação 8 - Dimensionamento da Chave Seccionadora	72
Equação 9 - Dimensionamento do Disjuntor.....	73

Capítulo 1

Introdução

1.1. Motivação

A energia elétrica pode ser considerada um dos pilares mais importante para o desenvolvimento técnico, econômico, político e social do mundo atual. É por meio dela que temos acesso à iluminação, transporte coletivo, proteção térmica e higiene, além de permitir o estabelecimento de infraestrutura e fixação da produção nas indústrias, centros de pesquisa e meios de comunicação. Por fim, contribui ainda para a disseminação da informação e aquisição do conhecimento.

Para que esse desenvolvimento seja viável, é necessário que haja uma união entre a evolução tecnológica e as políticas governamentais para que, assim, o fornecimento de energia elétrica seja alcançável ao maior número possível de pessoas. Logo, o sistema elétrico necessita ser o mais eficiente, seguro, confiável, estável e previsível a fim de reduzir os impactos negativos e proliferar as oportunidades para a sociedade e para as gerações futuras que serão diretamente dependentes dessa evolução e do progresso energético vigente.

O sistema elétrico consolidado mundialmente é caracterizado pelas parcelas de geração, transmissão, distribuição e consumo. Entretanto, atualmente, podemos verificar mudanças significativas nessa topologia devido ao ingresso e rápida expansão da geração distribuída no mesmo. Quais são os impactos desse novo modelo no sistema elétrico atual, quais são os procedimentos necessários para a sua inserção e o que deve ser realizado agora e planejado para o futuro com o objetivo de prevenir os impactos negativos e explorar os benefícios ao sistema elétrico e, principalmente, à população? Essas perguntas são básicas, mas cruciais para que o momento de transição no qual estamos vivenciando seja utilizado de forma consciente para permitir que todos os caminhos possíveis sejam analisados e explorados nesse novo conceito do sistema elétrico que não deve ser subestimado.

1.2. Objetivo e Estrutura dos Capítulos

Este trabalho tem como objetivo apresentar o cenário atual da geração distribuída e os desafios presentes e futuros, tendo como referência o sistema elétrico convencional. Neste documento, é feita referência aos acontecimentos que antecederam a origem da geração distribuída e sua massificação prevista, além de apresentado um estudo sobre suas características principais, incluindo definição, benefícios e desafios.

Além disso, ao final são apresentados resultados de um estudo de caso abrangendo um sistema de minigeração distribuída que processa energia considerada renovável, neste caso a energia solar fotovoltaica.

Neste documento, os principais aspectos à geração distribuída são apresentados e organizados em capítulos, da seguinte forma:

- O capítulo 1 faz referência à motivação principal, ao objetivo e à organização do trabalho a fim de sistematizar os assuntos são tratados no documento. Ademais, é apresentado um breve histórico da geração distribuída e da energia solar fotovoltaica no mundo e no Brasil;
- O capítulo 2 estabelece os fundamentos teóricos envolvidos na geração distribuída e na geração solar fotovoltaica conectada à rede elétrica;
- O capítulo 3 apresenta o estado da arte com menção às vantagens e às desvantagens para inclusão e maximização da geração distribuída no sistema elétrico convencional, incluindo aspectos econômicos, sociais, políticos e principalmente técnicos;
- O capítulo 4 descreve um estudo de caso de dimensionamento de um sistema solar fotovoltaico conectado à rede elétrica, como exemplo do tipo de sistema de geração distribuída mais frequentemente encontrado no panorama atual e mundial.
- Por fim, o capítulo 5 apresenta as considerações finais sobre os assuntos tratados anteriormente na descrição do trabalho realizado;

Com isso, espera-se que sejam adquiridos conhecimentos não só introdutórios, como também contextualizados, atuais, confiáveis e principalmente imparciais com relação às muitas discussões sobre a utilização da geração distribuída no presente e futuro do sistema elétrico convencional. Esse estudo destina-se às pessoas interessadas em um âmbito geral, mas não superficial do assunto. Com este trabalho, almeja-se incentivar a busca por mais aprendizado associados aos desafios futuros nas áreas de geração distribuída e sistema solar fotovoltaico.

Os resultados do estudo apresentado no trabalho foram extraídos de referências normalmente encontradas e publicadas na literatura. Entretanto, a seleção do material aqui estudado é única e integrada de forma original.

1.3. Breve Histórico

A geração distribuída não é novidade no setor elétrico. Antigamente, a demanda energética era consideravelmente inferior aos parâmetros atuais e não havia a necessidade de construir grandes usinas geradoras. Por isso, antes mesmo do século XX, a geração era feita apenas para suprir a demanda energética local e a geração distribuída era majoritária.

Porém, ao longo dos anos, a partir da década de 40, o desenvolvimento global e o crescimento populacional aumentaram a demanda energética mundial e motivaram a expansão das grandes usinas geradoras, alinhada com a disseminação dos centros urbanos que encareciam os espaços disponíveis e inviabilizavam grandes projetos próximo ao consumo.

Ademais, a evolução tecnológica de grandes equipamentos de geração como turbinas hidráulicas e as máquinas síncronas, juntamente com as vantagens encontradas para uma operação centralizada e interligada contribuíram para o fortalecimento e para a consolidação das usinas de energia como geradoras predominantes do setor elétrico.

Nesta época, com o crescimento das aplicações em corrente alternada e, conseqüentemente, com o avanço das pesquisas com transformadores, a corrente alternada superou as limitações em comparação com a corrente contínua relacionadas ao transporte de energia e manutenção. Assim, durante os anos de 1900 até 1960, o advento das tecnologias utilizando transmissão em corrente alternada em extra-alta-tensão resultaram na possibilidade de transportar energia por longas distâncias sem que houvessem perdas significativas na geração e na transmissão.

Na Figura 1 é apresentado um gráfico com o consumo energético mundial entre os anos de 1800 e 2010. Neste gráfico, é possível verificar a rápida expansão do consumo energético a partir de 1940 até 2010, impossibilitando a geração local para atender essa elevada demanda energética e com isso, provocando a disseminação das construções das usinas centralizadas.

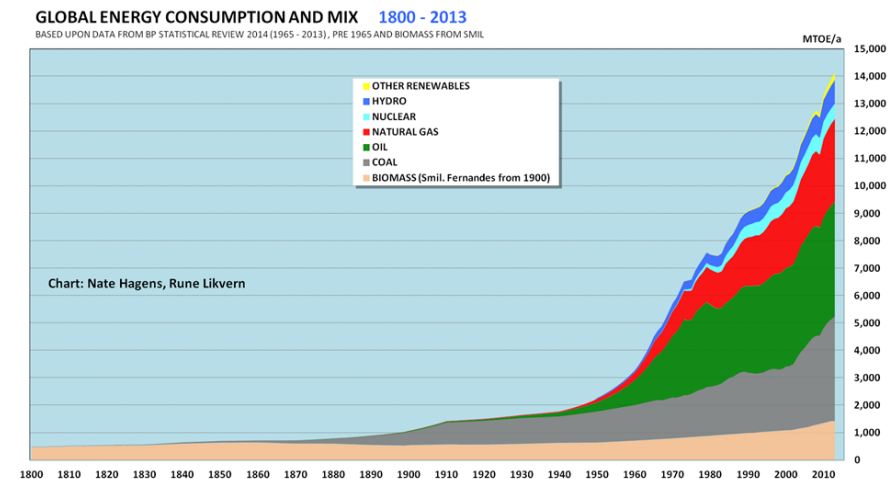


Figura 1 - Consumo mundial de energia entre 1800 e 2010 [1]

Após décadas de consolidação das usinas centralizadas de geração de energia, foi observada, a aparição da geração distribuída como alternativa renovável para substituir ou complementar a produção de energia mundial devido, principalmente, às pressões ambientais relacionadas às emissões dos gases poluentes na atmosfera, originárias, em sua maioria, de grandes usinas geradoras e dos grandes consumidores industriais.

Inicialmente, a preocupação ambiental surgiu formalmente na Conferência das Nações Unidas realizada em Estocolmo em 1972 e, a partir desse evento, o meio ambiente passou a figurar como símbolo permanente e determinante nas discussões e promulgações de normas que regem nossa sociedade até os dias atuais.

De acordo com o último relatório especial da Agência Internacional de Energia (IEA), publicado em 2016 [2], seis milhões e meio de pessoas morreram no mundo em decorrência da poluição no ar. Na Figura 2 retirada do relatório referido, é possível verificar que uma parcela significativa do elemento tóxico existente na atmosfera, o dióxido sulfúrico, é proveniente da geração de energia por combustíveis fósseis como o carvão natural, o óleo, a biomassa e os resíduos. Além disso, a maior parcela é proveniente da queima de combustíveis fósseis por parte da indústria que, por sua vez, é extremamente dependente de energia elétrica.

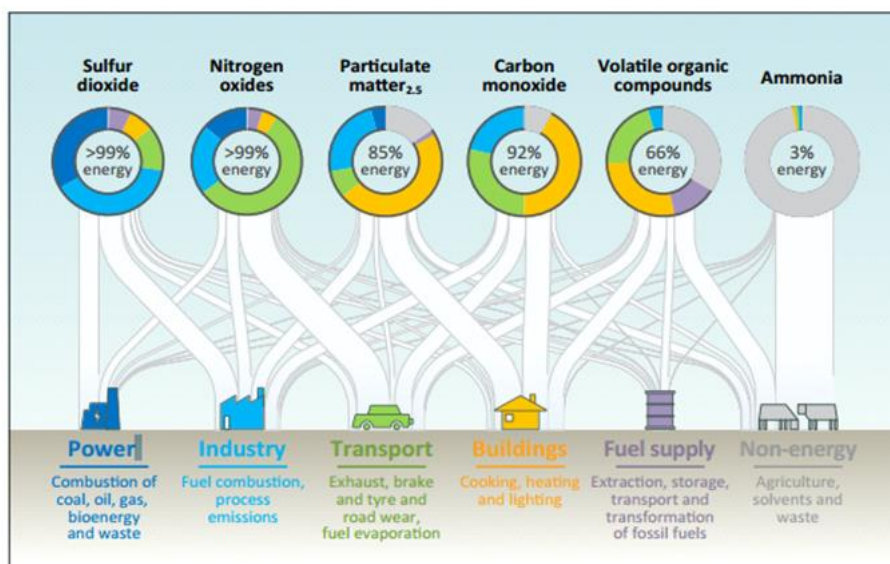


Figura 2 - Elementos poluentes na atmosfera e suas origens [2]

A geração distribuída associada à energia renovável foi uma maneira encontrada pelos investidores, empresários e governantes para minimizar a pressão ambientalista e atender o elevado consumo energético mundial sempre crescente. Dessa forma, o principal fator impulsionador da geração distribuída foi a possibilidade de gerar energia elétrica através de fontes renováveis como a eólica e a solar e, adicionalmente, reaproximar a geração do seu consumidor final, principalmente nas áreas industrial e comercial, onde estão localizados os maiores volumes de carga e produção de gases tóxicos ao meio ambiente.

Assim, para atender uma demanda mundial cada vez maior, as preocupações ambientais, o lixo radioativo e os alagamentos, pressionaram os órgãos governamentais e os investidores a seguirem uma direção sustentável de forma a limitar o crescimento da geração de energia por combustíveis fósseis e por outras fontes tidas, anteriormente, como renováveis ou mais confiáveis, como é o caso da geração proveniente das hidrelétricas e da energia nuclear, respectivamente.

Um exemplo dessa migração das fontes de energia usuais para fontes renováveis é, de acordo com IEA (2016), a estagnação do uso do carvão mineral como fonte primária para a geração de energia desde 1989 até 2014, mesmo com o aumento considerável da demanda mundial e do crescimento populacional.

Entretanto, todos esses aspectos políticos, econômicos e socioambientais devem ser também comparados com os aspectos técnicos, visto que a energia elétrica deve ser entregue aos seus consumidores finais na forma mais confiável e estável possível e isso

só é alcançado, essencialmente, com planejamento, melhoramentos técnicos e procedimentos de rede criados de forma uniforme, exata e segura.

É necessária ponderação para a absorção de novidades no setor elétrico de forma a prevenir medidas corretivas que poderiam ter sido estabelecidas anteriormente e, ao mesmo tempo, é fundamental que existam investimentos nesses novos ramos, incluindo nos estudos da inserção da geração distribuída no sistema elétrico, a fim de acompanhar o desenvolvimento e a competitividade tecnológica mundial.

Com isso, poderemos afirmar de maneira imparcial e consistente quais são os melhores caminhos para serem investidos e pesquisados no setor de energia. Em adição, é possível indicar que fontes de energia deverão participar da matriz energética tanto do ponto de vista técnico, como também, político, social, econômico e ambiental. Dessa maneira, poderemos diminuir os impactos negativos e aumentar os benefícios da geração distribuída não apenas para a operação do sistema elétrico, mas também e principalmente, do ponto de vista das demandas exigidas pela sociedade em geral.

Capítulo 2

Fundamentos Teóricos

2.1. Geração Distribuída

Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA), [2], geração distribuída é definida como a produção de energia localizada próxima à unidade consumidora, independente do seu tamanho e proveniente das tecnologias das células fósseis, da energia eólica e da energia fotovoltaica. Com isso, esse tipo de geração é desvinculado da necessidade de linhas de transmissão em altos níveis de tensão para o transporte de energia aos centros consumidores e é constituída pelas parcelas de geração, distribuição e consumo ou até mesmo somente pelas parcelas de geração e consumo.

Existem dois tipos de operação relacionados à geração distribuída. Primeiramente, temos a geração que atende à carga em paralelo com o sistema elétrico, denominado *grid-tie*, e temos o sistema isolado da rede elétrica, denominado *off-grid*.

Atualmente, é nítido o crescente interesse no setor da geração distribuída pelas partes governamentais e, conseqüentemente, pelas parcelas privadas do mercado. Essa motivação é proveniente, principalmente, da pressão da população por uma matriz energética mais limpa e descentralizada, de forma a torná-la independente dos preços dos combustíveis fósseis e da sazonalidade das chuvas que, em decorrência da diminuição dos reservatórios nas usinas hidrelétricas, tornaram-se diretamente relacionadas ao preço da energia a ser paga pelo consumidor final.

Com isso, nos países onde o crescimento da geração distribuída é significativo, podemos verificar o apoio governamental constante em forma de incentivos fiscais alinhado com uma regulamentação atualizada e clara que diminui os entraves do sistema de geração distribuída à conexão com a rede elétrica. Como exemplo, temos os países com os maiores índices de geração distribuída como os Estados Unidos, o Canadá, o Japão e a Alemanha, que se utilizam do incentivo fiscal denominado *Feed In Tariff* ou *FIT* para encorajar o crescimento da geração distribuída no país.

Inicialmente, a geração distribuída foi implementada em sistemas de emergência para aumentar a independência do centro consumidor em relação às falhas do sistema elétrico e são sistemas implementados e utilizados até hoje. Esses consumidores necessitam da

energia de maneira prioritária, visto que a falta dela pode ocasionar prejuízos irreversíveis, como é o caso de unidades de emergências em hospitais. Além disso, também há o caso de indústrias que investem em sistemas próprios de reserva de energia em fábricas que operam 24h por dia e são planejadas para um determinado número de folgas não relacionadas às falhas do sistema elétrico.

Hoje em dia, as unidades de emergências são, em sua grande maioria, abastecidas por geração a diesel, pois o seu objetivo é a independência energética e não há relação com as questões ambientais. Assim, essas geradoras distribuídas a diesel possuem como desvantagem a emissão de gases poluentes na atmosfera e a dependência do preço do combustível no mercado. Ademais, diferentemente da geração distribuída crescente atualmente, esses sistemas são programados para operar apenas em situações específicas e por algumas horas por ano e, não são utilizados com o intuito de minimizar a fatura de energia.

Para esses tipos de sistemas de geração distribuída, é observado um interesse em sistemas que possuam também armazenamento energético. Um dos exemplos mais comuns é a geração solar fotovoltaica conectada à rede e acoplada a um banco de baterias proporcional. Entretanto, esse sistema ainda não é conclusivo devido às questões técnicas como a operação do sistema em ilhamento concomitantemente conectado à rede e, também, ao custo elevado de um sistema de armazenamento comparado ao sem baterias.

Por fim, sabemos que o setor elétrico possui grandes desafios e oportunidades para serem contemplados em seus planos estratégicos a curto, médio e longo prazo. Por isso, é necessário que sejam analisados com antecipação os impactos da inserção da geração distribuída na rede em diferentes cenários e dimensionamentos.

É importante que esses planejamentos estejam alinhados, não só com o crescimento da demanda, como também, com o progresso esperado para o mercado de geração distribuída e o impacto disso no sistema elétrico, de forma a justificar os novos investimentos em infraestrutura para suportar essa inserção e os retornos em forma de melhorias, minimizando os procedimentos corretivos que não foram previstos antecipadamente.

Além disso, também é preciso uma reforma regulatória com a revisão e criação de novas normas, procedimentos de rede e tarifas diferenciadas a fim de acomodar todos os tipos de geração, seja ela centralizada ou distribuída, e incluir os custos no aprimoramento e na acomodação da rede elétrica tradicional para esses novos critérios e cenários.

Hoje, o setor energético encontra-se em uma situação estratégica com a possibilidade de alterar o futuro da geração distribuída de acordo com os estudos e resultados encontrados atualmente. Entretanto, ainda há muitos aspectos para serem tratados e é fundamental que existam discussões e argumentos imparciais sobre os reais benefícios e desafios desse novo sistema elétrico e quais os impactos ao consumidor final.

2.2. Energia Solar Fotovoltaica

Hoje, os sistemas solares fotovoltaicos são a principal fonte de energia para os sistemas de geração distribuída. Entre os anos de 2015 e início de 2016, a energia solar e a energia eólica combinadas corresponderam a cerca de 77% dos novos sistemas de geração distribuída no mundo inteiro [3]. Em 2015, a geração de energia proveniente da energia solar correspondeu a 227 GW, um aumento de quase 30% em relação ao ano de 2014 com 177 GW de capacidade instalada [3]. Dessa forma, neste trabalho será tratada especialmente a geração distribuída com relação a energia solar fotovoltaica.

A expansão da energia solar fotovoltaica em sistemas de geração distribuída ocorreu devido a diversos fatores como os incentivos governamentais, a disseminação da tecnologia da célula fotovoltaica e consequentemente, a diminuição do preço dos equipamentos do sistema fotovoltaico, além da maior facilidade para a emissão de certificações ambientais necessárias às obras de geração, além do baixo custo operacional e de manutenção e, devido a sua característica modular que permite uma instalação gradual e simples. Como exemplo, até 2016, 90% da geração distribuída nos Estados Unidos era composta por sistemas solares fotovoltaicos [4].

O avanço da tecnologia fotovoltaica é relacionado à manipulação do silício, principal componente da célula fotovoltaica. O silício é um componente químico que pode ser industrializado em diversas formas como policristalino, monocristalino, amorfo, filme-fino, orgânicas e poliméricas [5].

Atualmente, a tecnologia correspondente ao silício cristalino corresponde a 85% do mercado fotovoltaico [6], devido a sua melhor eficiência e confiabilidade estabelecida em comparação às outras tecnologias. Entretanto, o aumento das pesquisas neste setor vem produzindo, a cada ano, melhorias significativas nas características dos outros tipos de células fotovoltaicas. A *Tabela 1* apresenta os rendimentos médios das células e dos módulos fotovoltaicos no ano de 2015 para diferentes tipos de tecnologias.

Tabela 1 - Eficiência das células e módulos fotovoltaicos, 2014 [5].

Materiais e/ou Tecnologias	Eficiência das Células (%)	Eficiência dos Módulos (%)
Silício Monocristalino – m-Si	14 a 25	14 a 21
Silício Policristalino – p-Si	20	13 a 16,5
Orgânicos	12	7 a 12
Filmes Finos	9 a 16	7 a 13
Silício Amorfo – a-Si	9	6 a 9
Telureto de Cádmio - CdTe	14,40	9 a 11
Seleneto de Cobre, Índio e Gálio - CIGS	22	10 a 12
Híbrido - HJT	-	23

A *Figura 3* e a *Figura 4* apresentam o detalhe de uma célula de silício monocristalino e de uma célula de silício policristalino, respectivamente. Analisando-se essas figuras, é possível visualizar as diferenças estruturais entre esses dois tipos de fabricação. Na célula composta pelo silício monocristalino, temos um único cristal de silício e na célula composta pelo silício policristalino, temos diversos cristais fundidos e solidificados para dar origem a uma única célula. Dessa maneira, a topologia do silício monocristalino possui maior eficiência em comparação à do silício policristalino, esta apresentando ainda um custo maior de fabricação.



Figura 3 - Detalhe de um Célula Fotovoltaica de Silício Monocristalino [7]



Figura 4 – Detalhe de uma Célula Fotovoltaica de Silício Policristalino [7]

O estudo de novas tecnologias fotovoltaicas além do silício cristalino é uma alternativa para substituir os processos industriais das células e módulos fotovoltaicos. Embora a energia solar fotovoltaica seja reconhecida como uma fonte limpa e tendo sua disseminação motivada, principalmente, por questões ambientais, o silício cristalino não é encontrado em sua forma nativa e, com isso, sua fabricação necessita de diversos procedimentos industriais antes de serem utilizados nas células e módulos fotovoltaicos. Esses procedimentos fabris consomem energia e liberam produtos tóxicos como o CO₂, o SO₂ e o NO_x [5].

Ademais, devido ao escasso tempo para o estudo massificado dos sistemas fotovoltaicos instalados, ainda é incerto o futuro desses materiais ao final da sua vida útil, estimado entre aproximadamente 25 e 30 anos. Ainda é emergente a prática de reciclagem ou ciclo fechado vinculado aos fabricantes das células e módulos fotovoltaicos e, com isso, presume-se que eles serão descartados em lixos convencionais e, em decomposição, poderão emitir gases tóxicos na atmosfera, assim como os componentes elétricos e eletrônicos.

