

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
ENGENHARIA ELÉTRICA

FÁBIO OLIVEIRA DE JESUS

**IMPACTO DA MICROGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO SISTEMA
INTERLIGADO NACIONAL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2020

FÁBIO OLIVEIRA DE JESUS

**IMPACTO DA MICROGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO SISTEMA
INTERLIGADO NACIONAL**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel.

Orientadora: Profa. Dra. Gabriela Helena Bauab Shiguemoto.

CORNÉLIO PROCÓPIO
2020



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento Acadêmico de Elétrica
Curso de Engenharia Elétrica



FOLHA DE APROVAÇÃO

Fábio Oliveira de Jesus

Impacto da microgeração de energia elétrica no sistema interligado nacional

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 14:30hs do dia 10/09/2020 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Dr(a). Gabriela Helena Bauab Shiguemoto - Presidente (Orientador)

Prof(a). Dr(a). Edson Aparecido Rozas Theodoro - (Membro)

Prof(a). Esp. Ulisses Pereira Rosa Borges - (Membro)

Dedico este trabalho a meus amigos e familiares que estiveram comigo durante minha graduação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha orientadora Profa. Dra. Gabriela Helena Bauab Shiguemoto, pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória.

Aos meus colegas de sala.

A Secretaria do Curso, pela cooperação.

Gostaria de deixar registrado também, o meu reconhecimento à minha família, pois acredito que sem o apoio deles seria muito difícil vencer esse desafio.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização deste trabalho.

A persistência é o caminho do êxito.
(Charles Chaplin)

RESUMO

JESUS, Fábio Oliveira de. **IMPACTO DA MICROGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL**: 2020. 41 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2020.

O presente trabalho tem como tema o impacto da microgeração de energia elétrica no sistema interligado nacional. Onde o objetivo é fazer um estudo, analisando os impactos da micro e mini geração distribuída no sistema interligado nacional de diferentes países, analisando as ações que foram tomadas nesses lugares e comparando seus históricos com a atual situação do Brasil, para ter uma ideia mais clara de quais são os próximos passos a serem tomados na tentativa de diminuir os impactos que a adesão em massa dessa nova modalidade de geração irá causar no sistema já existente. Durante o decorrer do trabalho são explicados alguns tópicos essenciais para o entendimento do tema, é também observado que a mini e micro geração distribuídas utilizam em sua maior parte dos ventos ou do sol como fonte geradora, e foi dado um foco maior a energia solar, por ser a tecnologia, entre essas duas, que mais cresce no momento. Para que o estudo comparativo pudesse ser realizado foram analisados dois casos de dois países diferentes: Alemanha e Estados Unidos e além deles também foram citadas ações tomadas em diversos lugares ao redor do mundo quando os principais problemas da geração distribuída, que são similares na grande maioria dos casos, começaram a surgir. Essas ações vão desde ajustes técnicos em equipamentos das subestações à incentivos financeiros por parte dos governos. Além disso pode-se perceber que apesar de alguns lugares estarem à frente na questão da mini e micro geração distribuída, ainda existem novas tecnologias sendo desenvolvidas para amenizar ou até mesmo eliminar os impactos no sistema interligado. Com toda essa informação em mãos é possível enxergar os principais pontos falhos no sistema brasileiro e assim ter um direcionamento do que deverá ser feito com relação a esse assunto em um futuro próximo.

Palavras-chave: Micro. Mini. Geração Distribuída. Eletricidade. Sistema.

ABSTRACT

JESUS, Fábio Oliveira de. **IMPACTO DA MICROGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL**: 2020. 41 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2020.

The present paper has as its subject the impact of the microgeneration of electricity in the national interconnected system. Where its objective is to conduct a study analyzing the impacts of the mini and micro distributed generation in the national interconnected system of different countries, analyzing the actions that were taken in those places and comparing their background with the current situation of Brazil, to then have a clearer idea of what are the next steps to be taken in the attempt to lessen the impacts that the massive adhesion of this new modality of generation will cause in the existing system. During the course of the paper some topics are explained, these topics are essential to the understanding of the theme. It is also observed that the mini and micro distributed generation utilizes mostly the winds and the sun as its generating source and it was given a greater focus to the solar energy because it's the technology, between the two, that is growing the most at the moment. In order to conduct this comparative study two situations of two different countries were analyzed: United States and Germany and besides them the action taken by other places around the world when the main problems of the distributed generation, that are very similar in most cases, started to rise. Those actions went from technical adjustments on substations equipment to financial incentives from their respective governments. Furthermore, despite some places being ahead on the mini and micro generation subject, there are still new technologies being developed to mitigate or even eliminate all the impacts in the interconnected system. With all this information at hand it is possible to visualize the main weak points in the Brazilian system and then have a direction to what needs to be done regarding this subject in a near future.

Keywords: Micro. Mini. Distributed Generation. Electricity. Technology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Número de conexões acumuladas	12
Figura 2 - Sistema Elétrico de Potência	15
Figura 3 – Matriz Elétrica Brasileira	16
Figura 4 - Sistema Isolado Brasileiro	17
Figura 5 - Variação do PIB e do consumo de energia global	18
Figura 6 - Componentes de uma tarifa de energia elétrica	20
Figura 7 - Valores médios da tarifa divididos	20
Figura 8 - Simplificação do sistema de crédito	24
Figura 9 - Capacidade Solar instalada mundialmente	27
Figura 10 - Capacidade Eólica instalada mundialmente	28
Figura 11 - Intermitência da geração solar.....	29
Figura 12 - Curvas de Carga.....	30
Figura 13 - Análise da geração solar na Alemanha.....	31
Figura 14 - Suavização da curva de carga	35