Capítulo 3

Estudo das Vantagens e Desvantagens

A análise dos impactos da geração distribuída no sistema elétrico atual abrange aspectos sociais, econômicos, políticos e técnicos e, podem alternar entre consequências positivas e negativas para um mesmo cenário de acordo com o local da inserção no sistema elétrico, dos níveis de tensão dos barramentos, das condições da carga e dos circuitos interligados, da influência de outras gerações conectadas nas proximidades, etc.

Por isso, é necessário que todos os aspectos sejam verificados e estudados especificamente para os casos característicos em que foram experimentados e publicados. A considerar que o sistema elétrico é um ente complexo que reage de forma diferenciada para cada conjunto de especificações, não podendo, em hipótese alguma, ser generalizado.

Neste capítulo, são descritos resultados de alguns estudos realizados referentes aos benefícios e perturbações da geração distribuída do ponto de vista da rede elétrica convencional. Cabe ressaltar que o objetivo deste trabalho é apresentar de forma imparcial os resultados positivos e negativos de estudo para este novo tipo de geração e para os casos específicos e retratar quais são os caminhos visualizados ou almejados para solucionar estas questões que ainda hoje se encontram inconclusivas. Assim, a partir da análise e progresso das conclusões que já foram publicadas, simuladas e experimentadas, é esperado o desenvolvimento de trabalhos e implementações futuras para a evolução de um sistema elétrico adaptado ao desenvolvimento de um novo cenário energético mundial.

3.1. Vantagens

A inserção da geração distribuída foi disseminada rapidamente pelo mundo devido aos seus inúmeros impactos, vistos inicialmente como benefícios ambientais, econômicos, sociais e técnicos. Entretanto, com o aumento das pesquisas e investimentos para incremento da geração distribuída, atualmente, esses benefícios, principalmente com relação aos aspectos técnicos, se tornaram preocupantes e discutíveis.

É fato que a geração distribuída já se instalou no mundo de forma ainda minoritária, mas consolidada. Por isso, é necessário que os resultados encontrados sejam divulgados de forma clara e com especificações bem definidas, para permitir visualização rápida do desempenho dos sistemas de geração distribuída já instalados e os que ainda o serão a curto, médio e longo prazos.

Nesta seção, serão apresentados resultados dos estudos dos impactos positivos que afetam direta e indiretamente a sociedade e o desempenho do sistema elétrico convencional, incluindo as configurações futuras da rede.

Um exemplo marcante dos benefícios indiretos é o desenvolvimento do conceito de rede inteligente ou também denominada *smart-grid*. Esse conceito trata de uma nova topologia de rede que almeja monitorar e controlar remotamente os inúmeros parâmetros existentes no sistema com o único propósito de torná-lo mais resiliente, mensurável e seguro para seus operadores e consumidores.

Neste caso, a rede inteligente seria capaz de monitorar e controlar remotamente os sistemas de geração distribuída no que diz respeito ao seu efeito sobre o desempenho do sistema elétrico principal. Dessa forma, as pesquisas relacionadas a este tema vêm sendo catalisadas por se tratar de uma alternativa para a implementação futura que aumenta as vantagens e reduz as desvantagens da geração distribuída do ponto de vista do seu efeito sobre o sistema elétrico convencional. Entretanto, ainda é distante a realidade de uma rede monitorada contínua e de forma integral. Com isso, no momento atual, é necessário encontrar outras soluções e proteções considerando a operação do sistema elétrico com todas as suas características e desafios vigentes.

Dentre os benefícios analisados, serão ressaltados em separado os aspectos relacionados às vantagens econômicas, políticas, sociais e, principalmente, técnicas. Espera-se abranger de forma contextualizada o ambiente em que a geração distribuída está inserida e verificar quais aspectos que, aparentemente parecendo distintos entre si, se mostrem importantes do ponto de vista científico ou profissional.

3.1.1. Vantagens Econômicas

3.1.1.1. Consumidor Final

Do ponto de vista econômico, a geração distribuída traz vantagens evidentes para o consumidor final, principalmente para o consumidor residencial que possui um alto custo

de energia. Neste caso existe a possibilidade de redução parcial dos custos do seu gasto energético.

Com a geração distribuída, o consumidor torna-se mais independente da energia fornecida pela distribuidora e pode pagar apenas o custo mínimo obrigatório da fatura de energia, denominado no Brasil de “Custo de Disponibilidade”, e que inclui as despesas para disponibilizar energia mesmo quando o consumidor não a utiliza.

Adicionalmente, outros fatores também contribuem para a economia do consumidor final, como o incremento no custo da energia elétrica em decorrência do aumento de geração proveniente das usinas térmicas. Estes custos dependem do preço de mercado do seu combustível, e da diminuição no valor dos equipamentos utilizados, em particular para os sistemas de geração distribuída fotovoltaica. Para ilustrar essa redução dos custos, a Figura 5 apresenta um gráfico indicativo da queda de preço dos módulos fotovoltaicos nas últimas décadas. Essa queda pode ser atribuída ao advento e aperfeiçoamento da tecnologia das células fotovoltaicas e à economia de escala devido a massificação dos sistemas fotovoltaicos no mundo.

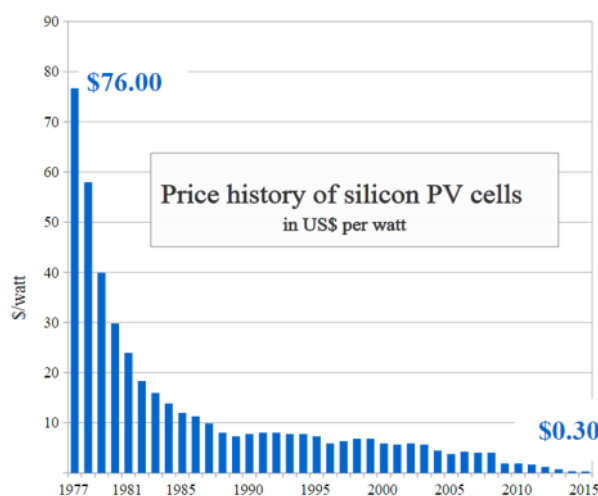


Figura 5 - Preço das células fotovoltaicas cristalinas, [8]

Esses fatores diminuem o custo da geração fotovoltaica e reduziram o tempo de retorno do investimento para a instalação de uma geração distribuída, tornando-a uma alternativa economicamente viável para o consumidor que, anteriormente, tinha custos impostos a ele pela distribuidora local e não permitia outra opção senão a energia fornecida pela rede.

3.1.1.2.Incentivo Fiscal

Outro fator benéfico da geração distribuída no aspecto econômico são os incentivos fiscais, que são subsídios do governo direta ou indiretamente relacionados à geração distribuída.

Um exemplo indireto é o incentivo fiscal dado ao consumidor que reduzir sua demanda nos momentos de pico de energia a fim de desafogar a rede elétrica, aumentar sua confiabilidade e diminuindo os custos marginais da energia por unidade consumidora. Neste caso, o incentivo pode ser adquirido por meio dos sistemas de geração distribuída que são utilizados como alternativa energética durante os períodos de pico de carga e não impactam negativamente a rede elétrica.

Os incentivos fiscais variam dependendo das políticas de cada país e demonstram as inúmeras possibilidades que esse auxílio poder ser viabilizado sem o prejuízo para o sistema elétrico convencional ou para as distribuidoras de energia.

3.1.1.3.Custo das Falhas Técnicas da Rede

Embora esse seja um tópico relacionado ao aspecto técnico, o aumento da geração distribuída irá reduzir a sobrecarga do sistema e diminuir os períodos de conexão do consumidor com a rede. Assim, caso a instalação da geração distribuída ocasiona a diminuição de falhas vistas pela unidade consumidora, o custo final da energia também será reduzido.

Como exemplo, podemos citar um processo fabril em que é necessário um teste de fabricação com um período contínuo de aproximadamente 1000 horas. Neste caso, qualquer interrupção de energia irá provocar o reinício do processo e, consequentemente, acarretará perdas de todos os procedimentos realizados anteriormente.

Assim, muitas indústrias estão investindo na geração distribuída por fatores econômicos relacionados à confiabilidade da rede elétrica que está diretamente relacionada à quantidade e ao custo dos produtos fabricados.

3.1.1.4.Área Ocupada

As usinas térmicas são geralmente construídas próximas aos centros urbanos e, desta forma, a região ocupada pela usina possui contribuição elevada para o preço total da obra,

visto o alto custo do espaço urbano atualmente. Esse custo é, então, repassado ao preço da energia final e encarece o valor pago pelo consumidor.

A Figura 6 apresenta um exemplo da comparação entre os custos por área nas regiões rurais e nas regiões próximas às áreas urbanas nos Estados Unidos, em 2011. Nesta figura, é possível retratar a discrepância entre a valorização das áreas urbanas comparadas às áreas rurais, distantes dos centros de carga.

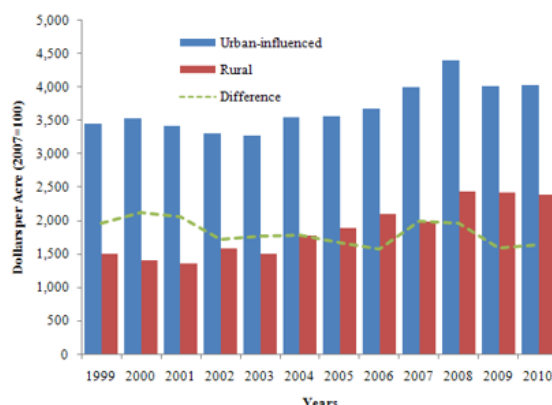


Figura 6 - Custo relativo da área rural e próxima às áreas urbanas, 2011 [9]

Neste caso, a geração distribuída fotovoltaica possui, como vantagem, a possibilidade de instalação em áreas urbanas já utilizadas, como nas coberturas ou fachadas dos empreendimentos. Dessa maneira, não há a necessidade de ocupação de uma área complementar e, conseqüentemente, não há custos adicionais específicos somente para a geração de energia.

A Figura 7 e a Figura 8 mostram exemplos da instalação de sistemas fotovoltaicos em áreas já ocupadas para objetivos distintos ou em locais sem aproveitamento, como por exemplo, na cobertura de um estacionamento na Universidade de *Rutgers* nos Estados Unidos e no telhado de um prédio residencial na Alemanha.



Figura 7 - Cobertura de estacionamento utilizando módulos fotovoltaicos, Rutgers University, 8MWp, New Jersey, Estados Unidos, 2013 [10]



Figura 8 - Prédio com sistema solar integrado na cobertura, Gutleutviertel, Frankfurt, Alemanha, 2015 [11]

Além disso, os investimentos crescentes no setor de energia solar fotovoltaica estão trazendo novos produtos cada vez mais incorporados às construções urbanas sem interferir na estética dos imóveis. A Figura 9 apresenta uma foto de cobertura com telhas residenciais compostas por células fotovoltaicas implementada em uma residência dos Estados Unidos.



Figura 9 - Telha composta por células fotovoltaicas, Estados Unidos, 2016 [12]

3.1.1.5. Sistema de Compensação de Energia (ou *Net Metering*)

Outra vantagem econômica da geração distribuída é o Sistema de Compensação de Energia Elétrica ou também denominado *net metering*. Nesse sistema, o consumidor que instalar um sistema de geração distribuída em sua unidade consumidora, também irá possuir um medidor de energia bidirecional, ou seja, um medidor que opera em ambos os sentidos.

Dessa forma, quando a energia proveniente do sistema de geração distribuída não é consumida imediatamente e não há um sistema de armazenamento conectado a ele, essa energia excedente é transferida para a rede elétrica e o medidor opera na direção contrária, medindo apenas a diferença entre a energia consumida e a energia injetada na rede.

Na fatura de energia, o valor cobrado pela distribuidora será a diferença mensurada pelo medidor bidirecional entre as energias gerada e consumida. Além disso, a energia injetada na rede poderá produzir os denominados *créditos de energia* que podem ser utilizados pelo consumidor nas faturas posteriores de energia ou retornadas ao consumidor como compensação monetária de acordo com o modelo adotado na região de instalação.

No Brasil, esse modelo foi implementado pela Resolução Normativa 482/2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e é denominado “Sistema de Compensação de Energia” [13]. Entretanto, os créditos de energia provenientes da energia excedente injetada na rede pela geração distribuída só podem ser reaproveitados nas faturas de energia das unidades consumidoras da mesma distribuidora onde está localizada a geração distribuída e não há a possibilidade de compensação monetária, como ocorre em outros países, por exemplo, nos Estados Unidos, no Canadá, no Japão e na Alemanha.

No Brasil, ainda existem muitas questões inconclusivas sobre o valor apropriado da energia injetada na rede e os encargos associados a ela. Do ponto de vista das distribuidoras, essa perda no valor das faturas de energia pode gerar consequências financeiras às mesmas. Dessa forma, uma tendência visível é a criação de setores específicos para a geração distribuída nas próprias concessionárias de energia a fim de não perderem esse insumo e possuírem também o controle técnico dos sistemas de geração distribuída conectados ao seu sistema.

3.1.1.6.Redução nos Custos da Geração, Transmissão e Distribuição

Além do consumidor final, a geração distribuída também pode promover vantagens econômicas para as parcelas da geração, transmissão e distribuição. Em consequência da difusão dos sistemas conectados à rede, há uma redução nos índices das demandas atuais e projetadas do consumo energético. Esses índices são atualizados e utilizados para o planejamento estratégico com relação a expansão da geração de energia na região e influenciam de maneira acumulativa nos custos futuros das geradoras, transmissoras e distribuidoras de energia.

No Brasil, por exemplo, como o investimento da geração distribuída é realizado em sua grande maioria pelos próprios consumidores, a disseminação desse tipo de sistema diminui os gastos públicos em obras do governo relacionadas às construções de grandes usinas geradoras centralizadas.

Ademais, a diminuição da demanda de energia diminui os períodos de pico e provoca a diminuição dos custos de manutenção e substituição dos equipamentos e das linhas de transmissão congestionadas durante esse intervalo de tempo.

A Figura 10 apresenta um gráfico que correlaciona os custos das linhas de transmissão com a variação da demanda de energia nos Estados Unidos [14]. Nesta figura, é possível verificar o aumento exponencial do custo da transmissão com relação ao aumento linear da demanda energética, acentuando os gastos elevados da parcela de transmissão nos custos do setor energético totais.

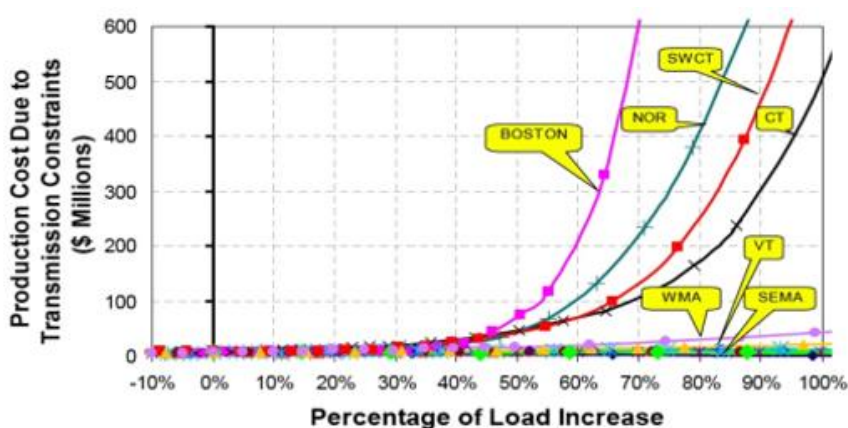


Figura 10 - Custo das Linhas de Transmissão x Aumento da Demanda Energética, [14]

Adicionalmente, os custos das transmissoras também são reduzidos devido à geração distribuída ser localizada próxima à unidade consumidora. Assim, a parcela de transmissão tem seus preços minimizados a longo prazo e seus períodos de

congestionamento de energia amenizados, diminuindo o valor da energia para o consumidor final.

Como as linhas de transmissão e a rede de distribuição já se encontram implementadas antes da disseminação da geração distribuída, esse custo evitado é um parâmetro visto em um futuro a médio e longo prazo. Entretanto, no longo prazo, esses sistemas de transmissão e distribuição carecerão de manutenção e reposição dos equipamentos. Assim, esses custos podem ser direcionados para a construção de um sistema elétrico equilibrado considerando a inclusão da geração distribuída de maneira coordenada e planejada com o sistema elétrico principal.

3.1.2. Vantagens Políticas

O Brasil possui um sistema elétrico interligado, vasto e complexo. De acordo com o Operador do Sistema Elétrico Nacional (ONS), as características do sistema elétrico brasileiro são únicas no mundo e seu sistema interligado alcança cerca de 98,3% de todo o território nacional [15]. Como pode ser visto na Figura 11, o Brasil possui quilômetros de extensão em linhas de transmissão de alta tensão que fornecem energia elétrica disponível durante 24 horas por dia e sete dias por semana.

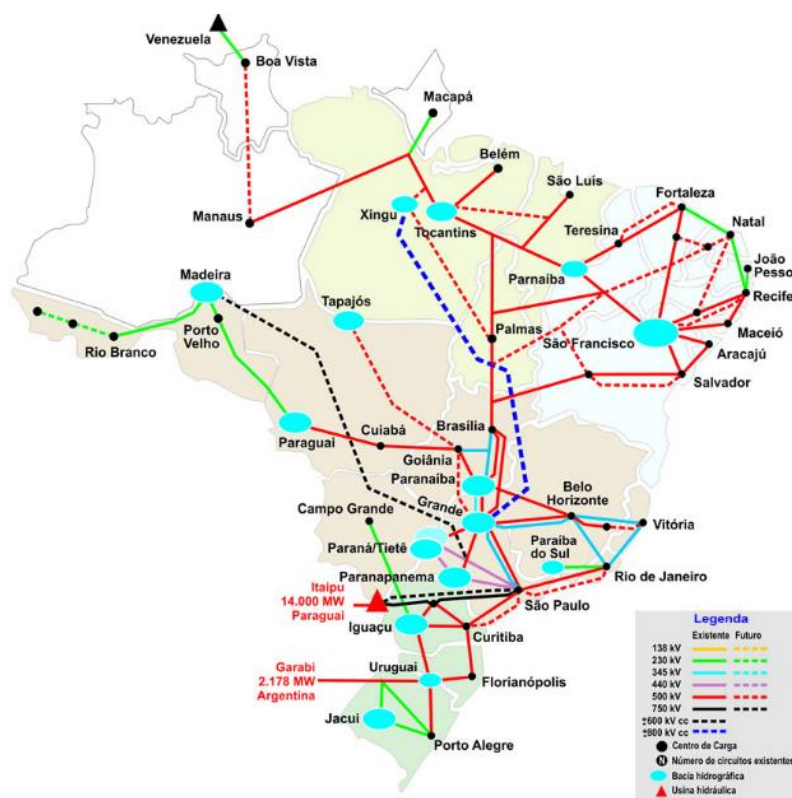


Figura 11 - Sistema Interligado Nacional do Brasil, ONS

Apesar de todo o controle centralizado para um sistema majoritariamente interligado, ocorrências como o apagão nos anos 2000 nos mostram o quanto somos frágeis sem a energia elétrica e como é importante termos uma alternativa energética além da rede usual.

A geração distribuída possui muitas desvantagens caso substitua integralmente o sistema elétrico interligado. Entretanto, ela é benéfica quando utilizada parcialmente para aumentar a confiabilidade da rede e, principalmente, para adicionar segurança, do ponto de vista político, em que a energia controlada de forma centralizada torna-se um possível alvo em momentos críticos como por exemplo, desastres naturais, guerras ou ameaças terroristas.

No caso do Brasil, os desastres naturais como as enchentes podem danificar os pontos de distribuição e com isso, afetar milhões de pessoas que dependem do fornecimento da energia da rede principal para atividades essenciais como alimentação, higiene, comunicação e trabalho.

Atualmente, a energia elétrica é a infraestrutura para praticamente todas as atividades da sociedade. É por meio da energia que podemos ter o alcance de necessidades básicas à população como o fornecimento de comida e água, a transmissão de dados, o transporte, entre outros.

Por isso, é fundamental novas discussões para decidir quais serão os passos estratégicos de um setor que influencia diretamente o Produto Interno Bruto (PIB), o cenário socioeconômico e consequentemente, a estabilidade política do país. A Figura 12, retirada da projeção da demanda energética entre os anos de 2016 e 2020, publicada pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), [16], apresenta a correlação entre as taxas médias de crescimento anual do PIB e do consumo energético desde 1970 até projeções de 2020.

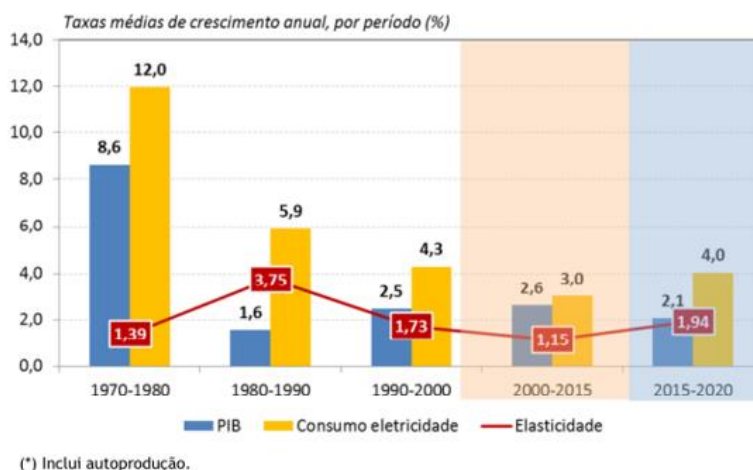


Figura 12 - Evolução temporal do PIB e do consumo energético no Brasil [16]

A geração distribuída é uma solução alternativa que diminui a vulnerabilidade energética do país, aumenta a confiabilidade da rede devido a diminuição das interrupções causadas por eventos imprevisíveis e com isso, aumenta a segurança nacional. Uma das possibilidades é a construção de geradores distribuídos habilitados para operação ilhada apenas direcionados ao fornecimento de cargas prioritárias e estratégicas como a saúde pública, os serviços de emergência, a tecnologia da informação, comida e agricultura.