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1.	Justificativa	13
1.2.	Objetivo Geral	13
1.2.1.	Objetivos Específicos	13
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1.	Sistemas Elétricos de Potência	14
2.1.1.	Geração	15
2.1.2.	Transmissão	16
2.1.3.	Distribuição	17
2.2.	Consumo de energia elétrica	18
2.3.	Mercado de energia elétrica no Brasil	19
2.3.1.	Ambiente de contratação regulada	21
2.3.2.	Ambiente de contratação livre	21
2.4.	Geração Distribuída	22
2.4.1.	Micro e minigeração distribuída	22
2.5.	Sistema de compensação de energia elétrica	23
2.6.	Fontes Despacháveis	24
2.7.	Sistemas de proteção e controle	25
2.7.1.	Proteção de sistemas elétricos de potência	25
2.7.2.	Controle de sistemas elétricos de potência	26
3.	DESENVOLVIMENTO	27
3.1.	Diferentes tipos de geração distribuída e seus impactos	27
3.2.	Impactos da micro e mini geração	28
3.2.1.	Impactos na rede elétrica	28
3.2.2.	Estudo de caso: Alemanha	31
3.2.3.	Principais problemas no Brasil	32
3.3.	Possíveis soluções	33
3.3.1.	Incentivos regulatórios e fiscais	33
3.3.2.	Novas tecnologias	34
3.3.2.1.	<i>Vehicle to Grid (V2G)</i>	34
4.	CONCLUSÃO	37
	REFERÊNCIAS	38

1 INTRODUÇÃO

Segundo Leão (2009), de todas as formas de energia, a energia elétrica é considerada uma das mais nobres. Por ser facilmente gerada, transportada, distribuída e transformada em outros tipos de energia, ela tem uma característica de universalização e se disseminou por todos os lugares do planeta e, assim como alimento e moradia, é considerada um direito humano básico.

Ainda segundo Leão (2009), atualmente existe uma constante dependência da eletricidade e isso se traduz em uma maior exigência por qualidade por parte dos usuários. Estes usuários de acordo com The World Bank (2018) correspondem a 87% da população mundial.

E partindo da extrema importância da eletricidade no mundo contemporâneo é que novos estudos envolvendo os sistemas elétricos são cada vez mais requisitados para o aprimoramento dessa área.

Segundo Firjan (2016), o desenvolvimento de um país está intimamente ligado com um aumento no consumo de energia elétrica. Sendo assim, o Brasil ainda precisa de grandes avanços no que diz respeito ao setor energético.

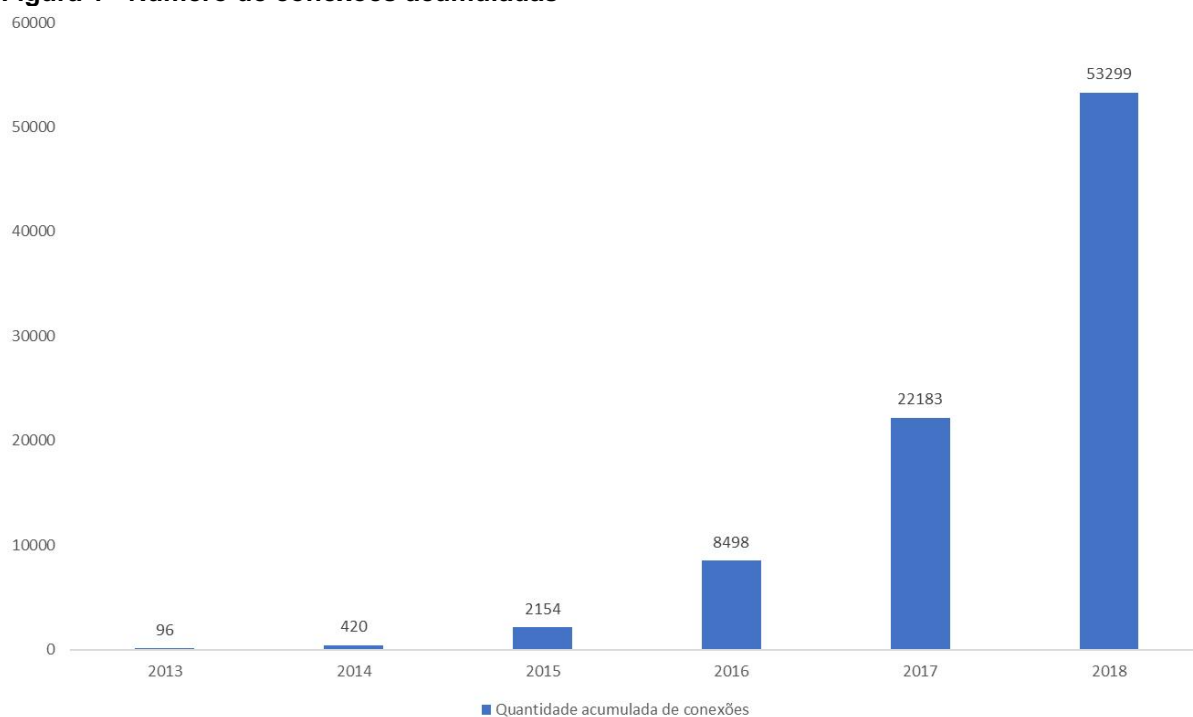
De acordo com Falcão (2013), devido à dificuldade de megaempreendimentos no setor elétrico brasileiro, seja por conta dos locais de maior aproveitamento hidroelétrico estarem afastados, ou por questões ambientais e econômicas, o setor energético passou a ver na microgeração uma alternativa para sua expansão e, desde 2012, a ANEEL tem produzido resoluções que favorecem esse tipo de geração.

“O uso de microgeração oferece grandes desafios. As primeiras barreiras encontradas foram as referentes a regulamentação, barreiras técnicas de conexão das microunidades, a rede de distribuição, questões de ordem econômica em razão do alto custo de instalação e longo tempo de retorno do investimento, divulgação de informações e conhecimento técnico para venda e instalação que ocasionam dúvidas sobre a real eficiência e confiabilidade por parte dos usuários.” (FRIGO, 2013)

Ainda, segundo Frigo (2013), a microgeração tem ganhado importância em países desenvolvidos como Inglaterra, Estados Unidos e Alemanha, pois os consumidores têm se interessado em gerar sua própria energia e ao mesmo tempo contribuir com o meio ambiente.

E desde que essa modalidade de consumo foi regulada no Brasil pela ANEEL a partir de 2010, o número de consumidores aumenta a cada ano, como ilustra a figura 1:

Figura 1 - Número de conexões acumuladas



Fonte: Adaptado de Aneel (2019)

Segundo Aneel (2016), esse crescimento acelerado tem como um dos fatores a regularização do sistema de compensação de energia elétrica, aprovado pela ANEEL em 2012, o que, em outras palavras, gera economia para os usuários.

O cenário atual apresenta sinais que esse crescimento não irá desacelerar em nenhum momento próximo e serão necessárias novas informações e novos estudos para que esse avanço não diminua e que a microgeração auxilie na expansão do sistema elétrico brasileiro.

1.1. Justificativa

Como visto anteriormente, a energia elétrica é extremamente importante e está intimamente ligada com o desenvolvimento de um país, quando um país começa a se desenvolver o consumo de energia aumenta. O Brasil, por se tratar de um país em desenvolvimento, necessita desse aumento no consumo para poder crescer, porém, gerar, transmitir e distribuir energia elétrica, não é algo que se faça rapidamente, e a microgeração aparece como uma possível solução para esse problema.

Porém, por se tratar de algo muito recente para o mercado energético brasileiro, são necessários alguns estudos no que diz respeito aos impactos que esse novo tipo de geração irá causar no sistema elétrico atual.

Existem alguns países, principalmente na Europa, que adotam a microgeração há mais tempo. Coletar informações desses locais, dos tipos de problemas que tiveram e dos que estão tendo será muito benéfico, pois a microgeração é uma tendência mundial e essa modalidade de geração só tende a crescer no Brasil.

1.2. Objetivo Geral

Esse trabalho tem como objetivo realizar um estudo comparativo, entre países diferentes, dos impactos no sistema interligado nacional caso a microgeração fosse adotada por uma parcela maior de consumidores se comparados com o número atual de praticantes dessa modalidade de consumo.

1.2.1. Objetivos Específicos

- Realizar uma pesquisa sobre os diferentes impactos da microgeração.
- Coletar dados de países que já utilizam essa modalidade a mais tempo, e os impactos causados no sistema interligado nacional.
- Comparar os resultados dos estudos com a atual situação do SIN brasileiro.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para melhor compreensão do problema apresentado e da análise que será realizada, é necessário conhecer alguns fundamentos.

2.1. Sistemas Elétricos de Potência

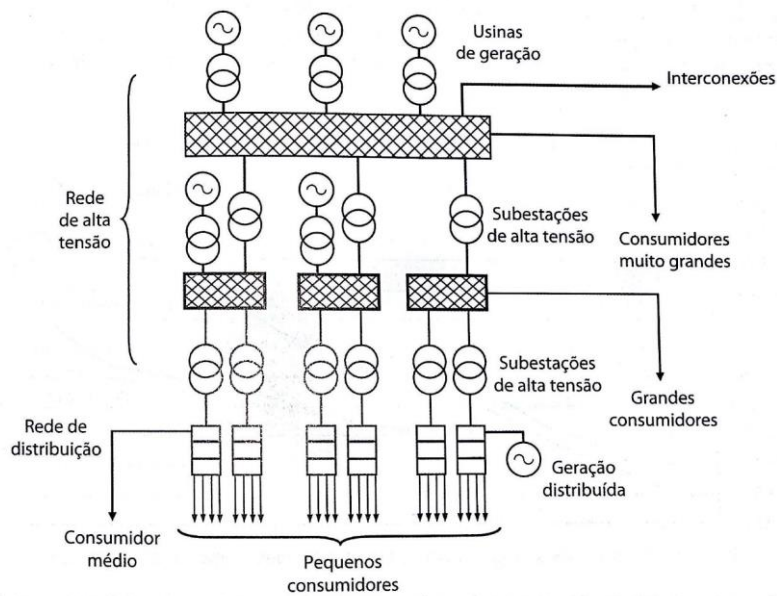
Desde o começo do uso de energia elétrica no âmbito comercial, nos anos de 1880, os sistemas que entregam essa energia têm se tornado maiores e interconectados. No começo um “sistema de potência padrão” consistia de um único gerador conectado em uma carga que ele suportava. [...] A partir do começo dos anos 90 iniciou-se um processo de interconexão desses pequenos sistemas, junto com uma expansão geográfica conseguindo alcançar cada vez mais consumidores. (MEIER, 2006, p 144, tradução nossa)

Porém, de acordo com Stevenson (1986), a interligação dos sistemas trouxe muitos problemas, como, por exemplo, o aumento da corrente circulando nas linhas de transmissão. Entretanto, por se tratar de algo que vem se desenvolvendo desde os anos de 1880, a maioria deles já foi satisfatoriamente resolvido.

Ainda segundo o Stevenson (1986), o aperfeiçoamento e expansão de um sistema de potência não é algo simples. São necessários vários tipos de estudo como, por exemplo, estudos de carga, cálculo de faltas, projetos de proteção contra descargas atmosféricas, dentre outros.

Mas, para que isso se realize, é necessário entender como é dividido o sistema elétrico. De acordo com Cañizares et al. (2011), resumidamente, é formado por usinas de energia elétrica localizadas onde existam fontes de energia primárias, na forma de energia potencial da água ou outros combustíveis e as chamadas redes de transmissão e distribuição, responsáveis por transportar potência elétrica do ponto de geração para o ponto de consumo, conectando o sistema inteiro e trabalhando de forma integrada. A figura 2 apresenta um exemplo de um sistema elétrico de potência.