Essa metodologia possui como objetivo criar uma rede mais flexível e dispersar as usinas de geração centralizada em pequenas usinas distribuídas de forma a estender o controle da rede e aumentar a autonomia do país em momentos vulneráveis ou estratégicos. Além disso, a geração distribuída também aumenta os pontos de fornecimento de energia e com isso, diminui os riscos de dependência de uma pequena quantidade de usinas para suprir uma cidade ou um país inteiro.

3.1.3. Vantagens Sociais

3.1.3.1. Minimização dos impactos no entorno

Uma das vantagens sociais da geração distribuída está relacionada à construção das grandes usinas e seus malefícios para a população no seu entorno, pois quanto maior a usina, maiores serão esses impactos, principalmente, no seu local de construção.

No Brasil, as hidrelétricas sofrem constantemente de pressão socioambiental devido a área que é alagada para a instalação da usina e do seu reservatório. Embora seja essencial a existência de um reservatório para minimizar os riscos de escassez de água e aumentar a confiabilidade da geração de energia, os impactos negativos do alagamento no ecossistema e nos vilarejos próximos pressionou para a diminuição das grandes usinas e para a quase extinção dos reservatórios em projetos ainda não finalizados e em projetos futuros.

A falta de reserva de água nas usinas hidrelétricas cria uma dependência energética do país em detrimento a outras usinas, como as térmicas, que não utilizam fontes renováveis e possuem seu custo de energia agregado diretamente ao preço e disponibilidade do combustível no mercado. Esse custo, então, é sempre repassado ao consumidor final, encarecendo a energia e resultando no aumento das fontes não-renováveis na matriz energética do país.

Assim, a geração distribuída causa impacto consideravelmente menor nos entornos da sua instalação, visto se tratar de uma geração com potência instalada menor em comparação a capacidade das usinas centrais. Além disso, a geração distribuída tem a possibilidade de utilizar fontes de energia renováveis que não dependem do preço do combustível e com isso, não tem valor agregado que encarecem o custo da energia ao consumidor final.

3.1.3.2.Minimização das desapropriações

Outro aspecto social que a geração distribuída tem como benefício é a proximidade da geração com a carga a ser atendida. Nesses sistemas, não é necessário a construção de novas linhas de transmissão para transportar energia das usinas centrais aos centros consumidores mais distantes. Esse fato é socialmente relevante devido a desapropriação de terrenos para a passagem de linhas de transmissão em decorrência da segurança elétrica e dos riscos associados nas proximidades de condutores em altas tensões.

Na China, por exemplo, a construção de usinas centrais localizadas longe dos consumidores fez com que milhões de pessoas fossem transferidas de suas residências para alocar cerca de 270 mil quilômetros de linhas de transmissão de alta tensão [17].

3.1.3.3.Aumento da qualidade na saúde

A possibilidade da utilização de energias renováveis que não emitem gases tóxicos à atmosfera nas gerações distribuídas é um fator relevante para o incentivo à redução das grandes usinas centralizadas que utilizam, em sua maioria, combustíveis fósseis que emitem gases nocivos à população.

Como por exemplo, nos Estados Unidos, estima-se que os custos evitados da saúde pública associados a minimização da geração de energia que utiliza combustíveis fósseis excedam aproximadamente 300 mil dólares para cada tonelada de elemento tóxico não expelida pelas usinas centralizadas, em 2007 [18].

3.1.3.4.Geração de Emprego

O crescimento da geração distribuída acarreta no surgimento de novos postos de trabalho mesmo em um cenário político-econômico desfavorável. Em 2015, o

crescimento socioeconômico mundial foi reduzido em relação aos anos anteriores, entretanto o número de empregos continuou a aumentar [3]. Um dos principais setores onde houve aumento da geração de empregos foi no de geração distribuída, em contraste com o setor energético em crise.

Os sistemas solares fotovoltaicos foram aqueles que produziram a maior geração de emprego com um crescimento de 11% em relação ao ano anterior em 2014 [3]. O recorde de geração de empregos para o setor de geração distribuída solar fotovoltaica ocorreu na China, com a criação de 1,7 milhões de empregos em 2015, seguido pelo Japão e Estados Unidos, [3]. Entretanto, na Europa, onde a geração distribuída já está consolidada, houve uma queda de 13% dos empregos no setor fotovoltaico em 2014, [3].

No Brasil, de acordo com o Programa de Desenvolvimento de Geração Distribuída (PROGD) [19], cerca de 30 empregos diretos são criados para cada 1 MW de potência instalada em sistemas de geração distribuída. De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o número de sistemas de geração distribuída instalados e conectados no Brasil em 2015 produziu 16,6 MW em 2015, com um crescimento de mais de 300% com relação ao ano anterior de 2014 [20].

Além disso, segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), estima-se que esse crescimento continue avançando até atingir 1,3 GW em 2024 [21], criando aproximadamente 40 mil novos postos de trabalhos diretos e outros postos de trabalhos indiretos não contabilizados provenientes da geração distribuída.

3.1.3.5. Alcance da Energia em Áreas remotas

Uma das vantagens da geração distribuída é a possibilidade da instalação em pequenas áreas comparadas com as usinas centralizadas de geração. Esse fator é favorecido, principalmente, para os sistemas de geração distribuída isolados, geralmente localizados em regiões distantes dos pontos de distribuição de energia e em lugares onde as linhas de transmissão não existem ou estão perto do seu limite de capacidade e os custos para novos sistemas de transmissão e de usinas geradoras é muito elevado.

Dessa forma, a reduzida área ocupada para a instalação e operação da geração distribuída favorece sua implementação em áreas remotas onde, anteriormente, não havia acesso à energia.

Além disso, a geração distribuída *off-grid* não necessita das linhas de transmissão e pode operar sem conexão à rede elétrica, sendo uma alternativa para levar energia elétrica ao maior número de pessoas em locais de difícil acesso.

Em 2012, a China conseguiu 100% de fornecimento de energia elétrica à sua população devido, principalmente, a instalação de sistemas de geração distribuída solar fotovoltaicos *off-grid*, ou seja, sistemas não conectados à rede elétrica [3].

No Brasil, o Ministério de Minas e Energia (MME) publicou, em 2015, o Plano de Expansão e Melhorias do Setor Elétrico do Estado do Amazonas. Neste plano, além da integração de novos municípios ao Sistema Interligado Nacional (SIN) com a construção de novas linhas, subestações e redes de distribuição, o programa também incluiu a expansão do fornecimento de energia no interior do estado utilizando sistemas de geração distribuída através da implantação de sistemas pelos Produtores Independentes de Energia (PIEs) e de sistemas solares fotovoltaicos para atender as comunidades isoladas em 55 municípios e abrangendo aproximadamente 72 mil pessoas por meio do Programa Luz para Todos [22].

Percebe-se a necessidade indiscutível de um sistema interligado nacional para o fornecimento de energia elétrica à população. Entretanto, a geração distribuída surge como uma alternativa para a minoria que não é alcançada pelo sistema elétrico, aumentando a qualidade de vida e as perspectivas para o crescimento de renda dessas populações. Atualmente, estima-se que 17% da população mundial ou, aproximadamente, 1,2 bilhões de pessoas no mundo todo vivam sem acesso à eletricidade, principalmente na região da África Subsaariana e da região pacífica da Ásia, 2016 [3].

A Figura 13 apresenta um sistema solar fotovoltaico pertencente a um sistema de geração distribuída híbrido fotovoltaico-eólico implementado na Ilha de Lençóis no estado do Maranhão como parte do Programa Luz para Todos do Ministério de Minas e Energia (MME). A Figura 14 mostra um dos domicílios, antes sem energia elétrica, atendidos por esse sistema [23].



Figura 13 - Sistema Híbrido Fotovoltaico-Eólico instalado no Maranhão como parte do Programa Luz para Todos, 2011 [23]



Figura 14 - Unidade consumidora atendida pelo sistema híbrido solar-eólico no Maranhão como parte do Programa Luz para Todos, 2011 [23]

3.1.4. Vantagens Técnicas

A infraestrutura do sistema elétrico atual é robusta e consolidada para uma topologia específica de rede. Por isso, o sistema ainda não está preparado para a inserção massiva da geração distribuída e existem muitos obstáculos para a sua integração de maneira satisfatória com a rede elétrica vigente.

Apesar disso, a geração distribuída pode ser utilizada para gerar diversos benefícios à operação e no planejamento da rede, como também ao consumidor final. Nessa seção são analisados os impactos positivos sob o aspecto técnico encontrados na inserção da geração distribuída na rede baseadas em características específicas para cada estudo realizado.

3.1.4.1.Reduzir o Fornecimento de Energia da Rede durante os Picos de Carga

O sistema elétrico e seus equipamentos são dimensionados para operar em regime permanente sob condições operativas específicas e também durante períodos de carga pesada sob outros aspectos ainda mais restritivos. Esse dimensionamento é realizado conforme o planejamento de expansão da carga que foi realizado muito tempo antes da sua implementação.

Entretanto, com a crescente demanda não alinhada ao desenvolvimento da rede, há o risco dessas margens de erro calculadas anteriormente serem ultrapassadas além do projetado, principalmente durante os períodos de pico de carga, quando os equipamentos são mais suscetíveis às falhas e interrupções. Dessa forma, a geração distribuída possui como vantagem a minimização da demanda de energia nestes períodos em decorrência de sua complementariedade para o fornecimento de energia ao consumidor.

Como exemplo, no Brasil a curva de carga habitual tem o seu horário de pico ligeiramente alterado durante a estação do verão, devido às elevadas temperaturas que se traduzem no aumento do consumo de equipamentos de refrigeração durante o período posterior ao meio dia. A Figura 15 apresenta um gráfico das demandas instantâneas máximas no subsistema Norte desde janeiro de 2011 até agosto de 2015, publicado pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) [24]. A Tabela 2 mostra que a demanda máxima instantânea teve um novo recorde às 15horas e 53 minutos com um valor de 6492 MW no dia 21/10/2015. As causas, segundo o ONS, foram “as altas temperaturas e o índice de desconforto térmico, na hora de maior insolação” [24].

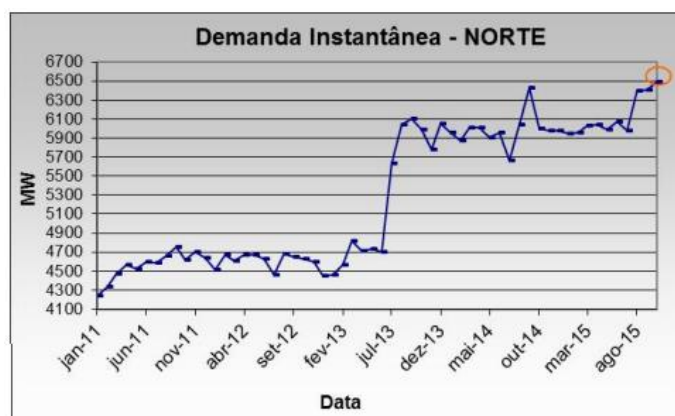


Figura 15 - Demandas Instantâneas Máximas (MW), 2015, ONS [24]

Tabela 2 - Demanda Instantânea Máxima (MW), 2015, ONS [24]

Região	Máxima em 21/10/15		Recorde Anterior	Data
Norte	6.492	15:53	6.432	04/09/14

Neste caso específico, uma das possibilidades para desafogar a demanda nos momentos de sobrecarga da rede é a utilização de sistemas de geração distribuída solares fotovoltaicos em que a forte radiação solar, e consequentemente a otimização da geração da potência elétrica produzida pelo sistema, ocorre nos mesmos intervalos de tempo, próximos ao meio-dia.

Complementarmente, com a diminuição dos períodos de pico nas linhas de transmissão, também haverá uma diminuição no desgaste dos equipamentos elétricos das geradoras, transmissoras e distribuidoras em subestações, como transformadores, cabamentos, etc.

Conforme [14], de 10% a 30% das falhas na rede elétrica são provenientes de falhas de equipamentos causados por sobrecarga exaustiva. Dessa maneira, a geração distribuída tem como objetivo fornecer energia alternativa aos consumidores nos períodos de alta demanda a fim de reduzir esses intervalos, em que a carga permanece acima dos parâmetros nominais e pode ocasionar prejuízos aos equipamentos e nos sistemas de distribuição e transmissão.

Além disso, como visto anteriormente, nas vantagens econômicas já estão incluídos os incentivos fiscais para sistemas de geração distribuída se conectarem aos operadores do sistema elétrico a fim de lhes disponibilizar a geração de energia nos momentos de pico de carga. Logo, em trabalhos e análises futuras, a geração distribuída ainda pode ser utilizada pelos planejadores e operadores da rede elétrica como auxílio ao controle dos níveis de tensão da rede durante os períodos de grande demanda.

3.1.4.2. Diminuição das Perdas no Sistema Elétrico

A geração distribuída não possui em seu escopo a parcela de transmissão visto que seus sistemas são instalados próximos ao consumidor final. Dessa forma, as perdas de energia no setor de transmissão são anuladas em comparação ao que ocorre com a geração da mesma capacidade instalada proveniente das usinas centralizadas.

Ademais, para o cenário em que a geração distribuída participa parcialmente do sistema elétrico de maneira a complementar a geração, temos uma solução para a dispersão da geração próxima do consumo e com isso a minimização do fluxo de potência nas linhas de transmissão, reduzindo, assim, as perdas na rede básica do sistema elétrico principal.

Outro cenário é o caso em que o sistema de geração distribuída é instalado e conectado diretamente no local de consumo. Neste caso, o sistema também não utiliza a parcela de distribuição da rede, onde se localizam, juntamente com as perdas de transmissão, os maiores índices de perdas do sistema elétrico.

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), as perdas nas parcelas de transmissão e distribuição acima de 230 kV, na também denominada Rede Básica, somam em média 20% de toda a energia gerada no sistema elétrico nacional, incluindo as perdas técnicas e comerciais [25]. As perdas técnicas são relacionadas às perdas por efeito Joule, em decorrência da transformação da energia elétrica para térmica nos condutores em decorrência do transporte de energia, além das perdas nos núcleos dos transformadores em razão das correntes parasitas e às perdas dielétricas. Por sua vez, as perdas comerciais são referidas aos erros de medição, aos erros nos processos de faturamento, às unidades consumidoras que não possuem equipamento de medição e aos furtos de energia. Em alguns casos específicos, foram registradas perdas de mais de 50% somente na parcela da distribuição [25].

Assim, a disseminação da geração distribuída contribui para a redução significativa dos grandes índices de perdas no sistema elétrico usual. Entretanto, vale ressaltar que para a implementação de uma otimização da geração distribuída com recuo da injeção de energia em redes sobrecarregadas e, conseqüentemente, nos locais onde há os maiores índices de perdas de energia, é necessária a aplicação de um sistema de comunicação integrado e uma análise dos locais favoráveis e do nível de inserção adequado para onde a geração distribuída deve ser instalada sem acarretar outros impactos ao sistema.

3.1.4.3. Diminuição das Faltas do Sistema de Transmissão

Em geral, as linhas de transmissão percorrem milhares de quilômetros de distância para transmitir energia das grandes usinas geradoras até os centros consumidores. Essa longa exposição aumenta os riscos provenientes da exposição a intempéries como ventos,

tempestades, descargas atmosféricas e também a acidentes como quedas de árvores e ações de vandalismo. Para minimizar esses perigos, são necessários investimentos adicionais na proteção e na manutenção do sistema de transmissão que afeta diretamente no custo final da energia entregue ao consumidor.

Como exemplo, no dia 10 de novembro de 2009, o Brasil sofreu um blecaute parcial que interrompeu cerca de 40% de toda a carga total do Sistema Interligado Nacional (SIN) [26]. De acordo com o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), as causas foram provenientes de diversas perturbações concomitantes que resultaram em um aparente curto-circuito trifásico à terra ocorrido no sistema de transmissão da linha de 765 kV LT Itaberá – Ivaiporã C1, C2 e C3, desligando os três circuitos da transmissão em 765 kV e os dois bipolos de corrente contínua que acarretaram, consequentemente, a perda da geração de Itaipu e provocou a rejeição de 3100 MW de geração [26]. Além dessa ocorrência, o Brasil já havia presenciado outro blecaute em 2002 com piores consequências, em que 55% da carga total do SIN foi interrompida, sendo a origem das falhas também no sistema de transmissão de energia, neste caso, dado por um curto bifásico na linha de transmissão de 440kV LT Ilha Solteira – Araraquara C1 e C2 [26].

Com isso, é notório perceber que o sistema de transmissão é o elo mais suscetível a falhas e às contingências imprevisíveis e, isso acarreta graves impactos no abastecimento de energia elétrica ao consumidor final. Dessa forma, a geração distribuída tem como vantagem a exclusão da parcela de transmissão e consequentemente, a minimização das interrupções de energia provenientes das falhas ocorridas no sistema de transmissão.

3.1.4.4. Compensação de Reativo

Conforme a Resolução Normativa da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) número 456/2000, o fator de potência corresponde ao grau de eficiência de um determinado sistema elétrico, variando entre zero no pior caso e 1 (um) no melhor caso.

Por definição, o fator de potência é a relação entre a potência ativa e a potência aparente de um sistema elétrico. Quando o fator de potência é diferente de 1, isso significa que a tensão e a corrente não estão em fase e com isso, para uma mesma quantidade de potência ativa fornecida pela distribuidora, é utilizado um valor de corrente superior e consequentemente, ocorre o aumento das perdas para a distribuidora de energia.

Assim, para compensar a concessionária de energia pela potência reativa injetada na rede, geralmente fornecida por unidades consumidoras comercial e industrial que se

utilizam de máquinas de indução, a ANEEL arbitrou um valor mínimo para o fator de potência limitado a 0,92 indutivo ou capacitivo e, determinou o pagamento de multas para aquelas unidades consumidoras que ultrapassarem esse limite.

Logo, para exemplificar como a geração distribuída pode beneficiar a rede com a compensação do reativo, temos na Alemanha em 2011, a norma VDE-AR-N 4105 publicada pela *German Association for Electrical, Electronic & Information Technologies* (VDE) [28], que estabelece a geração de potência reativa pelo sistema de geração distribuída com o objetivo de compensar para o consumo de potência reativa atribuído ao consumidor e de reduzir os impactos da conexão desses sistemas com a rede elétrica da distribuidora.

Dessa forma, tanto potência ativa quanto reativa da unidade consumidora são aproximadamente compensadas, de forma que o fator de potência do empreendimento não é impactado pela geração distribuída. Embora a norma seja aplicável somente para sistemas de baixa tensão até 1kV e potência instalada até 100 kVA, ela abrangia cerca de 70% de todos os sistemas de geração distribuída fotovoltaicos do país em 2013 [28].

A Figura 16 apresenta o gráfico do consumo de potência ativa e o excedente de potência reativa de uma unidade consumidora com curva de carga típica de um empreendimento comercial com pico de consumo energético durante o dia. Neste gráfico, o consumidor possui um sistema gerador fotovoltaico com capacidade para compensar todo o seu consumo energético diário e produzir potência reativa capacitiva ao longo do dia conforme a norma alemã VDE-AR-N 4105 [27].

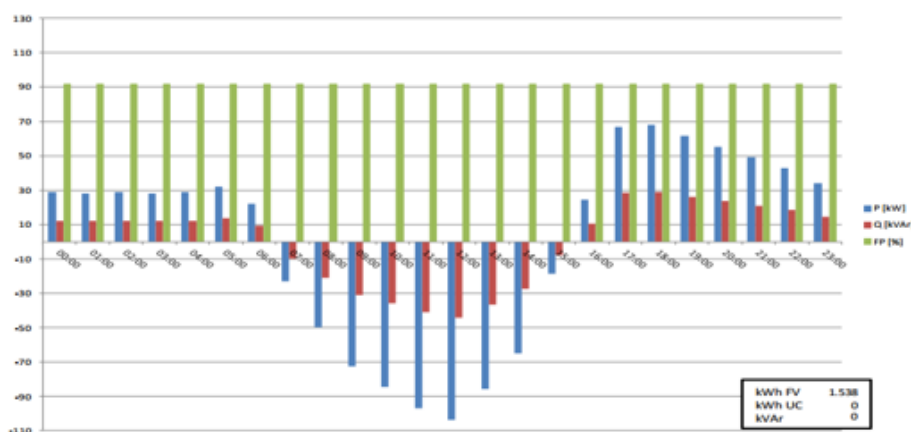


Figura 16 - Consumo faturado pelo medidor da Unidade Consumidora com gerador fotovoltaico produzindo potência ativa e reativa capacitiva [27]

Com a compensação da demanda de reativo pelo sistema de geração distribuída concomitantemente à consumo da potência ativa, a unidade consumidora conseguiu manter o seu fator de potência fixo e acima do limite inferior de 0,92, conseguiu reduzir sua potência reativa injetada, conseguiu reduzir seus impactos negativos do excedente de reativos na rede elétrica usual e, com isso, levou ao aumento da qualidade da energia fornecida pela distribuidora para as outras unidades consumidoras.