Figura 2 - Sistema Elétrico de Potência



Fonte: (Cañizares et al, 2011, p 7)

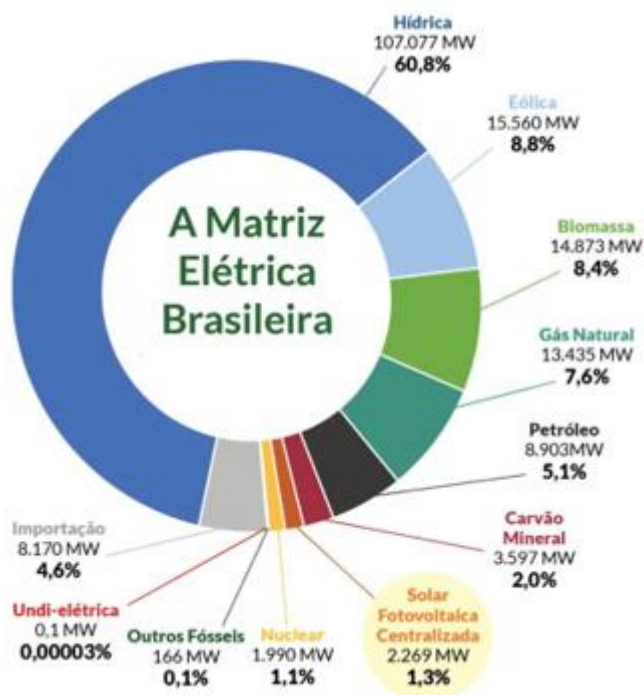
2.1.1. Geração

"A energia necessária para atender as necessidades de consumo é gerada em centros de produção comumente chamados de usinas de geração onde a fonte primária de energia é transformada em potência elétrica." (CAÑIZARES et al., 2011, p 13),

Ou ainda, segundo Leão (2009): "Na geração de energia elétrica uma tensão alternada é produzida, a qual é expressa por uma onda senoidal, com frequência fixa e amplitude que varia conforme a modalidade do atendimento em baixa média ou alta tensão."

No Brasil, segundo Leão (2009), o sistema de produção de energia elétrica é predominantemente hidroelétrico, pois a maior parte de sua capacidade instalada é composta por usinas hidroelétricas que estão distribuídas por todo o Brasil em 12 bacias hidrográficas diferentes. A figura 3 apresenta um resumo da matriz elétrica brasileira.

Figura 3 – Matriz Elétrica Brasileira



Fonte: Adaptado de Aneel (2019)

2.1.2. Transmissão

A rede de transmissão conecta grandes centros de produção localizados geograficamente de forma esparsa para os eixos de demanda, geralmente localizados perto de cidades e de áreas industriais, e mantém um sistema elétrico plenamente interconectado e em operação. (CAÑIZARES et al, 2011, p 17)

De acordo com CBIE (2019), o segmento de transmissão do sistema interligado nacional brasileiro é composto por mais de 140 mil quilômetros de linhas. Segundo Aneel (2008), essa grande extensão do sistema de transmissão pode ser explicada pelo fato do segmento de geração ser majoritariamente hidroelétrico e tais hidroelétricas estão instaladas em localidades distantes dos centros consumidores.

Além de sua grande extensão, outra característica da transmissão é a sua divisão em dois grandes blocos. O Sistema Interligado Nacional (SIN), que abrange grande parte do território brasileiro, e os sistemas isolados, que estão instalados principalmente na região norte. (Figura 4)

Figura 4 - Sistema Isolado Brasileiro



Fonte: Adaptado de Aneel (2008)

2.1.3. Distribuição

"As redes de distribuição alimentam consumidores industriais de médio e pequeno porte, consumidores comerciais e de serviços e consumidores residenciais." (LEÃO, 2009, p 18)

Segundo Aneel (2008), o mercado de distribuição de energia elétrica é formado por 64 concessionárias que são responsáveis pelo atendimento das unidades consumidoras. Essas distribuidoras são o elo entre o setor de energia elétrica e a sociedade, visto que são essas empresas que recebem a energia das companhias de transmissão e abastecem os consumidores do país.

ABRADEE (2019) divide as redes de distribuição em 3 grupos:

- Redes de subtransmissão: São linhas de distribuição com tensão que entre 69 kV e 230kV.

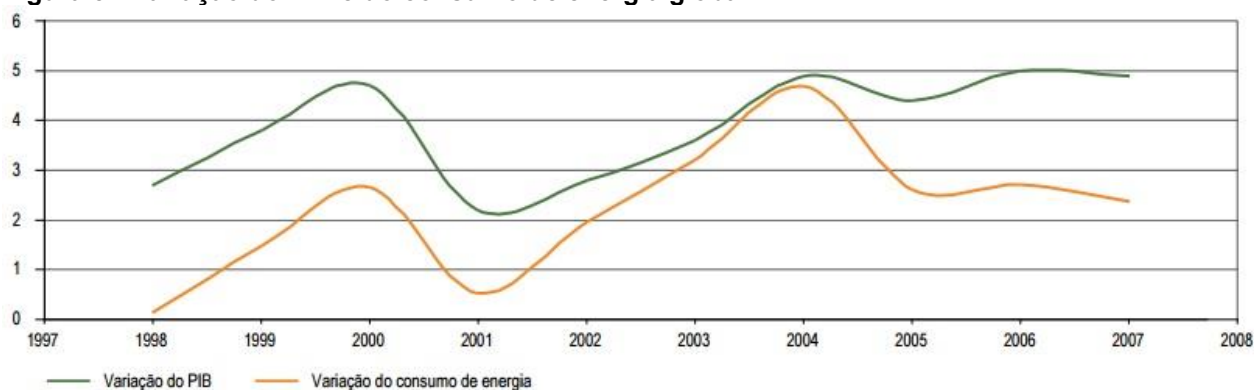
- Redes de média tensão: São linhas de distribuição com tensão entre 2,5 kV e 44 kV, facilmente vistas pelas ruas e avenidas das cidades, onde são frequentemente compostas por 3 fios condutores aéreos, sustentados por cruzetas de madeira em postes de concreto.
- Redes de baixa tensão: São redes com tensão entre 110 V e 440 V, são as linhas de distribuição que levam a energia para as casas e comércios, também facilmente observáveis no dia-a-dias.

2.2. Consumo de energia elétrica

O consumo de energia elétrica representa um dos indicadores mais claros do desenvolvimento industrial dos países e está muito relacionado com o crescimento do PIB. [...] Junto a isso o consumo pode ser usado como medida de desenvolvimento social. O consumo per capita da eletricidade, principalmente o grau de eletrificação de um país, isto é, a porcentagem da população que mora em casas eletrificadas, fornece uma indicação clara do padrão de vida. (CAÑIZARES et al., 2011, p 8).

Esta afirmação de Cañizares pode ser observada na figura 5, onde estão apresentadas as curvas de variação do PIB mundial e a variação do consumo de energia global:

Figura 5 - Variação do PIB e do consumo de energia global



Fonte: Aneel (2008)

Segundo Cañizares et al. (2011), o consumo é caracterizado por uma variedade de itens. Do ponto de vista tecnológico, porém, os dois itens mais importantes são a potência que é medida em watts (W) e a energia que é medida em (Wh). A potência é, portanto, a energia instantânea consumida e o sistema têm que ser todo projetado para suportar a máxima energia instantânea consumida para que possa funcionar sem nenhum empecilho.

2.3. Mercado de energia elétrica no Brasil

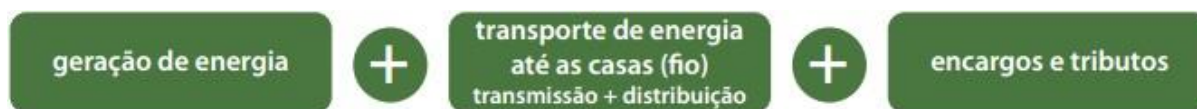
Passou mais de uma década desde quando o governo federal fez a aquisição de todas as ações de empresas concessionárias para que elas passassem a ser constituídas 100% de capital nacional, até o ano de 1993, quando seguindo a tendência de países como a Inglaterra, o Brasil deu seu primeiro passo rumo ao surgimento do mercado livre. (GOMES, 2013, p 25)

Segundo Aneel (2008), o consumo da energia elétrica no Brasil até a década de 1990 era feita com uma única tarifa independente de sua localidade Porém, esse sistema não incentivava a busca pela eficiência por parte das distribuidoras, e a partir de 1993, as tarifas passaram a ser fixadas pela empresa considerando as características específicas de cada região, como por exemplo o número de consumidores e o tamanho do mercado.

O governo brasileiro utilizava as estatais como instrumento de captação de financiamentos externos e também no controle dos preços e tarifas para fins de combate à inflação, o que reduziu a rentabilidade das empresas e os recursos para investimentos. (MAGALHÃES, 2009)

As faturas mensais emitidas pela distribuidora registram a quantidade de energia elétrica, medida em kWh, e o valor final e ser pago pelo cliente corresponde a soma de três componentes. (Figura 6)

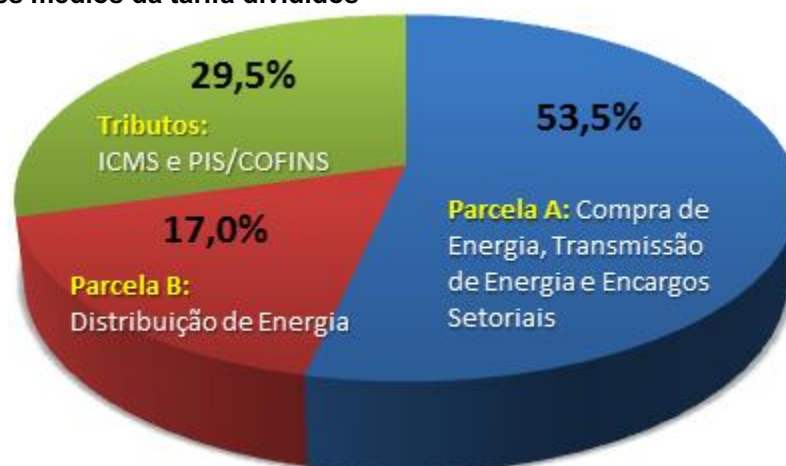
Figura 6 - Componentes de uma tarifa de energia elétrica



Fonte: Aneel (2008)

“Quando a conta de luz chega ao consumidor, ele paga a compra de energia, a transmissão e a distribuição, mais os encargos e tributos, determinados por lei, destinados ao poder público.” (ANEEL, 2008). As parcelas que compõem uma conta de energia podem ser vistas na Figura 7:

Figura 7 - Valores médios da tarifa divididos



Fonte: Aneel (2019)

No ano de 2001 o setor elétrico brasileiro sofreu uma grave crise de abastecimento, que culminou em um plano de racionamento de energia elétrica. (ANABUKI et al., 2013)

Ainda segundo Anabuki (2013), esse acontecimento gerou uma série de perguntas relacionadas ao rumo que o setor elétrico brasileiro estava tomando e, a partir de 2003, se estabeleceram novas regras para a expansão do parque de geração e para a contratação do mercado livre e do mercado regulado de energia. Essas mudanças abriram caminho para que a energia elétrica fosse tratada como mercadoria passível de comercialização, seguindo tendências mundiais. Porém, essa

abertura não ocorreu de forma completa e, atualmente, existem dois mercados diferentes de energia elétrica, um no ambiente de contratação regulada (ACR), também chamado de mercado cativo e outro no ambiente de contratação livre (ACL), também chamado de mercado livre.

2.3.1. Ambiente de contratação regulada

O ACR ou mercado cativo é o ambiente de contratação de energia elétrica no qual o papel do consumidor é totalmente passivo. A energia é fornecida exclusivamente pela distribuidora local, com preço e demais condições de fornecimento reguladas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). (ANABUKI et al, 2013)

Ainda segundo o Anabuki (2013), os consumidores inseridos nesse tipo de regulamentação estão divididos em dois grupos:

- Grupo A

O grupo A é composto por unidades consumidoras onde o fornecimento de tensão é igual ou superior a 2,3 kV, ou atendidas em um sistema subterrâneo de distribuição.