A Figura 17 apresenta um esquemático de um sistema de geração distribuída com inversores que produz, além da potência ativa transmitida pelo sistema fotovoltaico e consumida pela rede, a potência reativa necessária aos objetivos de manter o fator de potência fixo e de compensar o excedente de reativos injetado na rede.

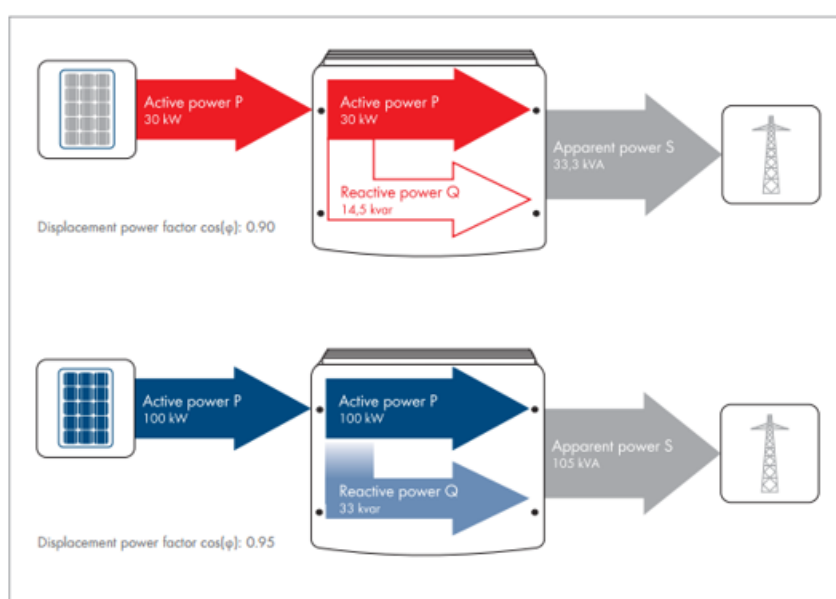


Figura 17 - Potência Ativa e Reativa entregues pelo inversor de um sistema de geração distribuída fotovoltaico à rede elétrica [29]

3.1.4.5. Sobretensão

Uma das grandezas associadas à qualidade da energia fornecida pelo sistema elétrico atual é o desvio de tensão por sub e sobretensão no ponto de consumo da energia com relação a tensão nominal da rede. Desde 2005, a partir da publicação da Resolução 505/2001 da ANEEL e atualmente, com a versão vigente no Módulo 8 – Qualidade de Energia dos Procedimentos de Distribuição (PRODIST) [30], é possível classificar as faixas de variação das tensões em adequada, precária e crítica de acordo com a tensão nos pontos de conexão, de forma a garantir que os consumidores não sejam lesados pelas variações da tensão no local de consumo.

Esse aspecto é especialmente significativo para os consumidores rurais que sofrem com a queda de tensão, por estarem localizados longe da geração e dos centros de carga. Além disso, esses consumidores possuem gastos energéticos baixos e sazonais em decorrência das variações das safras e do mercado agropecuário, aumentando o seu custo marginal do ponto de vista das concessionárias de energia e, dessa forma, sendo preteridos em investimentos energéticos.

Assim, a geração distribuída se apresenta também como uma solução para o problema de queda de tensão, pois sua interconexão com a rede elétrica em locais distantes da geração pode causar a regularização da tensão com relação a tensão nominal, como pode ser observado no esquemático da Figura 18 para um sistema elétrico radial.

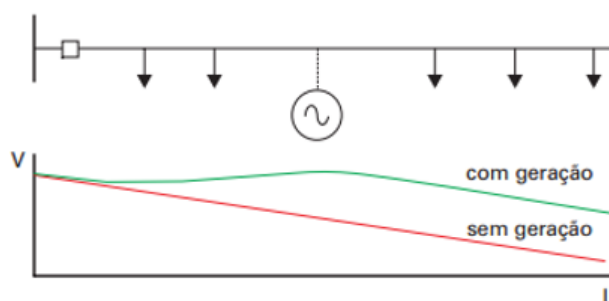


Figura 18 - Comportamento do perfil de tensão em um ramal com e sem geração distribuída, [31]

3.1.4.6. Controle da Rede

Além dos benefícios citados anteriormente, a geração distribuída também pode ser utilizada pelos operadores do sistema elétrico a fim de lhes auxiliar no controle da rede ou como catalizador da denominada rede inteligente, ou em inglês *smart grid*.

De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA), *smart grid* é uma rede elétrica que opera juntamente com um sistema de comunicação em tempo real para gerir e monitorar os fluxos de potência de todas as gerações associadas aos diferentes usos da energia para os seus consumidores finais [32].

A rede inteligente surgiu com a necessidade de aumentar a transparência, eficiência e segurança do sistema elétrico com relação aos seus procedimentos de operação e manutenção abrangendo todas as parcelas de geração, transmissão e distribuição.

Caso seja bem planejada e implementada, a rede inteligente é capaz de adequar o fornecimento de energia de forma estável e robusta de acordo com os diferentes perfis de geração e demanda, incluindo a instabilidade na geração de fontes renováveis como a eólica e a fotovoltaica, por meio de sistemas de comunicação capazes de aumentar a previsibilidade do sistema e flexibilizarem os parâmetros de controle de geração e minimizando os seus impactos na rede e na qualidade da energia fornecida.

Dessa maneira, é discutido os cenários em que as unidades de geração distribuída poderão ser controladas pelos operadores de rede em períodos temporários ou até mesmo, em sistemas de geração distribuída diretamente controlados pelas operadoras a fim de aumentar a confiabilidade e resiliência da rede, como por exemplo, com a criação de sistemas de geração redundantes nos períodos de pico de carga.

Na prática, o sistema requer uma escala elevada de investimentos com a instalação de sensores e controles, além de um sistema de automação e comunicação integral de forma a tornar o sistema mais dedicado e eficiente possível. Com isso, os operadores e consumidores teriam o acesso e controle remoto em tempo real a dados exatos e detalhados sobre o seu consumo energético a curtos intervalos de tempo e dessa forma, uma das possibilidades é a viabilidade da venda de energia gerada pelo consumidor de geração distribuída para a rede elétrica principal.

No caso do Brasil, foi publicada a Portaria número 440 em 2010 que objetiva a criação de um Grupo de Trabalho formado por membros do Ministério de Minas e Energia (MME), da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CPEL), da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), da Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) e da Eletrobras – Centrais Elétricas Brasileiras, a fim de estudar os conceitos provenientes das redes elétricas inteligentes ou *smart grids* no cenário brasileiro [33].

De acordo com o relatório desse grupo de trabalho [33], os sistemas de microgeração distribuída foram analisados como sendo a melhor opção para o panorama brasileiro e uma das vantagens à implementação da rede inteligente no país. Devido a suma importância dada à geração distribuída e a sua inserção na rede elétrica, foi criado um subgrupo a fim de analisar quais são os obstáculos de segurança e as dificuldades técnicas que o Brasil deve superar a fim de se manter atualizado e competitivo com os avanços observados no âmbito mundial.

Um dos principais aspectos estudados em relação a inserção e expansão da rede inteligente com a geração distribuída foi a implementação do Sistema de Medição para Faturamento (SMF), especificada para consumidores especiais e que possuam geração de pequeno porte conectada à rede elétrica. A Figura 19 apresenta a divisão do subgrupo para os estudos relacionados às medições das redes elétricas inteligentes com a microgeração.

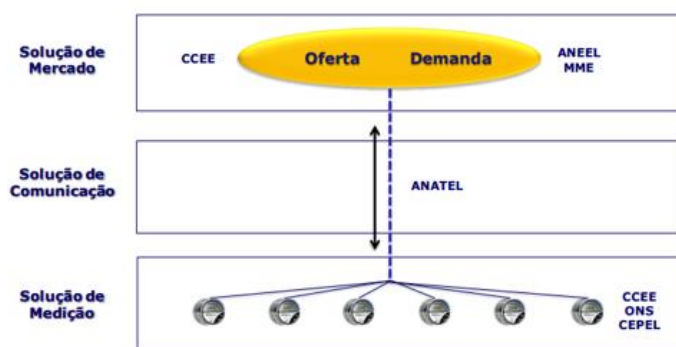


Figura 19 - Divisão dos trabalhos do subgrupo para microgeração distribuída [33]

Atualmente, os consumidores que se enquadram no Sistema de Medição para Faturamento (SMF) são aqueles que participam do mercado livre de energia e fazem parte da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE). Nestes consumidores, os medidores de energia são constituídos de um sistema de comunicação pertencente ao Sistema de Coleta de Dados de Energia (SCDE) operado pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) e apurado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

Entretanto, foi concluído que devido aos altos custos, não seria viável flexibilizar esse sistema de forma integral a todos os consumidores proprietários da geração distribuída. Outras alternativas incluem a flexibilização dos requisitos aos sistemas de medição impostos pelos Procedimentos de Rede, Anexo I, Submódulo 12.2 [34], porém essa flexibilização poderia acarretar em novos impactos na operação do sistema pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), prejudicando a confiabilidade dos dados de medição e inviabilizando sua implementação.

Por fim, foi verificada que a melhor opção para a rede elétrica brasileira seria o estabelecimento do Sistema de Compensação de Energia ou *net metering* que foi publicada posteriormente pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) por meio da Resolução Normativa número 482/2012 [13] e vem sendo amplamente praticada e

expandida no país, como pode ser observada na Figura 20 retirada do site da ANEEL [30], em dezembro de 2016.

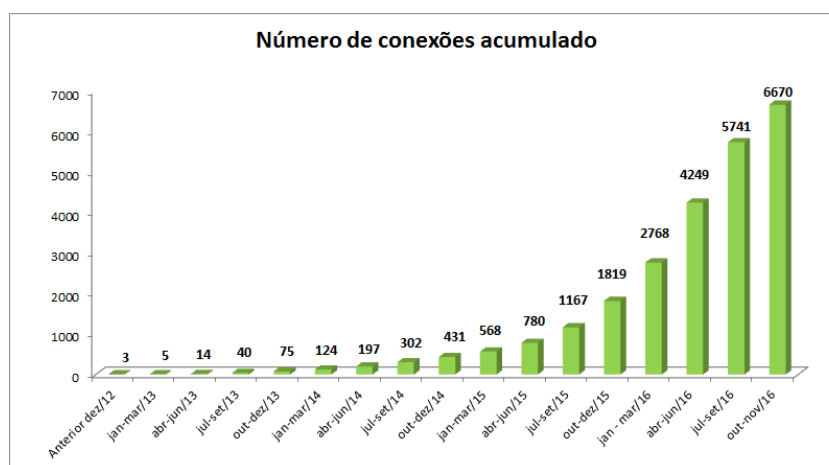


Figura 20 - Número de conexões de Micro e Mini Geradores Distribuídos, ANEEL, 2016 [30]

3.1.4.7. Microrredes

Outra solução que as redes inteligentes podem incluir é o conceito de Microrredes ou *micro-grids* para sistemas elétricos ilhados e de pequeno porte que operam independentemente do sistema elétrico e não são despachados pelo operador do sistema. Devido à pequena escala e a um sistema de comunicação robusto, o controle e monitoramento são implementados de forma descentralizada com o sistema elétrico e, com isso, podem fornecer energia de maneira mais confiável, estável e resiliente ao consumidor final. A geração distribuída, também não despachável pelo operador, é o sistema de geração principal nos sistemas de microrredes com a vantagem de não provocar os mesmos impactos negativos à rede elétrica devido ao seu maior nível de automação, controle e eficiência do sistema.

Como exemplo, a Figura 21 apresenta uma arquitetura de microrrede publicada pela IEEE [35], para um sistema radial com carga e geração distribuída conectados à ela. Dessa maneira, cada barramento possui um fluxo de potência e controle específicos e todos esses controles são centralizados em um único administrador local que possui o comando da chave central, *interconnection switch*, para ilhamento ou conexão com a rede elétrica principal, quando necessário.

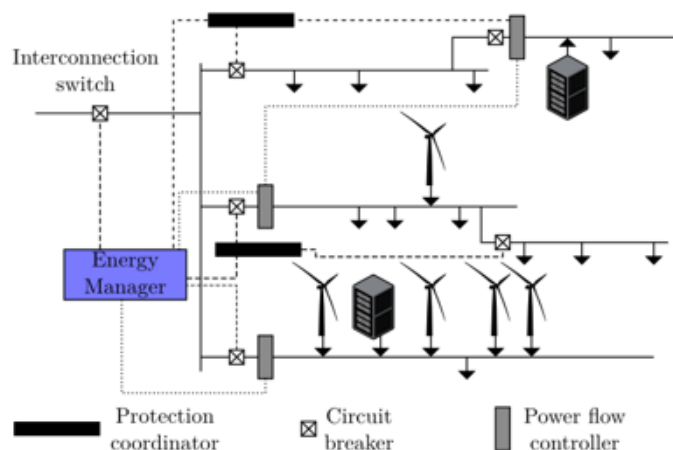


Figura 21 – Arquitetura de Microrrede Tipo 1 [36]

Outra arquitetura de microrrede publicada pelo Projeto Europeu de Pesquisa e Desenvolvimento de Redes Inteligentes [37] é apresentada na Figura 22. Neste sistema conectado às baixas tensões, todas as cargas e as gerações distribuídas possuem sensores e controles individualizados e há, complementarmente, sistemas de armazenamento de energia, todos controlados por um operador central local ou não.

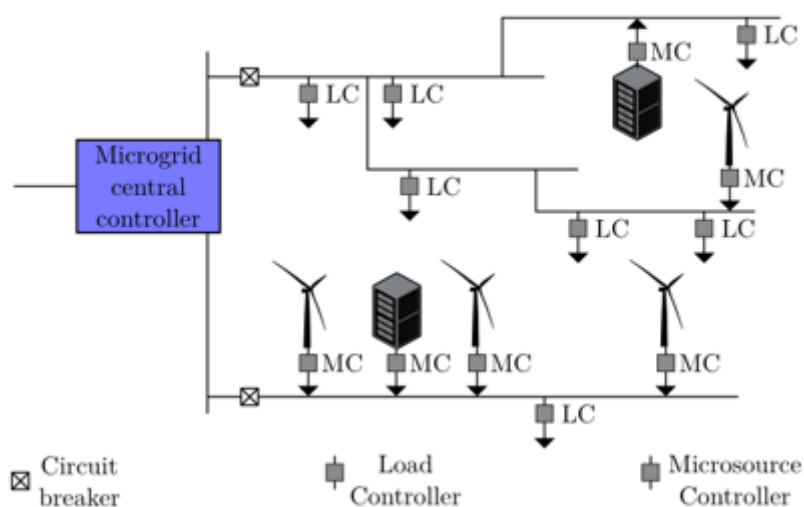


Figura 22 - Arquitetura de Microrrede Tipo 2 [36]

Nos sistemas elétricos convencionais, os desvios de frequência da tensão são provocados, em um primeiro estágio, pelo desequilíbrio entre a potência despachada pelas unidades geradoras síncronas e o despacho de carga. Assim, com o aumento da demanda, o conjugado elétrico de cada unidade geradora responde instantaneamente às variações de carga enquanto que o conjugado mecânico permanece temporariamente constante, devido ao movimento inercial. Dessa forma, conforme a Equação 1, a aceleração angular

se torna negativa e a velocidade angular diminui, provocando com isso, a diminuição da frequência do sistema.

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_{mec} - T_{elet}$$

Equação 1 – Equação de movimento

Essa reação dos geradores síncronos no sistema de potência é um aspecto característico do sistema elétrico de potência convencional e possibilita o controle da potência despachada para a carga demandada a partir da variação da frequência da rede e do controle da velocidade dos geradores síncronos do sistema. O comportamento referido acima permite que diversos geradores possam operar em paralelo na rede, mas se mostra prejudicial relativamente ao aumento da inserção de geração distribuída, o que pode causar perturbações diversas na frequência e tensão da rede principal.

No caso dos sistemas de microrredes que se utilizam de geradores distribuídos com fontes renováveis como a eólica e a fotovoltaica, a geração de energia é primordialmente integrada com conversores de eletrônica de potência de forma que não há conexão física entre a frequência da rede elétrica e a potência despachada. Dessa forma, quando ocorre o ilhamento de outras microrredes, a frequência da tensão e a carga demandada são automaticamente desacopladas da rede sem impactar o sistema elétrico principal. Os conversores possuem sistemas de controle capazes de emular as características dos geradores síncronos e regular a potência ativa para modificar a frequência e a potência reativa e com isso, alterar a amplitude da tensão como desejado.

3.2. Desvantagens

O sistema elétrico convencional, radial ou interligado, foi desenvolvido de forma que o fluxo de potência se apresente em direção que se inicia nas grandes usinas de geração, passando pelos sistemas longos de transmissão, até chegar ao sistema de distribuição próximo aos centros de carga onde se encaminha para as subestações e, por fim, alcance o consumidor final.

Todo esse sistema complexo cuja concepção e operação envolvem planejadores, operadores, engenheiros, técnicos, especialistas e pesquisadores do setor energético, juntamente com os resultados de estudos e análise, históricos e procedimentos da rede, foram desenvolvidos e qualificados com o único objetivo de entregar à sociedade a energia elétrica de qualidade e na forma mais confiável, eficiente e estável possível.

Dessa forma, a inclusão de outros pontos de geração de energia em locais próximos aos centros consumidores, além da zona de controle dos operadores centrais e dos planejadores estratégicos do país, altera a configuração de um sistema delicado, radial ou interligado, ajustado em especificações detalhadas, e coloca o sistema global em uma situação que antes era garantida, para um cenário desconhecido e repleto de riscos não modelados e mensurados.

Com a inserção da geração distribuída perto dos locais de consumo, os operadores do sistema elétrico não só devem exercer suas funções anteriores, como também, devem estar vigilantes aos possíveis efeitos em cascata que a geração distribuída pode ocasionar ao sistema global interligado direta e indiretamente.

Ademais, esses efeitos, além de serem remanejados para não interferirem no pleno funcionamento do sistema principal, também devem ser registrados e reportados a fim de serem analisados posteriormente para estudos de caso e para servirem como guia no desenvolvimento de novos cenários e dimensionamentos.

A geração distribuída traz um impacto gigantesco ao sistema elétrico convencional devido a sua ambição de aumentar o controle e as escolhas do consumidor, ao mesmo tempo em que minimiza a gestão do operador central, incluindo sistemas de armazenamento e despachos independentes proveniente da geração distribuída. Essas características, embora pareçam favoráveis à sociedade, tem a possibilidade de impactar profundamente a rede elétrica caso não esteja devidamente preparada para essa inserção, provocando consequências graves com relação a qualidade da energia elétrica fornecida ao consumidor final.

Embora a geração distribuída esteja, majoritariamente, conectada nos ramais da rede, próximo aos consumidores, seus impactos prejudiciais podem repercutir em determinados setores do sistema de potência e em outros ramais paralelos no caso dos sistemas interligados. Dessa forma, é fundamental que sejam discutidas soluções e regulamentações visando vencer os desafios da injeção da geração distribuída no sistema elétrico vigente e ao perfil dos consumidores na realidade atual.

Como foi visto nas seções anteriores, a geração distribuída pode ocasionar diversos benefícios à sociedade e ao sistema elétrico como um todo. Entretanto, esses aspectos se apresentam com diferentes intensidades e de acordo com muitas outras características específicas que devem ser analisadas separadamente, como por exemplo, a intermitência das fontes eólicas e fotovoltaicas com relação aos efeitos meteorológicos e sua difícil previsibilidade e estabilidade. Além disso, a geração distribuída também pode ocasionar

sobretensões e fluxos de potência bidirecionais em locais onde a proteção não está ainda dimensionada na forma direcional adequada.

Logo, nesta seção são discutidas algumas desvantagens econômicas, políticas e técnicas com relação aos estudos específicos realizados com a inserção da geração distribuída na rede elétrica convencional.

3.2.1. Desvantagens Econômicas

3.2.1.1. Custos de Distribuição

Do ponto de vista da distribuidora de energia, a geração distribuída pode trazer muitos benefícios técnicos como o controle da tensão, a compensação de reativo e a inserção de potência ativa nos intervalos de pico de carga. Entretanto, devido ao atraso da atualização das normas e resoluções das agências reguladoras em comparação com a rápida expansão da geração distribuída, a maioria das distribuidoras não possui infraestrutura e orçamento suficiente para adequar o seu sistema de distribuição à esses requisitos de controle, qualidade e proteção, como por exemplo, com relação ao fortalecimento das redes de distribuição para prevenir o fluxo de potência reverso proveniente da geração distribuída e com relação aos custos para controle de sub e sobretensão na rede.

Os investimentos na adequação da rede, juntamente, com uma regulamentação atrasada acarretam não só custos de implementação, como também gastos adicionais em pesquisa e desenvolvimento de modelagens, técnicas e ferramentas ainda não verificadas e padronizadas.

Com isso, a falta de regulamentação propícia pode ocasionar prejuízos financeiros à distribuidora de energia que é forçada a adequar sua rede para garantir segurança e qualidade de energia especificadas em normas e que, ao mesmo tempo, não consegue usufruir dos benefícios da geração distribuída sem antes investir em custos para atualização da rede, ocasionando, assim, perdas econômicas e comprometendo sua eficácia no fornecimento da qualidade de energia ao consumidor final.

3.2.1.2. Custos de Operação

Além dos gastos para padronização da rede nos sistemas de distribuição, os custos adicionais também incluem modificação no procedimento de planejamento e operação do sistema elétrico para cenários que considera a inserção a geração distribuída.

Assim, quanto maior e mais complexo for o sistema elétrico, maiores serão os custos necessários para o planejamento operacional do mesmo, incluindo os estudos e análises de novos procedimentos abrangendo todos os cenários possíveis com a geração distribuída e incluindo ainda o enfrentamento dos problemas técnicos provenientes da sua inserção antes que eles aconteçam e afetem o sistema elétrico como um todo.

3.2.1.3.Custos na Geração

A expansão da geração distribuída ocasiona, não só o alívio do sistema elétrico nos períodos de pico, como também pode provocar a redução da geração de energia do sistema elétrico principal, diminuindo o faturamento das geradoras das usinas de energia e conseqüentemente, também das transmissoras e distribuidoras de energia. Assim, além de possuírem gastos com a adequação do sistema para a geração distribuída, também ocorre a diminuição da arrecadação financeira pelas grandes usinas e com isso, é previsível que acarrete o aumento do custo de energia que é, então, repassado ao consumidor final.

Ademais, a geração proveniente de fontes renováveis de energia, como a eólica e a fotovoltaica, maioria nos sistemas de geração distribuída, requer sistemas de armazenamento devido ao seu alto nível de intermitência em um curto intervalo de tempo em decorrência dos seus comportamentos imprevisíveis como, por exemplo, rajadas de vento em sistemas eólicos e a passagem de nuvens sob o sistema gerador fotovoltaico.

Dessa maneira, os agentes do sistema elétrico serão chamados a investir em sistemas de geração de energia para atenderem a carga nesses momentos de instabilidade e, com isso, os investimentos de geração continuarão crescentes mesmo com a redução do consumo, ocasionando grandes entraves financeiros ao setor elétrico centralizado.

3.2.1.4.Custos da Rede Inteligente

Embora as pesquisas e os estudos relacionados às redes elétricas inteligentes, ou *smart grid*, estejam em pleno avanço em paralelo com a expansão da geração distribuída no mundo, os custos para implementação de um sistema de comunicação em tempo real de forma integral em uma rede elétrica nacional acoplada com sistemas de controle só se tornarão viáveis às custas de investimentos extremamente elevados e sob subsídios do

governo, dificultando sua aplicação em grande escala, principalmente em países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil.

Um exemplo bem-sucedido de incentivo às redes inteligentes em concomitância com o desenvolvimento de normas e padrões regulamentadas foi o investimento federal do governo dos Estados Unidos de aproximadamente 4,5 bilhões de dólares para um programa de subsídio, com a participação de empresas de distribuição de energia, fornecedores de equipamentos, empresas de telecomunicações e de tecnologia da informação alinhadas com o Departamento de Energia (DOE) federal e com o Instituto Nacional de Padronizações (NIST), a fim de realizar a criação e atualização de normas e protocolos para o desenvolvimento dos procedimentos de operação e equipamentos relacionados aos sistemas de *smart grids*.

Com isso, no ano de 2009, foi realizada cerca de oitenta padronizações conforme o Instituto Nacional de Padronizações (NIST) criadas especificamente para as redes inteligentes, denominada em conjunto como *Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards* [35]. Além disso, o governo também disponibilizou subsídios para as distribuidoras de energia realizarem projetos de pesquisa para experimentarem os novos equipamentos e analisar as respostas dos consumidores ao comportamento do novo sistema.

No caso brasileiro, os medidores eletrônicos atuais que foram trocados em 2013 não possuem funcionalidades adicionais e, com isso, torna-se-ão obsoletos em um curto período de tempo, além de não serem adequados para a implementação integral de uma rede inteligente no sistema elétrico convencional. Isso ocorre devido à escassez de incentivos fornecidos pelo governo, o que acarretam no investimento individual e na não-padronizado das empresas de distribuição de energia que priorizam os estudos específicos para as suas áreas de interesse.

A Tabela 3 apresenta os investimentos realizados para a implantação das redes inteligentes no Brasil a partir das distribuidoras de energia como descrito nos resultados de um estudo realizado pela Associação Brasileira das Distribuidoras de Energia (ABRADE) e publicados na revista do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), para diferentes áreas de aplicação a partir da Chamada 11/2010 publicada pela ANEEL dentro do Programa Brasileiro de Rede Elétrica Inteligente [35].

Tabela 3 - Cenários de investimentos para implantação das redes inteligentes no Brasil [47].

Cenários Abradee de investimentos para implantação das REIs no Brasil (em R\$ bilhões)

Área	Acelerado	%	Moderado	%	Conservador	%
Medição	45,6	50	35,4	58	28,8	62
TI – medição	0,5	1	0,5	1	0,4	1
Telecomunicação – medição	13,6	15	10,9	18	9,2	20
Automação	2,1	2	1,8	3	1,1	2
TI – automação	1,5	2	1,5	2	1,4	3

Área	Acelerado	%	Moderado	%	Conservador	%
Telecomunicação – automação	5,9	6	5,6	9	5,2	11
TI geração distribuída/veículos elétricos	0,2	0	0,2	0	0,1	0
Incentivos – geração distribuída	21,7	24	5,3	9	0,0	0
Total	91,1	100	61,2	100	46,2	100

3.2.2. Desvantagens Políticas

Um sistema elétrico centralizado é uma vantagem política devido à unificação que estabelece com relação ao planejamento estratégico realizado pelo governo para pautar e gerir os objetivos e os agentes participantes do setor energético do país. Dessa forma, a expansão da geração distribuída no sistema elétrico pode ocasionar a diminuição da influência política em um dos setores mais estratégicos do desenvolvimento nacional.

Além disso, embora o crescimento da geração distribuída seja previsível, seu crescimento não é facilmente mensurado de forma exata e isso pode prejudicar o planejamento da expansão de geração do país e afetar na evolução da infraestrutura do setor elétrico, incluindo por exemplo, os leilões para os sistemas de transmissão e para as reservas de energia com base na demanda e geração de energia conectados ao sistema.

3.2.3. Desvantagens Técnicas

A inserção da geração distribuída no sistema elétrico principal modifica os parâmetros que já estavam estabelecidos e modelados para os procedimentos de operação e manutenção da rede convencional. Por isso, é fundamental que sejam realizadas algumas avaliações a fim de se mensurar o aumento na complexidade da rede com a inserção da

geração distribuída. É necessário que sejam reduzidas as alterações a serem estabelecidas e que se evite consequências negativas que possam ocorrer durante o fornecimento de energia ao consumidor final.

Diversos aspectos devem ser discutidos com relação aos impactos da geração distribuída, como, por exemplo, o surgimento de fluxo reverso da potência produzido pela inserção da geração próxima à região de carga. Além disso, a considerar o eventual aumento na dificuldade de controle de frequência e da tensão da rede produzida pelos novos geradores que não são despachados pelos operadores na região de carga e geração distribuída.

Nesta seção, são discutidos alguns desses aspectos que podem influenciar negativamente direta e indiretamente na configuração da rede elétrica usual, sejam eles aspectos econômicos, políticos e, principalmente, técnicos. Nestes aspectos técnicos são localizadas as maiores preocupações com relação a geração distribuída e ao elevado incremento na inserção na rede atual prevista para os próximos anos.

3.2.3.1. Alteração dos Procedimentos de Rede

O objetivo primordial do sistema elétrico e dos agentes que o compõem é disponibilizar energia elétrica com qualidade e suficiente à demanda recebida para evitar escassez de energia e reduzir as interrupções em seu fornecimento. Para que isso ocorra de forma otimizada, é necessário que os operadores de rede tenham flexibilidade na operação e controle no acesso ao despacho da potência proveniente das usinas geradoras. O fato principal é garantir o balanço em tempo real da energia produzida e da energia demandada pelo consumidor final.

Com a inserção da geração distribuída na rede, aumentam também as regiões do sistema elétrico que não podem ser controladas pelos operadores de rede e com isso é reduzida essa flexibilidade do sistema para se adequar as alterações e garantir o fornecimento da energia para a carga demandada com qualidade, estabilidade e confiabilidade desejadas.

Essas alterações no modo de operar o sistema e na topologia da rede devem ser avaliadas cuidadosamente a fim de que o sistema elétrico se mantenha protegido mesmo com segmentos não despachados ou controlados por um órgão centralizado. Entretanto, presentemente, essas alterações não estão acompanhando a velocidade do aumento da geração distribuída nos sistemas atuais e, com isso, estudos, simulações, modelagens,

técnicas e equipamentos ainda não estão preparados para a realidade da geração distribuída, acarretando consequências imprevisíveis ao sistema elétrico atual.

No Brasil, as referências da geração distribuída na rede elétrica podem ser encontradas nos Procedimentos de Distribuição (PRODIST), Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição e seção 3.7 – Acesso de Micro e Minigeração Distribuída [38], publicado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e revisado periodicamente. Entretanto, esses procedimentos não citam as limitações do sistema elétrico atual para a expansão da geração distribuída na rede nem percentuais desta expansão que possam se mostrar prejudiciais à operação global.

O Decreto número 5163/2004 determina que a aquisição de energia elétrica proveniente de sistemas de geração distribuída por parte das distribuidoras de energia seja limitada a 10% da carga do agente de distribuição, mas apenas para aquisições precedidas de chamadas públicas. Este não é o caso para os sistemas de geração distribuída em expansão, nos quais o consumidor final pode instalar em seu empreendimento um sistema de geração distribuída sem uma definição prévia por parte da distribuidora.

Além disso, de acordo com a resolução normativa 482/2012 [13], que estabelece o Sistema de Compensação de Energia para sistemas de geração distribuída, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) determina que as distribuidoras de energia não devem negar o acesso da rede de distribuição a esses sistemas face à possível redução na flexibilidade de operação da rede [39]. Nesse aspecto, a adequação da rede elétrica para a inserção da geração distribuída incluindo reforços e novas ampliações para suportar as novas gerações deve ficar sob a inteira responsabilidade das distribuidoras de energia para produzir soluções apropriadas e sem prejuízo para o fornecimento de energia aos outros consumidores.

Por fim, a disseminação da geração distribuída não irá afetar tão somente os procedimentos de distribuição, mas também, direta e indiretamente, a operação de todo o sistema elétrico. A inserção da geração distribuída provoca o aumento nas alterações de carga e de geração, principalmente em decorrência da intermitência da geração de energia proveniente de fontes como eólica e fotovoltaica, que poderão refletir consideravelmente também nos sistemas de transmissão e geração centralizados.

Dessa forma, é fundamental o aprimoramento dos procedimentos de rede, como também dos processos de expansão e construção dos sistemas de geração e transmissão a médio e longo prazo, a fim que isso não provoque impactos na segurança elétrica e nas condições de fornecimento da energia do sistema elétrico principal.

3.2.3.2.Sistema de Proteção

3.2.3.2.1. Fluxo de Potência Reverso

O sistema elétrico convencional foi projetado e implementado para um fluxo de potência unidirecional proveniente das grandes usinas de geração, passando pelos sistemas de transmissão e pela rede de distribuição que é, então, enraizado para os centros de consumo por meio das subestações. Por toda a extensão desse complexo sistema elétrico, existe um conjunto de proteções dimensionado, coordenado e redundante a fim de garantir a segurança elétrica da rede e assegurar a confiabilidade e estabilidade do sistema no fornecimento de energia de qualidade aos centros de carga conectados.

Entretanto, a interligação de outros sistemas de geração próximos aos consumidores e de maneira cada vez mais expansiva pode acarretar fluxos de potência em direções contrárias às projetadas para os sistemas de proteção usual, interferindo na sua funcionalidade e colocando em riscos os equipamentos conectados à rede e os atendidos nos próprios centros consumidores.

A existência do fluxo de potência em sentido contrário afeta a forma como a rede é impactada quando uma falta ou um pico de carga acontece. A interação entre os fluxos de potência proveniente de diferentes caminhos da rede pode trazer prejuízos na estabilidade e controle do sistema. É sugerido que seja feita uma readequação do sistema elétrico, tornando-o mais completo, a fim de que o sistema de proteção também considere o fluxo de potência reverso e proteja o sistema sob faltas nas vizinhanças desses geradores distribuídos.

Já existem no mercado equipamentos de proteção projetados para operar de forma bidirecional. Entretanto, o grande aumento dos sistemas de geração distribuída não é alinhado com o desenvolvimento e preparação da rede elétrica para esse tipo de topologia. Dessa forma, uma certa incompatibilidade entre os sistemas de geração distribuída e os equipamentos de proteção, bem como a desatualização dos procedimentos de rede existentes, podem provocar severos danos na qualidade e na segurança da energia entregue aos consumidores finais.

É preciso que o desenvolvimento da geração distribuída, sendo um sistema conectado à rede, esteja sempre em contato com o desenvolvimento da infraestrutura necessária para receber sua capacidade de geração na rede elétrica. Do contrário, os

operadores e responsáveis por entregar uma energia de qualidade estarão trabalhando com algumas com variáveis fora de seu controle e, com isso, poderão ter grande dificuldade para colaborar na proteção contra eventuais falhas provenientes da interação entre a rede elétrica usual e a geração distribuída.

3.2.3.2.2. Coordenação e Seletividade

A seletividade de um sistema de proteção é um mecanismo utilizado pelos projetistas e operadores da rede para garantir que apenas o circuito onde ocorreu a falha seja desconectado do sistema sem que sejam prejudicadas outras interligações da rede. Dessa maneira, a redundância do sistema promove a continuidade do fornecimento de energia à carga sem interferir na segurança elétrica da rede e mantendo a confiabilidade e a estabilidade do sistema.

A coordenação do sistema de proteção determina que os dispositivos de proteção estejam dimensionados a atuar dentro da sua zona de atuação onde há a ocorrência das faltas. Com a coordenação, os dispositivos de proteção mais próximos do defeito irão atuar mais rapidamente e com isso, será possível a existência de sistemas de proteção de reserva para atuarem somente nos casos em que as proteções a jusante, por algum motivo, deixarem de operar conforme planejado. Esse sistema de coordenação é um procedimento de segurança utilizado para garantir que a proteção da rede esteja sempre priorizada e que todos os equipamentos e usuários que venham a se conectar à ela não sofram o impacto das faltas nas vizinhanças.

Com a geração distribuída, outros dispositivos de proteção são conectados à rede para proteger contra os efeitos do fluxo de potência reverso e, dessa forma, os sistemas de proteção da rede podem não estar coordenados corretamente com as novas proteções.

Além disso, para que a coordenação entre os dispositivos de proteção seja realizada, é necessário que sejam conhecidos os níveis mínimos de curto-circuito ao longo do circuito a ser protegido. Neste contexto, para os circuitos em que há geração distribuída, esses níveis de curto-circuito variam também com a potência e quantidade de sistemas conectados na rede. A considerar ainda que esses dados de operação e despacho não são controlados pelas distribuidoras de energia, tornando bastante complexa a definição correta dos níveis de correntes de curto-circuito que podem afetar negativa e diretamente o sistema elétrico com a maximização dos sistemas de geração na rede.

Com relação a seletividade do sistema, é fundamental que os relés de proteção sejam dimensionados de forma a detectar o fluxo de potência bidirecional proveniente dos sistemas de geração distribuída. Dessa maneira, o relé poderá detectar uma corrente de curto-circuito, mesmo que reduzida e em sentido reverso e atuar de forma seletiva relativamente à qualquer condição de operação normal e posicionamento da falta.

Caso o sistema de proteção não esteja adequado para os sistemas de geração distribuída, a não detecção exata do local do defeito poderá causar a ausência de seletividade e coordenação, provocando o aumento do tempo de interrupção e danos irreversíveis aos equipamentos expostos a correntes muito elevadas, o aumento no custo de manutenção e implementação do novo sistema de proteção, além dos prejuízos em cascata para os circuitos interligados ao sistema.

3.2.3.2.3. Ilhamento

Além dos impactos do fluxo reverso de potência, a interligação dos geradores distribuídos com o sistema elétrico também pode ocasionar problemas de ilhamento que ocorrem quando a geração distribuída fornece energia nos períodos em que não há fornecimento de energia pela rede principal. Com a geração distribuída operando em ilhamento, o sistema elétrico que deveria estar desenergizado recebe tensão proveniente desses geradores e isso pode comprometer a segurança dos operadores da rede, por exemplo, durante os procedimentos de manutenção nos sistemas de distribuição e transmissão.

Dessa forma, a escassez no monitoramento e no controle remoto da operação dos geradores distribuídos, por parte dos agentes que devem manter a rede básica do sistema elétrico principal, traz um empecilho à segurança e qualidade de energia e compromete a expansão da geração distribuída agregada ao sistema elétrico atual.

Hoje no Brasil, a operação em ilhamento para a geração distribuída não é permitida pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), exceto em alguns casos específicos em que a distribuidora de energia reconhece a existência de um sistema de armazenamento que acumula a energia gerada pela geração distribuída sem exportá-la à rede elétrica, sendo este um sistema híbrido.

A operação em ilhamento pode ser considerada uma vantagem da geração distribuída pois diminui a dependência do centro consumidor em caso de ocorrência de faltas e interrupções da rede elétrica principal. Entretanto, devido ao alto risco para um

sistema elétrico desprotegido e, portanto, despreparado para esse tipo de operação, a geração distribuída possui esse benefício impossibilitado e o sistema elétrico alerta contra os perigos de sua atuação sem a devida cautela e preparo.

Além disso, a energia fornecida pelos sistemas ilhados da geração distribuída não possui garantia de qualidade fornecida pelos distribuidores e operadores do sistema, embora esses sejam os responsáveis por seu fornecimento confiável.

3.2.3.2.4. Correntes Desbalanceadas e de Curto-Circuito

Outro aspecto prejudicial à proteção do sistema elétrico convencional com a inserção da geração distribuída são as correntes desbalanceadas. Muitos sistemas de geração distribuída são conectados apenas em uma ou duas fases mesmo em locais onde o sistema é trifásico devido à baixa potência instalada dos sistemas de geração distribuída. Entretanto, com a energia excedente de um número cada vez maior de geradores distribuídos sendo injetada na rede, é eminente o impacto provocado pelo desbalanço das correntes que fluem no sistema elétrico e com isso, as consequências variam desde o superaquecimento, perda de eficiência e aumento das perdas do sistema aos danos às outras cargas conectadas na rede paralelamente.

Além disso, a existência de uma grande quantidade de geração nas vizinhanças dos pontos de consumo contribui também para o aumento dos níveis de curto-circuito do sistema elétrico e, conseqüentemente, para o prejuízo da operabilidade dos relés que mantêm a segurança e a confiabilidade do sistema, atuando em momentos inesperados e descoordenados com relação às outras proteções do sistema. É necessário também que sejam verificados a capacidade de interrupção dos disjuntores, os níveis de saturação dos transformadores de corrente e outros fatores como o dimensionamento das linhas de transmissão e de distribuição com relação a sobrecarga e suportabilidade térmica dos circuitos.

Todos esses reajustes nas proteções e parâmetros de medição devido a inserção da geração distribuída na rede pode variar conforme o tipo de geração a ser instalado, a potência do sistema, o local de conexão em áreas urbanas ou rurais, os circuitos interligados, etc. Neste aspecto, os sistemas de geração distribuída que se utilizam da energia fotovoltaica possuem como vantagem não influenciar nos níveis de curto-circuito da rede. Em contrapartida, a contribuição dos geradores síncronos depende do valor da

tensão pré-falta, de suas reatâncias subtransitórias e transitórias e das características eletromecânicas de seus sistemas de excitação [40].

Dessa maneira, é impraticável um modelo padrão para todos os sistemas de geração distribuída devendo ser reconhecida a dificuldade de resultados conclusivos em razão da complexidade de um novo sistema elétrico. A considerar, ainda, os custos dessa readequação provocada pela inserção da geração distribuída.

3.2.3.3. Controle de Tensão e Frequência

3.2.3.3.1. Flutuação da Geração

A tensão e a frequência são, também, parâmetros importantes para a qualidade da energia fornecida pelo sistema elétrico atual. Níveis adequados de tensão e frequência são padronizados pelos agentes reguladores a fim de limitar os impactos causados pela ocorrência de sub ou sobretensão e pela sub ou sobrefrequência na rede. Estes limites devem ser controlados pelos distribuidores e operadores do sistema para garantia da qualidade de energia esperada.

Segundo [41], variações da ordem de 3,5% na tensão do sistema podem ocasionar perda de carga de até 20% em motores de indução trifásicos e variações acima de 5% resultar em danos imediatos e irreversíveis aos mesmos. Além disso, todos os outros equipamentos conectados estão projetados para suportar até uma pequena variação da tensão fornecida pela rede sem que sejam afetadas significativamente sua eficiência e funcionalidade nominal.

No caso da geração distribuída em que a potência disponibilizada pelas fontes de energia pode ser afetada por variações de maior amplitude relativa, como no caso das fontes eólicas e fotovoltaicas, a intermitência da geração em relação a energia demandada pode causar alterações na tensão e na frequência relativamente maiores, mesmo que por um curto período de tempo, afetando o sistema elétrico principal e, principalmente, os consumidores, estejam eles conectados direta ou indiretamente à geração referida.

Informações coletadas pelo Atmospheric Radiation Measurement (ARM) [39] são apresentadas na Figura 23, na qual é possível verificar, no gráfico superior, a grande variação da irradiância solar em períodos de minutos ao longo do dia para um sistema de geração fotovoltaico localizado nos Estados Unidos. Embora a comparação com a variação da irradiação solar, apresentado no gráfico inferior da Figura 23, infira que a

variação da geração é menor para um conjunto de sistemas fotovoltaicos similares, isso nem sempre é verdade. Como exemplo, se considerada uma nuvem atravessando a região de captação de um sistema fotovoltaico, é imprevisível concluir que um conjunto de sistemas fotovoltaicos instalados na mesma região tenha menor variação do que um único sistema, pois isso depende de fatores meteorológicos nos quais não é possível padronizar de forma exata e segura.