- Grupo B

O grupo B é composto por unidades consumidoras onde o fornecimento de tensão é inferior a 2,3 kV.

2.3.2. Ambiente de contratação livre

O ACL ou mercado livre é o ambiente de contratação de energia elétrica em que a energia é tratada como uma mercadoria qualquer, passível de comercialização. O consumidor livre pode comprar montantes de energia de comercializadores e/ou geradores e as condições (preço, prazo, volume, indexador etc.) são pactuadas entre as partes. (ANABUKI et al, 2013)

Anabuki (2013) ainda afirma que o ACL foi instituído no final dos anos 90 e atualmente conta com 28% do volume total de energia elétrica no país. Esses consumidores são divididos em 3 grupos:

Produtores independentes: Geradores de energia elétrica que operam sob o regime de resolução autorizativa cedida¹ pela ANEEL a cada empreendimento.

Comercializadora: Empresas independentes que adquirem energia para vendê-la a consumidores livres.

Clientes livres: Clientes que tem a possibilidade de escolher seus fornecedores e negociarem as condições contratuais, incluindo o preço.

2.4. Geração Distribuída

De acordo com Pepermans et al (2003), a definição de geração distribuída pode variar em alguns pontos dependendo do país, mas todas as definições concordam que a geração distribuída ocorre quando a energia gerada não é centralizada e não passa pelas linhas de transmissão, sendo enviada diretamente para as linhas de distribuição.

O autor salienta imensos benefícios dessa forma de geração, principalmente econômicos, a desregularização do mercado de energia e o aumento dos investimentos em qualidade de energia. Além disso é apresentado que esse interesse em descentralizar unidades geradoras é na verdade um retorno a antigos costumes, pois quando a energia elétrica começou a ser utilizada, as unidades geradoras ficavam próximas dos centros consumidores e não existiam linhas de transmissão. (Pepermans, 2003)

2.4.1. Micro e minigeração distribuída

¹ Documento cedido pela Aneel individualmente à cada empreendimento, autorizando a entrada no mercado livre de energia.

“A micro e a mini geração [...] distribuída consiste na produção de energia elétrica a partir de pequenas centrais geradoras que utilizam fontes renováveis de energia elétrica [...], conectadas a rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras. [...] A microgeração distribuída refere-se a uma central geradora de energia elétrica com potência instalada menor ou igual a 75 quilowatts (kW) enquanto que a mini geração distribuída diz respeito às centrais geradoras com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 megawatt (MW), para a fonte hídrica, ou 5 MW para as demais fontes.” (ANEEL, 2016, p09)

Segundo o Aneel (2016), a microgeração em sua grande maioria se dá por fontes renováveis e suas unidades geradoras são de pequeno porte e instaladas próximas ao consumidor, o que gera benefícios, como a postergação de investimentos em expansão nos sistemas de distribuição e transmissão, baixos impacto ambientais, melhoria do nível de tensão da rede e diversificação da matriz energética.

De acordo com EECA (2010), pode-se dividir a microgeração basicamente em dois tipos, a *off-grid* e a *grid-connected*. A microgeração *offgrid* é aquela onde a energia é gerada pelo consumidor, porém esse consumidor não está conectado à rede de transmissão. Normalmente esse fato acontece, pois o usuário está localizado em um local distante, e seria caro conectar-se à rede de transmissão mais próxima. Esse tipo de microgeração pode ser algo simples como um gerador a diesel gerando energia, ou todo um sistema utilizando de diversas fontes como fotovoltaica, eólica ou hidroelétrica o que reduz os custos de manutenção e gasto com combustíveis fósseis.

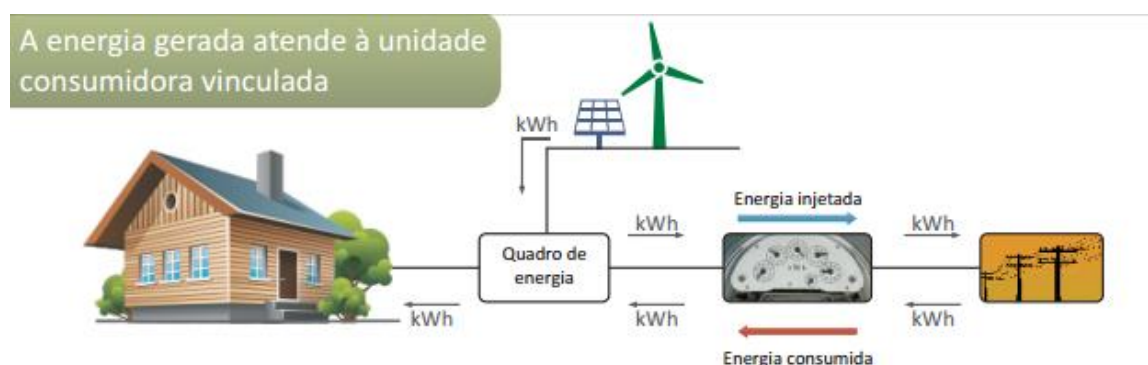
Já a microgeração *grid-connected* é aquela onde o consumidor gera energia, em sua maior parte fotovoltaica e está conectado à rede de transmissão, além disso o excesso de energia pode ser vendido a rede de energia.

2.5. Sistema de compensação de energia elétrica

“Esse sistema permite que a energia excedente gerada pela unidade consumidora com microgeração seja injetada na rede da distribuidora, a qual funcionará como uma bateria armazenando esse excedente.” (ANEEL, 2016)

Segundo Aneel (2016), quando há um excedente de energia gerada, o consumidor receberá um crédito em kWh, que poderá ser usado para abater nos meses subsequentes válidos por até 60 meses. A figura 8 apresenta um esquema simplificado de como o sistema de crédito funciona.