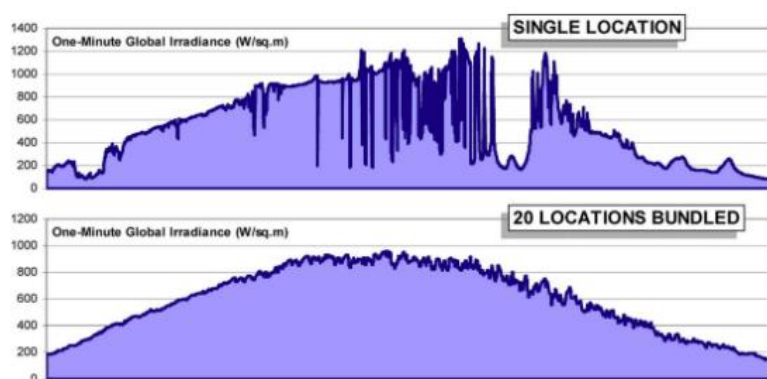


Figura 23 - Radiação solar recebida por uma geração fotovoltaica (superior) e por um sistema composto por 20 gerações fotovoltaicas (inferior), 2009 [39]

Dessa forma, um dos grandes desafios para o dimensionamento da maioria dos sistemas de geração distribuída em expansão atualmente é a enorme dependência que apresentam em relação aos fatores ambientais. Isto ocorre em contraste com os sistemas convencionais provenientes de combustíveis fósseis, para os quais é possível despachar potência de acordo com a demanda em tempo real devido a sua dependência previsível conforme a quantidade do combustível disponível, sem riscos de sazonalidade meteorológica.

A diferença entre a oferta e a demanda de energia que se apresenta aos sistemas de geração dependentes de fontes intermitentes pode criar falta ou excesso de potência e provocar variações da tensão e da frequência, podendo resultar em danos aos equipamentos conectados à rede e até mesmo ocasionando riscos mais severos como cortes de carga ou de geração.

Como solução, a especificação de sistema de armazenamento de reserva para garantir confiabilidade dos sistemas e evitar os desequilíbrios de potência ou utilizar a geração distribuída como unidades de geração auxiliares, limitando sua expansão na rede principal e priorizando as gerações em que há menos riscos de flutuação da tensão e frequência e com isso, menor vulnerabilidade no fornecimento contínuo da energia.

3.2.3.3.2. Sobretenção

Muitas unidades consumidoras localizadas longe dos centros de carga e das usinas de geração, como é o caso dos consumidores rurais, recebem energia com efeitos de subtenção. Esse fenômeno na perda de qualidade da energia fornecida ocorre em decorrência da queda de tensão entre os pontos distantes de geração e consumo em uma rede fraca. Entretanto, no sistema elétrico convencional, já existem metodologias utilizadas pelas distribuidoras de energia a fim de minimizar ou compensar essa queda de tensão.

Como exemplo, é utilizado reguladores de tensão ao longo dos alimentadores que ajustam automaticamente os tapes dos transformadores de maneira praticamente instantânea ou mesmo, em alguns casos, transformadores com comutação sob carga. Outra possibilidade é a utilização de bancos de capacitores nas subestações que injetam potência reativa de compensação na rede elétrica e, com isso, atenuam a queda de tensão de forma controlada automaticamente por sensores de tensão.

Com a inserção dos sistemas de geração distribuída nessas localidades, os operadores e as distribuidoras não possuem acesso ou controle no despacho de potência e por isso, a regulação da tensão pode não ser dimensionada previamente. A geração distribuída pode corroborar para um aumento da tensão de forma imprópria no local de conexão, principalmente em ocasiões em que a carga é leve e a geração é pesada, ocasionando deterioração na qualidade da energia fornecida para a carga e para outros consumidores conectados ao mesmo circuito.

Além disso, com o aumento das instalações dos sistemas da geração distribuída, sua expansão sem previsão especificada e regulamentada, é considerada de forma aproximada no planejamento e operação do sistema elétrico pelas distribuidoras e operadores. Dessa maneira, torna-se cada vez menos confiável prever os locais em que se deve estabelecer os procedimentos de controle de tensão e compensação da rede, prejudicando o sistema elétrico como um todo.

3.2.3.4. Harmônicos

Frequências e amplitudes associados dos harmônicos são relativamente conhecidos pelo sistema elétrico convencional devido à expansão da utilização de equipamentos chaveados em consumidores residenciais como os dispositivos eletrônicos dados por

computadores, lâmpadas de descargas, televisão, entre outros e em consumidores comerciais ou industriais nos equipamentos como os fornos a arco e as máquinas com bobinas e núcleos magnéticos que podem operar em suas regiões de saturação como as máquinas de solda e os transformadores. Esses efeitos deformam o sinal senoidal da corrente alternada e são provocados por cargas não-lineares conectadas à rede elétrica.

Com a expansão dos sistemas de geração distribuída, especialmente a fotovoltaica e a eólica que se utilizam de inversores, ocorre um aumento no número de conversores que são fontes de alimentação chaveadas e, conseqüentemente, um aumento no conteúdo harmônico injetado no sistema elétrico.

A presença de distorções harmônicas compromete a qualidade da energia e pode provocar diversos impactos negativos como o aparecimento de tensões ressonantes, vibrações e ruídos (conjugados pulsantes) em máquinas rotativas ocasionando desgaste, superaquecimento, perda de rendimento e da vida útil, erros na medição das grandezas elétricas e inadequação do sistema de proteção, além dos distúrbios de compatibilidade eletromagnética, superaquecimento dos bancos de capacitores devido aos efeitos de ressonância, sobrecarga nos condutores de neutro e danos em equipamentos conectados fase-neutro.

Além disso, a utilização dos filtros torna-se complexa devido a fatores tais como a intermitência das respectivas das fontes, no caso eólica e fotovoltaica, e aos possíveis efeitos de ressonância provenientes da interação do sistema elétrico com os dispositivos não lineares [42].

A Figura 24 e a Figura 25 apresentam as topologias mais comumente utilizadas no Brasil [42], dadas pelo gerador de indução duplamente alimentado (DFIG) composto por um conversor *back-to-back* conectado em paralelo com conexão do motor de indução com a rede e pelo gerador síncrono com conversor pleno (*Full Converter*) composto por um rotor a imã permanente e conectado à rede por meio de um retificador e inversor. Nestes dois aerogeradores, é possível verificar a presença de fontes de alimentação chaveadas, além dos geradores de indução e síncrono, que injetam correntes harmônicas na rede.

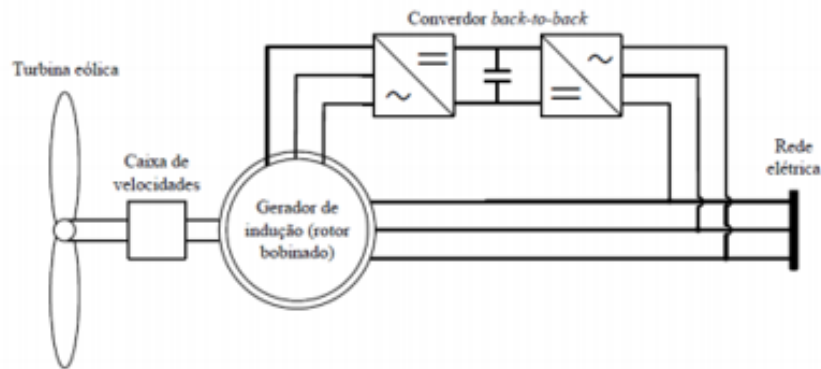


Figura 24 - Topologia DFIG de um gerador eólico [51]

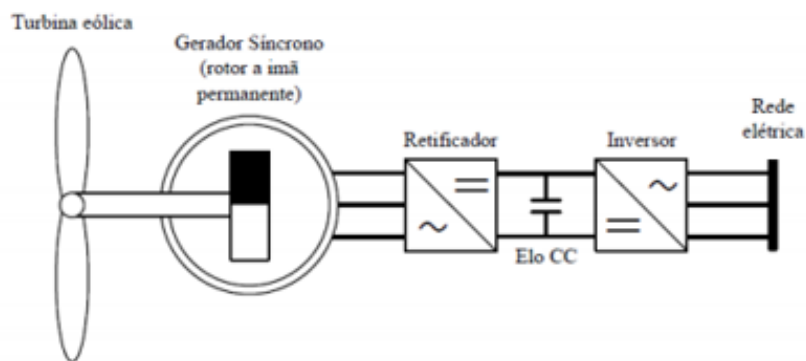


Figura 25 - Topologia Full Converter de um gerador eólico [42]

No Brasil, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) possui em seus Procedimentos de Rede (PROREDE), fórmulas e metodologias específicas para a medição de harmônicos e adequação dos acessantes que possuem cargas não lineares. Elas podem ser encontradas no Submódulo 2.8 – Gerenciamento dos Indicadores de Desempenho da Rede Básica e dos Barramentos dos Transformadores de Fronteira, e de Seus Componentes. A Tabela 4 apresenta os limites individuais da injeção de harmônicos localizados nos pontos de conexão à rede básica ou nos barramentos dos transformadores.

Tabela 4 – Limites individuais em porcentagem da tensão fundamental [43]

13,8 kV ≤ V < 69 kV				V ≥ 69 kV			
ÍMPARES		PARES		ÍMPARES		PARES	
ORDEM	VALOR(%)	ORDEM	VALOR(%)	ORDEM	VALOR(%)	ORDEM	VALOR(%)
3 a 25	1,5%			3 a 25	0,6%		
		todos	0,6%			todos	0,3%
≥27	0,7%			≥27	0,4%		
DTHTS95% = 3%				DTHTS95% = 1,5%			

DTHT - Distorsão de Tensão Harmônica Total

3.2.3.5. Potência Reativa

Embora a geração distribuída não possua a parcela de transmissão, sua inserção na rede elétrica principal pode ocasionar impacto no sistema de transmissão. Essa consequência decorre principalmente do possível aumento de potência reativa injetada pelos geradores distribuídos na rede. Essa potência reativa então, percorre o sistema elétrico interligado e pode sobrecarregar as linhas de transmissão que são dimensionadas para transportar um limite específico de potência aparente, sendo suas perdas relacionadas a transmissão da potência reativa que não pode ser utilizada como energia efetiva. Além disso, a variação da potência reativa na rede também pode ocasionar variações nos níveis de tensão do sistema, podendo provocar certos danos aos equipamentos e cargas conectados à rede.

Como foi visto anteriormente, a compensação de reativos pode ser um benefício dos sistemas de geração distribuída ao sistema elétrico. Entretanto, sua capacidade de gerar reativos, quando não regulamentada e não-alinhada à expansão desses sistemas na rede sem monitoramento e controle por parte das distribuidoras e operadoras, pode provocar consequências severas à segurança elétrica. Ademais, é necessário que exista uma coordenação para a compensação de reativo de forma conjunta com os sistemas de geração distribuída instalados individualmente.

Na Alemanha, a norma VDE-AR-N 4015 [28], publicada em 2011 com um período de transição até 2012, estabeleceu critério para a injeção de reativo proveniente dos sistemas de geração distribuída conectados na rede de distribuição de baixa tensão do país. Os requisitos da inserção de reativo dependem do tamanho do sistema e do ponto de conexão à rede convencional. Além disso, sistemas com potência instalada maior que 30 kW devem possuir uma conexão remota com os operadores de distribuição.

De acordo com a VDE-AR-N 4015 [28], para o controle da injeção de reativo na rede, os operadores podem recorrer a três diferentes métodos que incluem o fator de potência fixo, o fator de potência característico e o fator de potência reativa ou tensão característica. Devido a intermitência da fonte fotovoltaica na grande maioria dos sistemas de geração distribuída na Alemanha, o método do fator de potência fixo é preterido em função dos outros dois métodos que dependem da potência fornecida à rede e da tensão fornecida pelo sistema, respectivamente. Os limites da potência reativa injetada na rede são definidos por curvas apresentadas pelos operadores que, então,

conseguem monitorar remotamente esses sistemas de forma a impedir danos à rede elétrica principal.

Entretanto, o controle da potência reativa e do fator de potência do sistema podem ocasionar queda da potência ativa do sistema, prejudicando a geração e a economia esperada pelo consumidor. Além disso, a questão tarifária da potência ativa e reativa na rede são outros fatores ainda não conclusivos, principalmente, em locais onde há compensação financeira pela potência ativa injetada, como é o caso da Alemanha.

A Figura 26 apresenta um gráfico com os valores de potência aparente e reativa injetada na rede, o fator de potência do sistema e a economia com relação a potência ativa e reativa geradas por uma geração distribuída fotovoltaica na Alemanha com capacidade instalada de 30 kW.

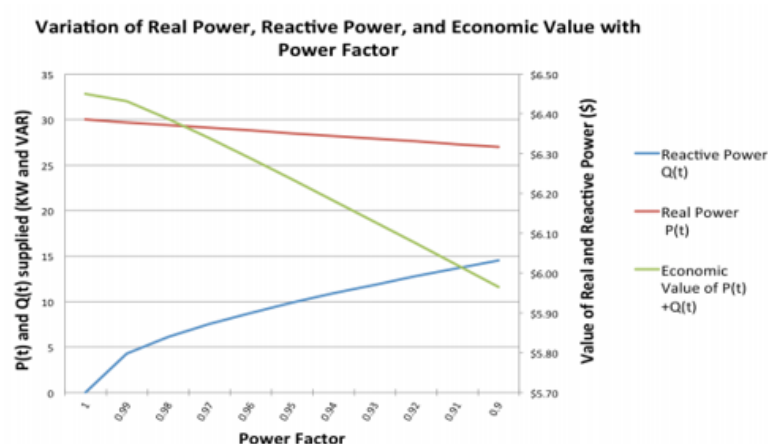


Figura 26 - Variação da Potência aparente, reativa, fator de potência e economia gerada por um sistema fotovoltaico de 30 kW na Alemanha [28]

Como pode ser observado na Figura 26, o aumento no fator de potência é inversamente proporcional a economia gerada pelo consumidor, considerando que a compensação financeira de uma distribuidora de energia na Alemanha difere na relação de aproximadamente 30 vezes entre a potência ativa e reativa injetada na rede pelos geradores distribuídos.

Atualmente no Brasil, a energia reativa injetada na rede pelos sistemas de geração distribuída não é regulamentada e padronizada tecnicamente pelos operadores e distribuidoras do sistema. Além disso, a potência reativa injetada na rede também não está inclusa no Sistema de Compensação de Energia Elétrica conforme a Resolução Normativa número 482/2012 publicada pela ANEEL [13], e retificada pela Resolução 687/2015 [44]. Dessa maneira, os sistemas de geração distribuída atuais devem obedecer

às limitações da legislação vigente com um fator de potência mínimo igual a 0,92 conforme a Resolução número 414/2010 publicado pela ANEEL [45].

A considerar, portanto, que a falta de regulamentação para a compensação de reativos pelos sistemas de geração distribuída pode ocasionar a queda do fator de potência no centro consumidor, devido à consequente diminuição do consumo de potência ativa do sistema elétrico principal provocada pela compensação da geração distribuída/carga, principalmente nos casos de sistemas fotovoltaicos em que o fator de potência é geralmente unitário. Dessa forma, grandes consumidores podem pagar multa pelo excesso de reativo na rede, fazendo com que a geração distribuída não se torne mais atrativa economicamente, além de ser um entrave técnico às distribuidoras de energia do sistema.

3.2.3.6. Sincronismo

Os sistemas de geração que são conectados à rede elétrica em locais afastados das grandes usinas e próximos dos centros consumidores devem ser religados de forma sincronizada com as formas de onda da tensão e da corrente ao sistema elétrico principal, de forma a minimizar as perturbações do sistema em operação normal.

Para o sistema de geração distribuída, portanto, o seu paralelismo com o sistema principal deve ser realizado com menor impacto possível, de modo que a diferença instantânea de potencial entre os pólos do disjuntor no ponto de conexão esteja próxima de zero, e ainda com frequência e amplitude em torno dos valores nominal da rede e defasagem nula das formas de onda [46].

No caso das distribuidoras de energia, o processo de sincronismo é especialmente importante devido ao procedimento muito comum do religamento automático na ocorrência de faltas transitórias e após a atuação das proteções. Nestas situações, o religamento automático reconecta a rede à carga e tem como objetivo restaurar os valores nominais da tensão do sistema elétrico principal após o defeito.

Com isso, a perda de sincronismo entre as conexões de diversos sistemas de geração distribuída, conectados próximos um dos outros e distantes dos grandes centros de geração do sistema global, pode resultar devido a diferentes contribuições às faltas e devido à necessidade de reajustes dos sistemas de proteção no sistema de geração distribuída, podendo provocar danos aos equipamentos e prejudicar a qualidade da energia fornecida para o consumidor final.

Outro cenário é a conexão de geradores distribuídos operando anteriormente em ilhamento. Neste caso, os ajustes do sistema já estavam estabelecidos de forma consistente entre a geração distribuída e carga alimentada, tornando-se um desafio conectá-los à rede de maneira suave sem que a carga e o sistema global sofram qualquer perturbação e sem que sejam necessários reajustes nos sistemas de proteção e de controle.

Capítulo 4

Estudo de Caso: Geração Distribuída Solar Fotovoltaica

Neste estudo de caso, vamos analisar um sistema solar fotovoltaico conectado à rede elétrica, sendo esta geração a mais comum dentre as gerações distribuídas no Brasil e no mundo. Pela Resolução Normativa número 482 publicada pela ANEEL em 2012 [13], e retificada pela Resolução Normativa número 687 de 2015 [44], temos que um sistema de microgeração abrange todos os sistemas de geração distribuída até 75 kW e um sistema de minigeração entre 75 kW e 5 MW.

Neste estudo de caso iremos considerar uma minigeração solar fotovoltaica com potência pico total de aproximadamente 0,40 MWp e instalada, hipoteticamente, na Universidade Federal do Rio de Janeiro, localizado na Ilha do Fundão e município do Rio de Janeiro, RJ.

Este estudo de caso tem como objetivo apresentar o anteprojeto e dimensionamento de um sistema solar fotovoltaico como complemento para a compreensão de um sistema de geração distribuída discutido durante o texto.

4.1. Local de Instalação

A Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) é uma instituição de ensino, pesquisa e extensão com sua sede localizada na Cidade Universitária no Rio de Janeiro, RJ [47].

O local de instalação escolhido para este estudo de caso está indicado na Figura 27. O principal motivo para a indicação deste local foi a proximidade da subestação da Ilha do Fundão à qual o sistema referido é suposto ser conectado. Além disso, a localidade possui boa exposição à radiação solar, visto que não foi verificado nenhum ponto de sombreamento que pudesse prejudicar a geração de energia pelo sistema. O local escolhido é um terreno terraplanado e sem construção.

apresenta os valores médios das estimativas do total diário de irradiação solar global incidente publicado pela DMA/CPTEC/INPE em parceria com a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) em 2006 [48].



Figura 28 - Localização das estações de medição de dados climatológico [48]

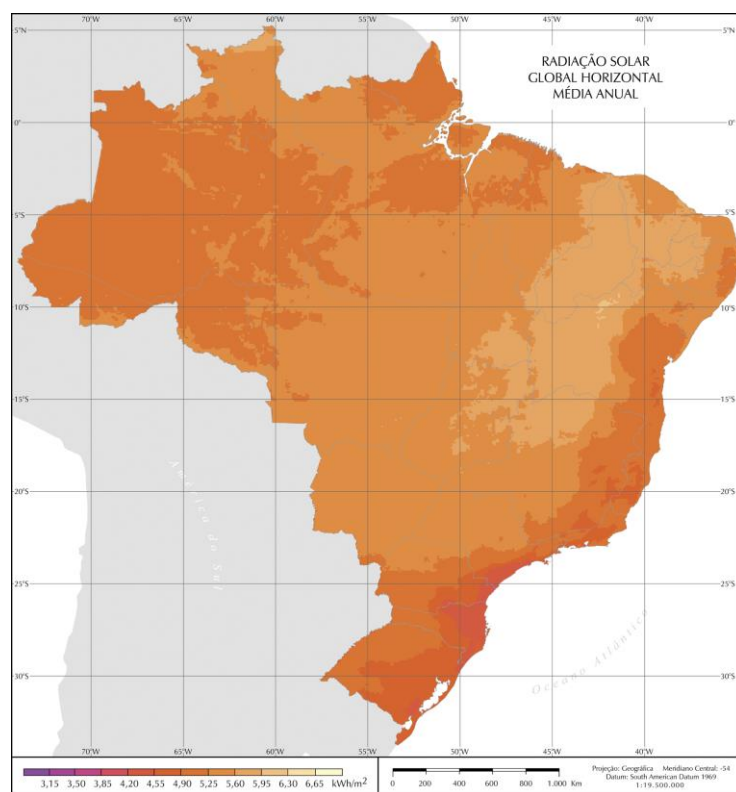


Figura 29 - Atlas Solarimétrico do Brasil [48]

A partir dos dados apresentados na Figura 29, pode-se concluir que o Brasil apresenta uma média de irradiação solar expressiva, de 1.500 a 2.500 kWh/m², sendo superior a países em que a energia solar já está consolidada, como na Alemanha, com irradiação solar média entre 900 e 1.250 kWh/m², e na Espanha, de 1.200 a 1.850 kWh/m² [48].

Para o respectivo estudo de caso, vamos utilizar os dados publicados pelo Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito (CRESESB) [49], para uma inclinação de 23 graus e no ponto mais próximo do local de instalação, conforme mostra a Tabela 5 e a Figura 30.

Tabela 5 - Irradiação Solar Diária Média Mensal no Rio de Janeiro para uma inclinação de 23°, dados retirados de [49]

Mês	Irradiação Solar Diária Média Mensal [kWh/m ² .dia]
Janeiro	5,29
Fevereiro	5,41
Março	5,38
Abril	4,56
Maio	4,76
Junho	4,14
Julho	4,85
Agosto	4,77
Setembro	4,47
Outubro	4,74
Novembro	4,85
Dezembro	5,01
Média	4,85

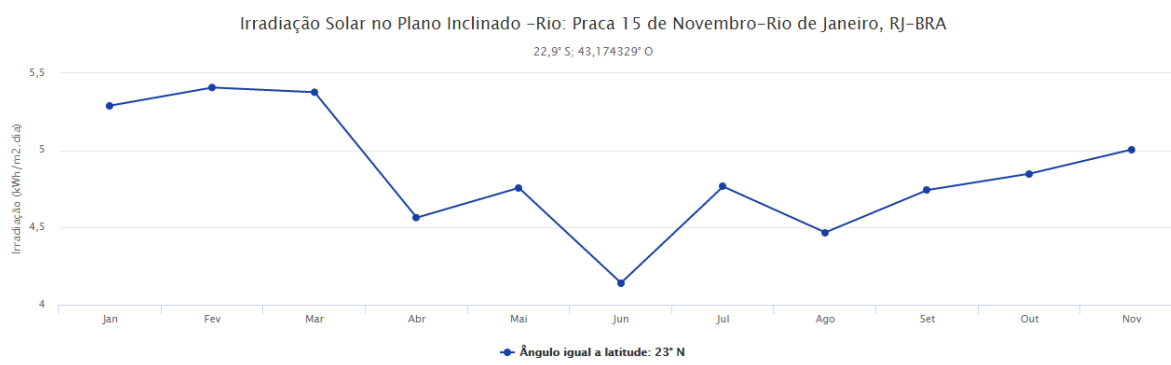


Figura 30 - Irradiação Solar Diária Média Mensal no Rio de Janeiro para uma inclinação de 23°, [49]

4.2.2. Geração Solar Estimada

A fim de estimarmos a geração de energia elétrica do sistema fotovoltaico (GE), vamos utilizar a Equação 2 a partir dos dados de potência pico total do sistema proveniente dos módulos fotovoltaicos, da irradiação solar média diária e considerando uma quantidade média de dias para todos os meses do ano igual a 30,40.

$$GE = \frac{\text{Potência Pico Total (kWp)} * \text{Irradiação Solar (kWh/m}^2\text{.dia)} * 30,4 \text{ dias}}{\text{Eficiência Total (\%)}}$$

Equação 2 - Geração Solar Estimada (kWh)

Para estimarmos o rendimento total do sistema, temos que as perdas totais podem ser consideradas em até 20%, incluindo as perdas do inversor, no cabeamento, e de irradiação solar variável durante o ano.

Dessa forma, utilizando a Equação 2 para dados referentes a irradiação solar mensal no local para 23 graus de inclinação, conforme a Tabela 5 e para um sistema com potência pico total igual a 408 kWp, temos que a geração solar estimada do sistema é dada conforme a Tabela 6 e a Figura 31.

Tabela 6 - Geração Solar Estimada Mensal (kWh)

Mês	Geração Solar Estimada Mensal [kWh]
Janeiro	52490,34
Fevereiro	53681,05
Março	53383,37

Abril	45246,87
Maio	47231,39
Junho	41079,40
Julho	48124,42
Agosto	47330,61
Setembro	44353,84
Outubro	47032,93
Novembro	48124,42
Dezembro	49712,03
Média	48149,22
Total	577790,67

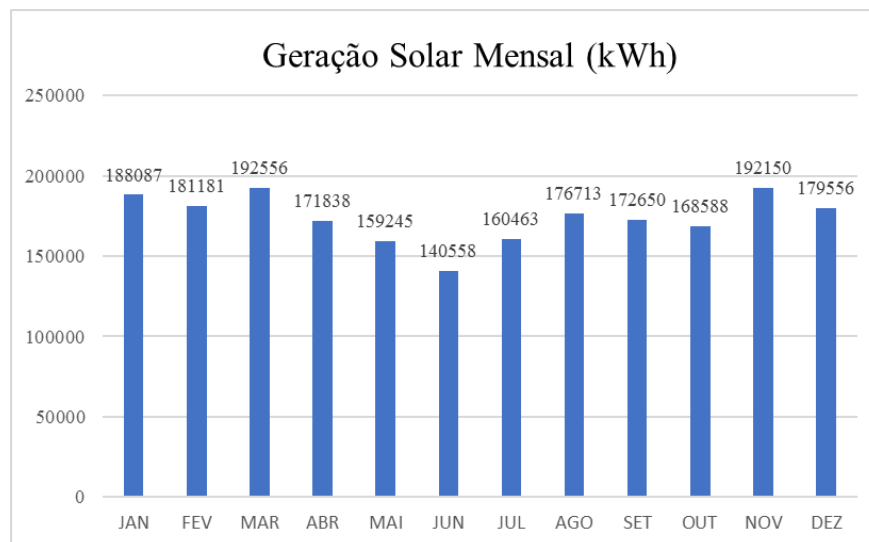


Figura 31 - Geração Solar Estimada do Projeto Fotovoltaico no Estudo de Caso

Assim, temos que o respectivo sistema fotovoltaico tem como geração solar estimada anual cerca de 577 MWh/ano e com uma produção média mensal de aproximadamente 48,15 MWh/mês. Caso haja disponibilidade do histórico do consumo energético da unidade consumidora conectada ao sistema, poderá ser realizada uma avaliação do percentual do consumo mensal previamente conhecido que irá utilizar a energia proveniente da geração distribuída solar fotovoltaica e com isso, poderá ser estudado o tempo de retorno do investimento para o sistema de geração e a economia mensal produzida pelo mesmo.

4.2.3. Fator de Capacidade

O fator de capacidade (FC) é um indicador de desempenho comumente utilizado como comparativo entre os diferentes sistemas de geração e pode ser encontrado a partir da Equação 3, sendo a razão entre a energia efetiva produzida pelo sistema em um determinado período de tempo e a energia produzida de forma ininterrupta durante o mesmo intervalo.

$$FC = \frac{\text{Produção Efetiva em } \Delta t \text{ (kWh)}}{\text{Capacidade Total Máxima em } \Delta t \text{ (kWh)}}$$

Equação 3 - Fator de Capacidade

Como exemplo no Brasil, de acordo com as informações publicados pelo Ministério de Minas e Energia (MME) em 2015 para dados coletados em dezembro de 2014 [50], temos que as usinas para gás industrial apresentaram fator de capacidade em torno de 61%, as usinas de biomassa em torno de 44%, as usinas de geração a óleo, 64%, as hidrelétricas, 73%, as usinas de geração a carvão mineral, 67%, as usinas nucleares, 88% e as usinas de geração eólica, 38%. A Usina Hidrelétrica de Itaipu alcançou um fator de capacidade operativa, sendo a razão da geração média e a capacidade de geração média disponível, dado por aproximadamente 99,3% em 2014 [51].

Dessa forma, podemos verificar que o sistema de geração de energia com maior índice de fator de capacidade são normalmente as usinas hidrelétricas, no caso de inexistência de estiagem ou presença de reservatórios, e as usinas nucleares, ambas por possuírem baixos índices de perdas como falhas de equipamentos ou manutenções, baixo custo de produção e por terem fontes primárias com grande disponibilidade.

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética em nota técnica de 2012 [52], os sistemas de geração solar possuem um fator de capacidade média equivalente a 17% nas regiões mais favoráveis do país, onde o nível de irradiação solar equivale a 1500 horas por ano.

Para o respectivo estudo de caso, vamos considerar o período de um ano com cada mês contendo 30,4 dias e sabendo que a geração anual é dada conforme a Tabela 6. Com isso, temos, como mostra a Equação 4, que o fator de capacidade do sistema de geração distribuída considerado é de, aproximadamente, 16,18%, conforme esperado.

$$FC (\%) = \frac{577790,67 \text{ kWh/ano}}{408 \text{ kWp} * 24 \text{ h} * 30,4 \text{ dias} * 12 \text{ meses}} * 100\% = 16,18 \%$$

Equação 4 - Fator de Capacidade do Sistema Fotovoltaico do Estudo de Caso

4.3. Equipamentos Principais

4.3.1. Módulo Fotovoltaico

Neste sistema de minigeração distribuída, será utilizado um módulo fotovoltaico de silício monocristalino composto por 72 células fotovoltaicas com as características apresentadas na Tabela 7, sob as condições de laboratório *Standard Test Conditions* (STC) dadas por uma temperatura da célula fotovoltaica igual a 25 graus Celsius, massa de ar (AM) equivalente a 1,5 e considerando uma irradiação solar de 1000 W/m² sobre o módulo fotovoltaico.

Tabela 7 - Características do Módulo Fotovoltaico

Características a STC	Valor Numérico	Unidade
Potência Pico	320,00	Wp
Tensão em Máxima Potência	33,00	V
Tensão em Circuito Aberto	40,00	V
Tensão Máxima	1000,00	V
Corrente em Máxima Potência	8,50	A
Corrente em Curto-Circuito	10,00	A
Coeficiente de Temperatura da Corrente	0,05	% / °C
Coeficiente de Temperatura da Tensão	- 0,30	% / °C
Eficiência	16,00%	%
Temperatura de Operação	-40 a +80	°C
Dimensões	1,00 x 1,90 x 0,40	m

A Figura 32 apresenta um módulo fotovoltaico de silício monocristalino de 72 células conforme o modelo que será considerado neste estudo de caso.

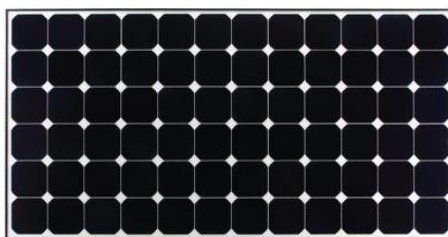


Figura 32 - Módulo Fotovoltaico de Silício Monocristalino de 72 Células Fotovoltaicas, [53]

Logo, a fim de dimensionarmos a quantidade e as conexões elétricas dos módulos fotovoltaicos ao respectivo sistema fotovoltaico, estimando uma limitação pelas restrições espaciais do local de instalação, vamos considerar um total de 1275 módulos fotovoltaicos com potência-pico unitária igual a 320 Wp, totalizando, assim, um sistema com capacidade instalada total equivalente a 408,00 kWp.

1.3.2. Inversor Fotovoltaico *Grid-Tie*

Os módulos fotovoltaicos produzem energia elétrica a partir da energia fotovoltaica. Entretanto, essa energia gerada pelos raios solares é na forma contínua e por isso, é necessário que haja um inversor no sistema entre a geração e a carga com o objetivo de converter a corrente e tensão contínuas na forma de onda alternada a 60 Hz, utilizada na alimentação das cargas da unidade consumidora.

Os inversores utilizados em sistemas de geração distribuída fotovoltaicos são fabricados especificamente para esse tipo de sistema, pois possuem proteções importantes para a conexão do sistema à rede elétrica. Por isso, são comumente chamados de inversores *grid-tie*, inversores para conexão ao sistema elétrico.

Uma das proteções mais importantes dos inversores *grid-tie* é a proteção anti-ilhamento que impede o sistema fotovoltaico de gerar quando o sistema elétrico não está fornecendo energia. No Brasil, essa proteção é um dos requisitos para que o consumidor consiga a permissão de acesso do seu sistema de geração distribuída na conexão com a rede.

Outra característica dos inversores fotovoltaicos é a metodologia de Seguidor do Ponto de Potência Máxima, o também denominado *Maximum Power Point Tracking* (MPPT), utilizado pelo algoritmo do controle para que o conversor sempre opere de forma a gerar a máxima potência permitida sob a tensão e corrente fornecidas pelo módulo. Esse

aspecto é importante devido a intermitência da fonte solar em curtos intervalos de tempo. Assim, para diferentes temperaturas e radiações solares, o módulo fotovoltaico produz uma tensão e corrente específica que é então ajustada pelo inversor para que seja atingido o ponto de máxima potência sob essas condições.

A Figura 33 apresenta o algoritmo do MPPT para definir o ciclo de trabalho do conversor utilizando o método denominado Perturbe e Observe, de forma que a tensão é variada para encontrar a cada ciclo um novo valor de potência e compará-lo com o valor anterior, até que seja obtida a máxima potência.

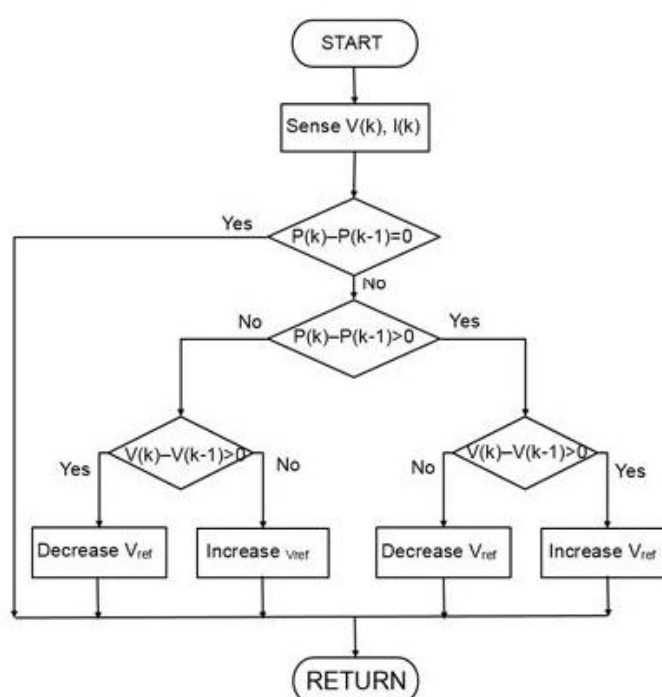


Figura 33 - Algoritmo para operação do MPPT no inversor grid-tie, MatLAB [54]

Neste estudo de caso, será utilizado um inversor de potência de saída igual a 100 kW e com as características apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Características do Inversor Grid-Tie

Características de Entrada	Valor Numérico	Unidade
Potência-Pico Recomendada	80,00	kWp
Tensão de Operação	350 até 800	V
Tensão Máxima	1000	V
Corrente Máxima	300	A

Número de MPPTs	1	Quantidade
Características de Saída	Valor Numérico	Unidade
Potência Nominal	1000	kW
Corrente Nominal	200	A
Tensão de Conexão	380	V
Número de Fases	3	Quantidade
Frequência de Operação	60	Hz
Distorção Harmônica	2	%
Características Gerais	Valor Numérico	Unidade
Eficiência	98	%
Temperatura de Operação	-15 até 40	°C
Consumo Noturno	50	W
Grau de Proteção	IP65	-

Para um sistema de geração distribuída solar fotovoltaico, é recomendado que a potência total dos inversores não seja igual ou maior que a potência-pico dos módulos, visto que as características fornecidas pelos fabricantes foram mensuradas em laboratório, em STC, e podem variar de acordo com a temperatura e radiação do local. Por isso, vamos considerar como margem de segurança que o inversor tenha uma potência de saída total aproximadamente 30% menor em relação a potência pico de entrada total dos módulos fotovoltaicos conforme suas folhas de dados.

Dessa forma, minimizamos os riscos de superdimensionamento que poderiam provocar aquecimento dos condutores, perda de rendimento devido a operação do sistema fora dos valores nominais e falhas, ou até mesmo queima do conversor sob solicitações elétrica e térmica superior àquelas definidas em projeto.

Assim, neste caso, para um sistema com capacidade instalada total de 408,00 kWp, teremos 03 inversores de potência de saída unitária 100 kWp, totalizando 0,3 MW, o que corresponde a 73,53% da potência pico total do sistema.

1.4. Conexão Elétrica

A fim de conectarmos 1275 módulos fotovoltaicos com potência unitária de 320 Wp aos 03 inversores com potência unitária de 100 kW, temos 425 módulos para cada

inversor, ou seja, 136 kWp de potência pico de entrada para 100 kW de potência nominal de saída.

Os três inversores serão conectados eletricamente aos módulos da mesma forma. Portanto, teremos para cada inversor o seguinte arranjo de módulos fotovoltaicos conectados em série e em paralelo apresentados na Tabela 9, de forma a ajustarmos sua corrente e tensão totais nos intervalos de operação nominal permitidas pelo inversor.

Tabela 9 - Conexão em Série e em Paralelo dos Módulos Fotovoltaicos para cada Inversor.

-	Quantidade	Corrente em Curto-Circuito Total (A)	Tensão em Circuito Aberto Total (V)
Módulos em Série	17	10,00	45 x 17 = 765
Módulos em Paralelo	25	10 a 25 = 250	45

Os valores dimensionados e apresentados na Tabela 9 são provenientes dos dados fornecidos pelos fabricantes do módulo para condições específicas da célula fotovoltaica no STC. Para uma operação segura com relação à variação da temperatura, vamos calcular também os valores de tensão e corrente fornecidos pelo módulo dentro da margem de temperatura do local de instalação do sistema fotovoltaico.

Dessa forma, para um sistema instalado no município do Rio de Janeiro, vamos considerar, de maneira conservadora, uma temperatura mínima de 5°C e uma temperatura máxima de 60°C na célula fotovoltaica.

Primeiramente, para os valores de tensão em determinada temperatura, vamos utilizar a Equação 5 e encontrarmos os valores de tensão totais para as condições de contorno da temperatura.

$$V_{oc}(T) = V_{ocSTC} * (1 + \beta * (T - 25)),$$

Equação 5 - Tensão em Circuito Aberto para uma Temperatura T

Sendo:

T a temperatura da célula fotovoltaica (°C);

$V_{oc}(T)$ a tensão em circuito aberto para uma temperatura T (V);

V_{ocSTC} a tensão em circuito aberto nas condições STC (V);

β o coeficiente de variação da temperatura da tensão de circuito aberto (%/°C).

Substituindo os valores da tensão em circuito aberto nas condições STC, o coeficiente de variação da tensão de circuito aberto fornecidas pelo fabricante e a temperatura entre 05°C e 60°C, temos os seguintes valores máximo mínimo da tensão de circuito aberto do sistema:

$$V_{oc}(5^{\circ}\text{C}) = 40\text{V} * (1 + (-0,3\%/^{\circ}\text{C}) * (5^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C})) = 42,40 \text{ V}$$

$$V_{oc}(60^{\circ}\text{C}) = 40\text{V} * (1 + (-0,3\%/^{\circ}\text{C}) * (60^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C})) = 35,80 \text{ V}$$

Assim, considerando-se 17 módulos conectados em série, temos que a tensão em circuito aberto total do sistema para as condições de temperatura limite inferior e superior serão, respectivamente, dadas por 720 V e 608,6 V. Logo, podemos inferir que esses valores se encontram dentro da faixa de operação da tensão permitida pelo inversor escolhido.

De forma similar, vamos calcular os valores da corrente de curto-circuito para as temperaturas mínima e máxima a partir da Equação 6.

$$I_{sc}(T) = I_{scSTC} * (1 + \alpha * (T - 25)),$$

Equação 6 - Corrente em Curto-Circuito para uma Temperatura T

Sendo:

$I_{sc}(T)$ a corrente em curto-circuito para uma temperatura T (V);

I_{scSTC} a corrente em curto-circuito nas condições STC (V);

α o coeficiente de variação de temperatura da corrente de curto-circuito (%/°C).

Assim, substituindo-se os valores da corrente de curto-circuito nas condições STC, o coeficiente de variação da corrente de curto-circuito fornecidas pelo fabricante e a temperatura pelos valores limites de 05°C e 60°C respectivamente, teremos:

$$I_{sc}(5^{\circ}\text{C}) = 10\text{V} * (1 + (0,05\%/^{\circ}\text{C}) * (5^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C})) = 9,90 \text{ A}$$

$$I_{sc}(60^{\circ}\text{C}) = 10\text{V} * (1 + (0,05\%/^{\circ}\text{C}) * (60^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C})) = 10,175 \text{ A}$$

Considerando 25 módulos conectados em paralelo para cada inversor, temos que os valores de corrente encontrados nas temperaturas limite inferior e superior são

respectivamente dados por 247,50 A e 254,375 A. Logo, podemos inferir que as solicitações elétricas e térmicas a que estarão submetidos os módulos fotovoltaicos estão conforme os limites de operação do inversor ao qual serão conectados.

1.5. Proteção

A proteção do sistema fotovoltaico deve ser dimensionada conforme as normas brasileiras vigentes para as instalações em baixa tensão [55], e possuir dispositivos de proteção específicos para o lado de corrente contínua e para o lado de corrente alternada.

Primeiramente, a jusante da saída dos módulos fotovoltaicos, são conectados fusíveis a fim de evitar que haja circulação de corrente reversa no caso de sombreamento ou falha de um ou mais módulos no circuito do painel fotovoltaico. Considerando-se uma margem de segurança igual a 1,5 da corrente de curto-circuito do módulo, dimensionamos o valor nominal do fusível a partir da Equação 7.

$$1,5 * I_{sc,módulo} \leq I_{nom,fusivel}$$

Equação 7 - Dimensionamento do Fusível

Após a seleção dos fusíveis, especifica-se é necessário que haja uma chave seccionadora para proteção de sobrecarga e com o objetivo de desenergização do circuito em situações emergenciais e para verificação ou manutenção. O dimensionamento da chave seccionadora foi realizado conforme a Equação 8, em que a corrente nominal da chave seccionadora deve ser limitada a capacidade máxima de corrente do condutor a ser utilizado e uma margem de segurança igual a 1,5 maior que a corrente nominal do circuito.

$$1,5 * I_{nom,circuito} \leq I_{nom,chave} \leq 1,45 * I_{máx,Condutor}$$

Equação 8 - Dimensionamento da Chave Seccionadora

Para o lado de corrente alternada, foram utilizados disjuntores para a saída de cada inversor e um disjuntor geral considerando todos os inversores conectados em paralelo. O dimensionamento do disjuntor foi realizado conforme a Equação 9 para valores nominais da corrente do circuito do sistema e do disjuntor e, para a máxima capacidade de interrupção de corrente suportada pelo condutor [55].

$$1,25 * I_{nom,circuito} \leq I_{nom,disjuntor} \leq 1,45 * I_{m\acute{a}x,condutor}$$

Equação 9 - Dimensionamento do Disjuntor

Por fim, com o objetivo de proteger o circuito na ocorrência de descargas atmosféricas, será conectado um conjunto de supressores de surto de tensão ou dispositivos de proteção contra surtos elétricos (DPS) específicos para corrente contínua e para corrente alternada nos dois lados do inversor.