Figura 8 - Simplificação do sistema de crédito



Fonte: Adaptado de Aneel (2008)

2.6. Fontes Despacháveis

“Uma fonte despachável de energia refere-se a um sistema elétrico, como por exemplo uma unidade geradora que pode ser ligada ou desligada, em outras palavras a saída de potência para a rede elétrica, pode ser controlada conforme a demanda.” (HANANIA et al, 2020, p01)

Hanania (2016) também cita que as fontes despacháveis devem ser capazes de ligar ou desligar em intervalos breves de tempo, que podem variar de alguns segundos a algumas horas, dependendo da necessidade por eletricidade em um determinado momento. O autor classifica a velocidade das fontes em 3 e dá alguns exemplos como mostra o quadro 1:

Quadro 1

Velocidade	Fonte
Rápido (segundos)	Capacitores Usinas Hidroelétricas
Médio (minutos)	Turbinas de gás natural
Lento (horas)	Biomassa Nuclear Carvão Mineral

Fonte Hanania (2016)

2.7. Sistemas de proteção e controle

Para melhor entendimento, os sistemas de proteção e controle foram divididos em dois tópicos.

2.7.1. Proteção de sistemas elétricos de potência

De acordo com Góes (2016), a proteção em um sistema elétrico de potência tem dois objetivos principais: o fornecimento de energia com o mínimo número possível de interrupções e garantir a segurança dos equipamentos e instalações presentes naquele sistema.

Um sistema de proteção deve garantir rapidamente o processamento correto de defeitos e faltas e aplicar ações corretivas para que o sistema volte para sua condição normal de operação.

Os principais equipamentos presentes em um sistema de proteção são, em resumo, transformadores de corrente, transformadores de potencial, relés auxiliares e relés de proteção.

Além disso existem diferentes filosofias de proteção e as principais delas são apresentadas a seguir:

- Proteção de sobrecorrente: Uma proteção simples que analisa a magnitude da corrente elétrica e atua caso esse valor seja maior do que o limite estabelecido previamente.
- Proteção direcional: Proteção que supervisiona a proteção de sobrecorrente, descrita anteriormente, para que em sistemas em anel a proteção não derrube todo o sistema, e sim apenas o local onde ocorreu a falta.
- Proteção de distância: Proteção que localiza o ponto da linha de transmissão onde ocorreu a falta.

2.7.2. Controle de sistemas elétricos de potência

Ainda segundo Góes (2016), um sistema de proteção precisa operar juntamente com um sistema de controle. Os sistemas de controle mais antigos utilizavam de diversos dispositivos mecânicos para realizar suas funções, que consistem, resumidamente, em chaveamento, intertravamento, alarme, registro de perturbação e medição, sendo que tudo isso era conectado através de uma enorme quantidade de fios, o que acabava se tornando um problema.

Os sistemas modernos utilizam sistemas de controle digital como, por exemplo, o SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) que utilizam de redes e fibras óticas para realizar a transmissão de dados e o gerenciamento dos sistemas elétricos.

3. DESENVOLVIMENTO

3.1. Diferentes tipos de geração distribuída e seus impactos

Conforme mostram as figuras 9 e 10, a geração, solar e eólica, estão em alta ao redor do mundo, porém, quando fala-se em micro e mini geração distribuída a energia solar prevalece. Segundo Rowlatt (2009), um estudo conduzido no Reino Unido provou que pequenas turbinas eólicas possuem uma péssima relação custo benefício. E a resposta para isso é bem simples, uma breve equação matemática mostra como calcular a potência gerada por uma turbina eólica.

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \times A_{coleta} \times V_{wind}^3 \quad (1)$$

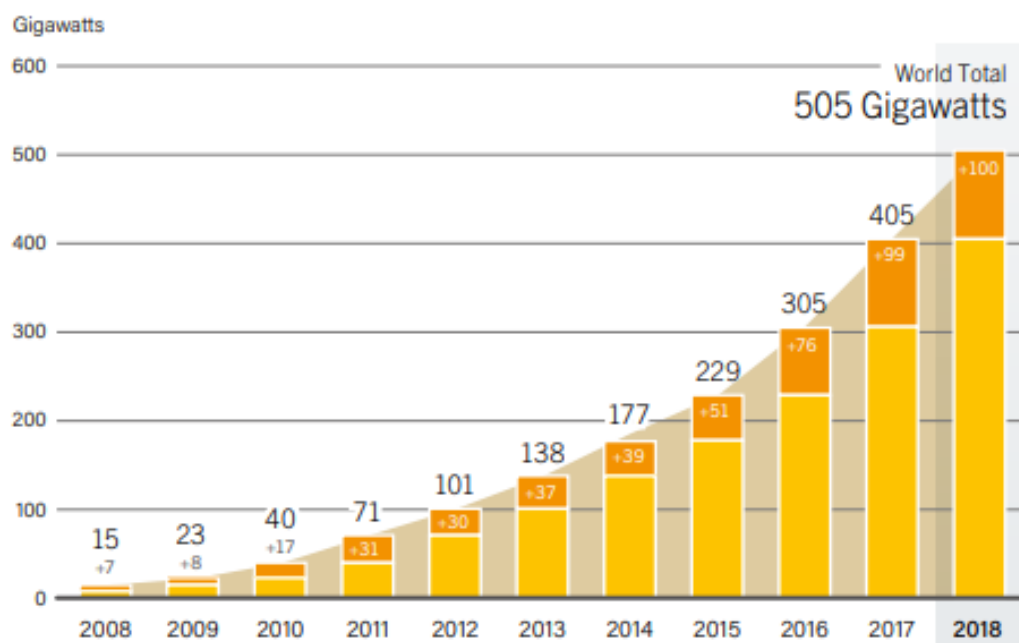
Onde:

P_{wind} = Potência gerada pela turbina eólica;

A_{coleta} = Área de coleta do vento (Área das pás somadas);