Para a seleção do supressor correto, é necessária uma avaliação das condições locais com relação à ocorrência de raios e à existência de para-raios e malhas de aterramento no local. No caso, como o sistema fotovoltaico será instalado em um campo aberto, vamos considerar uma margem de segurança elevada, de modo que a corrente máxima suportada pelo DPS seja de 40 kA. Com relação a tensão, para o lado de corrente contínua, vamos considerar a tensão máxima fornecida pelos módulos e permitida pelo inversor, fixada em 1.000V.

De forma similar, para o lado de corrente alternada, vamos especificar a tensão do DPS CA considerando-se que a conexão do inversor com a rede elétrica é realizada em 380V. Os limites no dimensionamento e na especificação dos dispositivos de proteção podem ser aproximados para os valores superiores mais próximos de acordo com a disponibilidade do produto do fornecedor, sem que sejam ultrapassados os limites superiores de segurança associados ao condutor e aos circuitos.

1.6. Diagrama Unifilar

Por fim, a Figura 34 apresenta o diagrama unifilar do sistema fotovoltaico e seu respectivo sistema de proteção compostos por fusíveis, chave seccionadora, disjuntores e supressores de surtos de tensão em corrente contínua e em corrente alternada.

O sistema fotovoltaico é composto por 1275 módulos fotovoltaicos com potência unitária de 320 Wp e capacidade instalada total de 408 kWp, conectados a 03 inversores com potência nominal de saída unitária dada por 100 kW, totalizando uma potência total igual a 300 kW conectado em paralelo com a carga e à rede elétrica da distribuidora local.

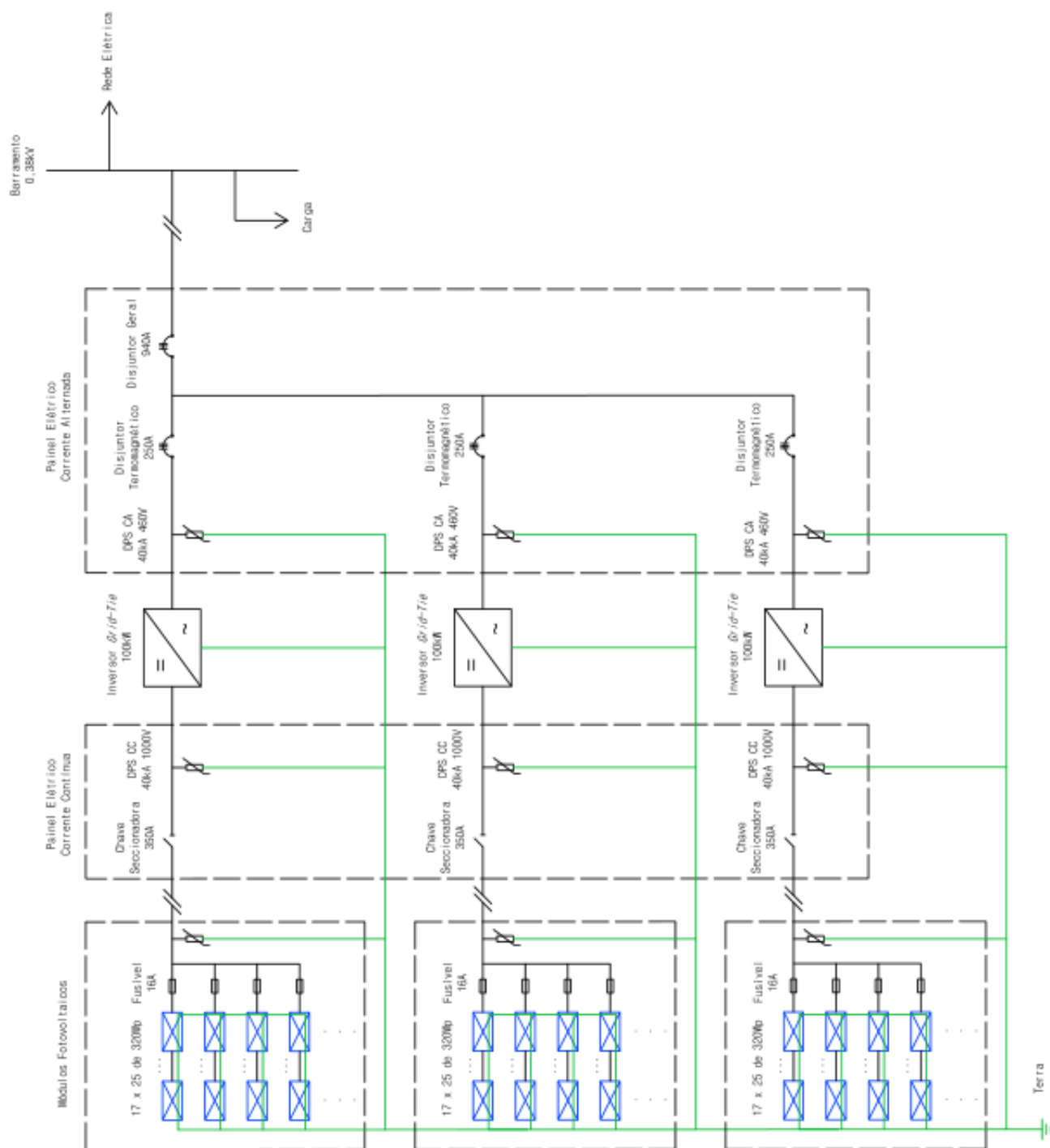


Figura 34 - Diagrama Unifilar do Sistema Fotovoltaico de 408 kWp

Capítulo 5

Conclusão

Neste trabalho foram analisados os impactos positivos e negativos da inserção e maximização da geração distribuída no sistema elétrico convencional nos moldes atuais e futuros. Com isso, foi possível verificar resultados muito específicos para cada localidade, regulamentação e nível de inserção do sistema de geração impossibilitando uma concordância absoluta entre os pesquisadores.

Além disso, foi analisado não só os impactos técnicos como também os econômicos, políticos e sociais, visto que esses fatores são determinantes no processo de desenvolvimento da sociedade como um todo.

Com isso, foi possível verificar que um dos fatores mais preponderantes, além dos técnicos, são os aspectos econômicos. Atualmente, o mundo presencia uma crise financeira que impacta consideravelmente todos os assuntos estratégicos e que inclui, principalmente, o setor energético. Por isso, são necessárias diversas avaliações para se obter resultados conclusivos sobre o custo benefício dos impactos da geração distribuída sobre o sistema convencional. Entre estas avaliações podemos citar a fixação de critérios de estabilidade apropriados, a verificação do efeito de fluxos de potência reverso e a previsão dos efeitos do desenvolvimento tecnológico sobre a evolução da rede e de todos os custos associados a estas avaliações e implementações no cenário mundial.

A fim de mitigar os impactos negativos e acelerar as vantagens que a geração distribuída pode trazer ao sistema elétrico e para a realidade atual, se faz necessário o desenvolvimento em muitos outros setores interligados à geração distribuída como pesquisa sobre sistemas de armazenamento, aumento da capacidade de transferência de potência das linhas de transmissão, coordenação dos sistemas de distribuição, instalação de monitoramento e controle remoto em conversores inteligentes, sem considerar os impactos políticos, econômicos e socioambientais dos mesmos.

Por fim, foi desenvolvido um estudo de caso para o dimensionamento de um sistema solar fotovoltaico conectado à rede elétrica de distribuição na Cidade Universitária da Universidade Federal do Rio de Janeiro, incluindo os requisitos e proteções necessárias para o seu pleno funcionamento e segurança.

Apesar de toda a discussão presente no âmbito da geração distribuída, espera-se que esse documento possa ter contribuído com informação e visualização sobre as

dificuldades deste setor e que tenha despertado interesse para que novas ideias e alternativas sejam criadas, estudadas, experimentadas e apresentadas a um assunto em evolução.

Referências Bibliográficas

- [1] HAGENS, N., LIKVERN, R., Global Energy Consumption. Based upon Data from BP Statistical Review 2014 (1965 – 2015) and Biomass From SMIL. Disponível em: <<https://fractionalflow.com/category/world-energy-consumption/>>. Acesso em: ago. 2016.
- [2] IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, Distributed Generation in Liberalised Electricity Markets. OECD/IEA. Paris, France, 2002.
- [3] REN21 – RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK FOR THE 21ST CENTURY, Renewables 2016 Global Status Report. ISBN 978-3-9818107-0-7. Paris, France, 2016.
- [4] REVESZ, R., UNEL, B., Managing the Future of The Electricity Grid: Distributed Generation and Net Metering. NYU School of Law. NYU Institute for Policy Integrity, New Your University Public Law and Legal Theory Working Papers. NELLCO Legal Scholarship Repositor, 2016.
- [5] CEPEL – CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA; CRESESB – CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO BRITO, Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro, RJ, 2014.
- [6] ALMEIDA, E., ROSA, A. C., DIAS, F. C. L. S., BRAZ, K. T. M., LANA, L. T. C., SANTO, O. C. E., SACRAMENTO, T. C. B., Energia Solar Fotovoltaica: Revisão Bibliográfica, 2016.
- [7] SOLAR PV RENEWABLE ENERGY. Disponível em: <<http://www.solarpv.co.uk/solar-pv-cells.html>>. Acesso em: dez. 2016.
- [8] WOGAN, D., Manufacturing Scale, not Cheap Labor, driving China's Solar PV Price Advantage. Scientific American, 2013. Disponível em

<<https://blogs.scientificamerican.com/plugged-in/manufacturing-scale-not-cheap-labor-driving-chinae28099s-solar-pv-price-advantage/>>. Acesso em: ago. 2016.

[9] KUETHE, T.H., LFFT, J., MOREHART, M., The Influence of Urban Areas on Farmland Values, 2011. Disponível em: <<http://www.choicesmagazine.org/choices-magazine/theme-articles/farmland-values/the-influence-of-urban-areas-on-farmland-values>>. Acesso em: set. 2016.

[10] SOLAIRE BY SUN POWER. Photovoltaic System at Rutgers University. Disponível em <<http://solaireregeneration.com/project/rutgers-university/>>. Acesso em: ago. 2016.

[11] TEC21, Europäischer Solarpreis geht an Aktiv-Stadthaus in Frankfurt. Disponível em: <<https://www.espazium.ch/europischer-solarpreis-geht-an-aktivstadthaus-in-frankfurt>>. Acesso em: ago. 2016.

[12] TESLA MOTORS 2016 – ENERGY. Solar Roof. Disponível em <<http://www.tesla.com>>. Acesso em: set. 2016.

[13] ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, Resolução Normativa Nº 482, de 17 de abril de 2012. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: jul. 2016.

[14] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, The Potential Benefits of Distributed Generation and Rate-Related Issues That May Impede Their Expansion. A Study Pursuant to Section 1817 of The Energy Policy Act of 2005, Fev. 2007.

[15] ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, O que é o SIN – Sistema Interligado Nacional. Disponível em: <http://www.ons.org.br/conheca_sistema/o_que_e_sin.aspx>. Acesso em: set. 2016.

[16] EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA., Nota Técnica DA 19/15 - Projeção da Demanda de Energia Elétrica – para os próximos 5 anos (2016-2020). Rio de Janeiro, RJ, 2015. Disponível

em:

<<http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/DEA%2019-15%20-%20Proje%C3%A7%C3%B5es%20da%20Demanda%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%202016-2020.pdf>>. Acesso em: dez. 2016.

[17] MINISTRY OF FOREIGN AFFAIRS OF THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA, White Papers of the Government. Progress in China's Human Rights Cause in 1996. Beijing, China, Mar. 1997. Disponível em: <http://www.fmprc.gov.cn/mfa_eng/topics_665678/3711_665954/t18983.shtml>. Acesso em: set. 2016.

[18] MULLER, N. Z., MENDELSON, R., Measuring the Damages of Air Pollution in the United States. School of Forestry and Environmental Studies, Yale University. New Haven, United States, Jan. 2007. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Robert_Mendelsohn/publication/222582256_Measuring_the_damages_of_air_pollution_in_the_United_States/links/53da5fe80cf2a19ee884bda.pdf>. Acesso em: set. 2016.

[19] MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, ProGD - Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica. Ações de Estímulo à Geração Distribuída com base em Fontes Renováveis. Brasília, DF, 2015. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/10584/3013891/15.12.2015+Apresenta%C3%A7%C3%A3o+ProGD/bee12bc8-e635-42f2-b66c-fa5cb507fd06?version=1.0>>. Acesso: set. 2016.

[20] ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, Registro de Micro e Mini Geradores Distribuídos, Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/gd.asp>>. Acesso em: out. 2016.

[21] EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Nota Técnica DAE 12/16 – Avaliação da Eficiência Energética e Geração Distribuída para os próximos 10 anos (2015-2024). Rio de Janeiro, RJ, Abr.

2016. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/DEA%2012-16%20-%20Ef%20energetica%202015-2024.pdf>>. Acesso em: set. 2016.

[22] MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, Plano de Expansão e Melhorias do Setor Elétrico do Estado do Amazonas. Ministro Eduardo Braga. Brasil, Abr. 2015.

[23] CERQUEIRA, P. G., MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, Programa Luz para Todos – Projetos Especiais – Atendimento de Comunidades Isoladas. MME/SEE/DPUE. São Paulo, SP, Mai. 2011. Disponível em: <http://www.iee.usp.br/lfs/sites/default/files/Apresentacao_Paulo_Cerqueira.pdf>. Acesso em: out. 2016.

[24] ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, Boletim de Carga Especial. Diretoria de Planejamento e Programação da Operação (DPP). Gerência Executiva de Metodologias, Modelos e Cargas (GMC) – Gerência de Previsão e Acompanhamento da Carga (GMC1), 2015. Disponível em: <http://www.ons.org.br/download/sala_imprensa/BoletimEspecial_20151022.pdf>. Acesso em: out. 2016.

[25] ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, Espaço do Consumidor – Perdas de Energia. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=801&idPerfil=4>>. Acesso em: out. 2016.

[26] ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, Informativo ONS – ONS Apresenta Relatório Final Sobre Blecaute de 2009. Ano I – n.o 06 – novembro/2009. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/newsletters/informativos/nov2009/06-materia01.html>>. Acesso: out. 2016.

[27] PINTO, A., ZILLES, R., BET, I., Excedente de Reativos em Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede. IV Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferência Latino-Americana da ISES. São Paulo, SP, 2012. Disponível em: <http://www.acquaviva.com.br/cd_cbens/trabalhos/t245.pdf>. Acesso em: out. 2016.

[28] VDE – ASSOCIATION FOR ELECTRICAL, ELECTRONIC & INFORMATION TECHNOLOGIES. Disponível em: <<https://www.vde.com/en>>. Acesso em: dez. 2016.

[29] SMA SOLAR TECHNOLOGY, Backgrounds, Requirements, and SMA Solutions. PV Grid Integration. Technology Compendium 3.4. 4th Revised Edition, Mai. 2012. Disponível em: < <http://files.sma.de/dl/10040/PV-Netzint-AEN123016w.pdf>>. Acesso em: out. 2016.

[30] ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. Revisão 7, 2014.

[31] LORA, E. S., HADDAD, J., Geração Distribuída Aspectos Tecnológicos, Ambientais e Institucionais. Editora Interciência, Rio de Janeiro, RJ, 2006.

[32] IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, About Smart Grids. Topic Electricity. Disponível em: <<http://www.iea.org/topics/electricity/subtopics/smartgrids/>>. Acesso em: out. 2016.

[33] MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Portaria N.o 440, de 15 de Abril de 2010 – Criação do Grupo de Trabalho – Programa Brasileiro de Rede elétrica Inteligente – *Smart Grid*. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/1256641/Relatxrio_GT_Smart_Grid_Portaria_440-2010.pdf/3661c46c-5f86-4274-b8d7-72d72e7e1157>. Acesso em: out. 2016.

[34] ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, Procedimentos de Rede (PROREDE) – Submódulo 12.2 – Instalação do Sistema de Medição para Faturamento. Revisão 1, 2004. Disponível em: <<http://www.ons.org.br>>. Acesso em: dez. 2016.

[35] ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, Chamada 011/2010 – Projeto Estratégico: Programa Brasileiro de rede Elétrica Inteligente. Superintendência de Pesquisa e Desenvolvimento e Eficiência Energética – SPE. Brasília, DF, Jul. 2010.

Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/PeD_2008-ChamadaPE11-2010.pdf>. Acesso em: nov. 2016.

[36] QUERALT, J. P., PhD Thesis - Control of Voltage Source Converters for Distributed Generation in Microgrid. Catalonia Institute for Energy Research. Universitat Politècnica de Catalunya. Electrical Engineering Department. Barcelona, Itália, Jun. 2015.

[37] RIVERA, R., ESPOSITO, A. S., TEIXEIRA, I. Redes Elétricas Inteligentes (smart grid): Oportunidade para Adensamento Produtivo e Tecnológico Local. BNDES – Banco Nacional do Desenvolvimento. Biblioteca Digital. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2927/1/RB%2040%20Redes%20el%C3%A9tricas%20inteligentes_P.pdf>. Acesso em: nov. 2016.

[38] ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição – Seção 3.7 – Acesso de Micro e Minigeração Distribuída. Revisão 6, 2015.

[39] ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Perguntas e Respostas sobre a aplicação da Resolução Normativa nº 482/2012 – atualizado em 1/03/2016. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/FAQ_GD_Atualizado.pdf>. Acesso em: jan. 2016.

[40] LUIZ, C., Avaliação dos Impactos da Geração Distribuída para Proteção do Sistema Elétrico. Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – PPGEE. Belo Horizonte, MG, Mai. 2012. Disponível em: <<http://www.ppgee.ufmg.br/defesas/877M.PDF>>. Acesso em: nov. 2016.

[41] REZENDE, P. H. O., SAMESIMA, M. I., Efeitos do Desequilíbrio de Tensões de Suprimentos nos Motores de Indução Trifásico. Disponível em: <<http://www.seer.ufu.br/index.php/horizontecientifico/article/viewFile/4473/11857>>. Acesso em nov. 2016.

[42] BLOCK, P., A., B., RETORTA, F., S., DAHIKE, D., B., TEIXEIRA, M., D., Estudo Comparativo do Desempenho Harmônico de Aerogeradores. Institutos LACTEC. P Brazil Wind Power 2015. Paraná, 2015. Disponível em: <http://www2.ctee.com.br/brazilwindpower/2015/papers/Pedro_A_B_Block.pdf>. Acesso em: dez. 2016.

[43] ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, Procedimentos de Rede (PROREDE) – Submódulo 2.8 – Gerenciamento dos Indicadores de Desempenho da Rede Básica e dos Barramentos dos Transformadores de Fronteira, e de seus Componentes. Revisão 2.0, 2011. Disponível em: <<http://www.ons.org.br>>. Acesso em: dez. 2016.

[44] ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, Resolução Normativa Nº 687, de 24 de novembro de 2015. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: jul. 2016.

[45] ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, Resolução Normativa Nº 414, de 09 de setembro de 2010. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2010414.pdf?>>. Acesso em: jul. 2016.

[46] NEVES, M. S., Desenvolvimento e Implementação de Métodos de Sincronismo Aplicados a Sistemas de Geração Distribuída. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Elétrica. Rio de Janeiro, RJ, 2016. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10016426.pdf>>. Acesso em: dez. 2016.

[47] UFRJ – UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, Perguntas Frequentes. Disponível em: <<https://ufrj.br/perguntas-frequentes/#sobre>>. Acesso em: dez. 2016.

[48] PEREIRA, E. B., MARTINS, F. R., ABREU, S., L., RUTHER, R., Atlas Brasileiro de Energia Solar. DMA/CPTEC/INPE/MCT. 1ª Edição. São José dos Campos, 2006.

Disponível em: <http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/brazil_solar_atlas_R1.pdf>.
Acesso em: dez. 2016.

[49] CEPEL – CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA; CRESESB – CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO BRITO. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>>. Acesso em: dez. 2016.

[50] MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, Capacidade Instalada de Geração Elétrica Brasil e Mundo (2014). Edição 05/08/2015. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/1138787/0/Capacidade+Instalada+de+EE+2014.pdf/cb1d150d-0b52-4f65-a86b-b368ee715463>>. Acesso em: dez. 2016.

[51] ITAIPU BINACIONAL, Fator de Capacidade Operativa. Disponível em: <<https://www.itaipu.gov.br/energia/fator-de-capacidade-operativa>>. Acesso em: dez. 2016.

[52] EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Nota Técnica EPE – Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira. Rio de Janeiro, RJ, Mai. 2012. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/geracao/documents/estudos_23/nt_energiasolar_2012.pdf>. Acesso em: dez. 2016.

[53] SOLAR FACTS AND ADVICE, 8 Good Reasons Why Monocrystalline Solar Panels are the Industry Standard. Disponível em: <<http://www.solar-facts-and-advice.com/monocrystalline.html>>. Acesso em jul. 2016.

[54] MATHWORKS, MPPT Algorithm – Implement Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithms for photovoltaic systems using MATLAB and Simulink. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/discovery/mppt-algorithm.html>>. Acesso em: dez. 2016.

[55] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-5410 - Instalações Elétricas de Baixa Tensão I - ABNT NBR 5410:2004.