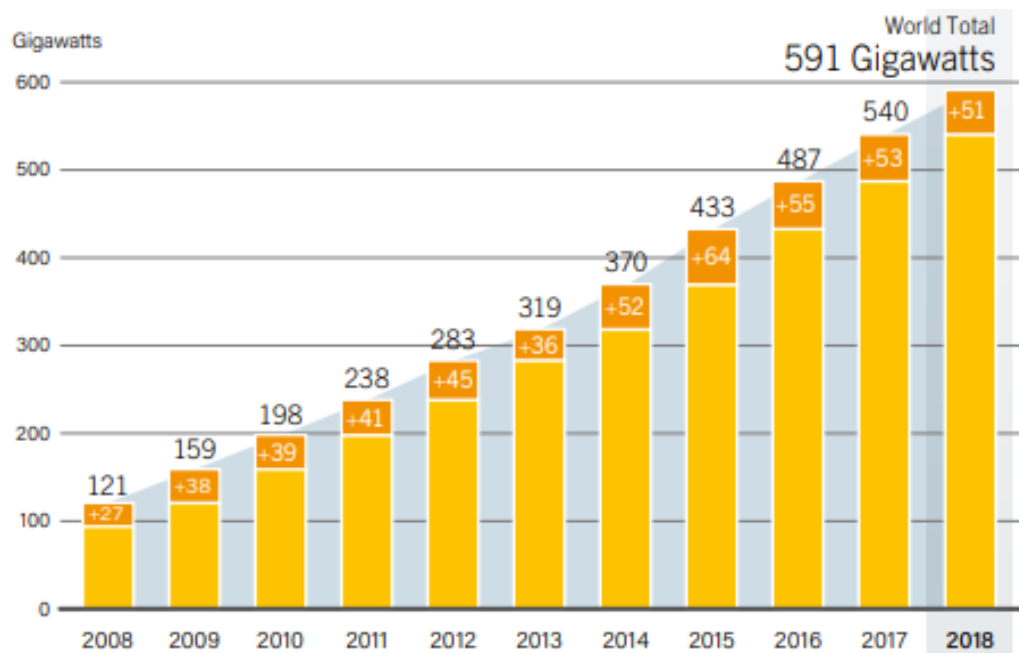
V_{wind}^3 = Velocidade do vento ao cubo.

Figura 9 - Capacidade Solar instalada mundialmente



Fonte: Adaptado de REN21 (2019)

Figura 10 - Capacidade Eólica instalada mundialmente



Fonte: Adaptado de REN 21 (2019)

Com essa equação pode-se observar que a potência gerada por uma turbina eólica é diretamente relacionada a dois fatores: o tamanho da turbina e a força do vento.

Como a micro e mini geração são focadas na geração de energia em centros urbanos, conforme visto anteriormente, a geração por meio de energia eólica se torna inviável, pois não é possível, em centros urbanos, ter grandes turbinas eólicas e nem ventos fortes o suficiente para gerar uma quantidade considerável de energia.

Além disso, Guerreiro (2016) cita que a variação anual média da geração solar ao redor do mundo, é muito menor que a eólica e inclusive a hidráulica, pois a intensidade solar é muito mais constante do que a intensidade dos ventos e chuvas.

Por esses e outros motivos, quando se fala de micro e mini geração existe um foco muito maior em energia solar e esse trabalho também irá focar nesse aspecto.

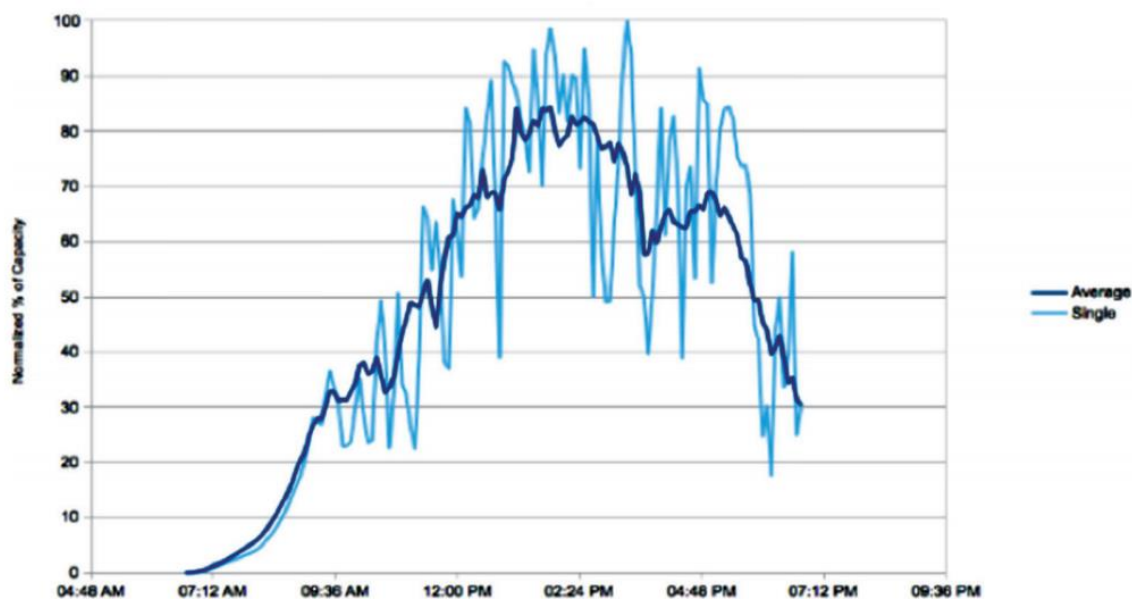
3.2. Impactos da micro e mini geração

3.2.1. Impactos na rede elétrica

“Atualmente, existe uma forte tendência de expandir a parcela de fontes alternativas de energia na matriz energética brasileira. A difusão dessas novas unidades geradoras na rede elétrica leva a uma mudança de paradigma relacionado a geração no setor, já que fontes solares e eólicas tem como principal característica a intermitência.” (CASTRO et al, 2016, p 23)

A figura 11 mostra a intermitência solar citada por Castro (2016), onde pode-se observar duas curvas, a curva de um dia de geração de uma placa solar e o valor médio dessa mesma geração.

Figura 11 - Intermitência da geração solar

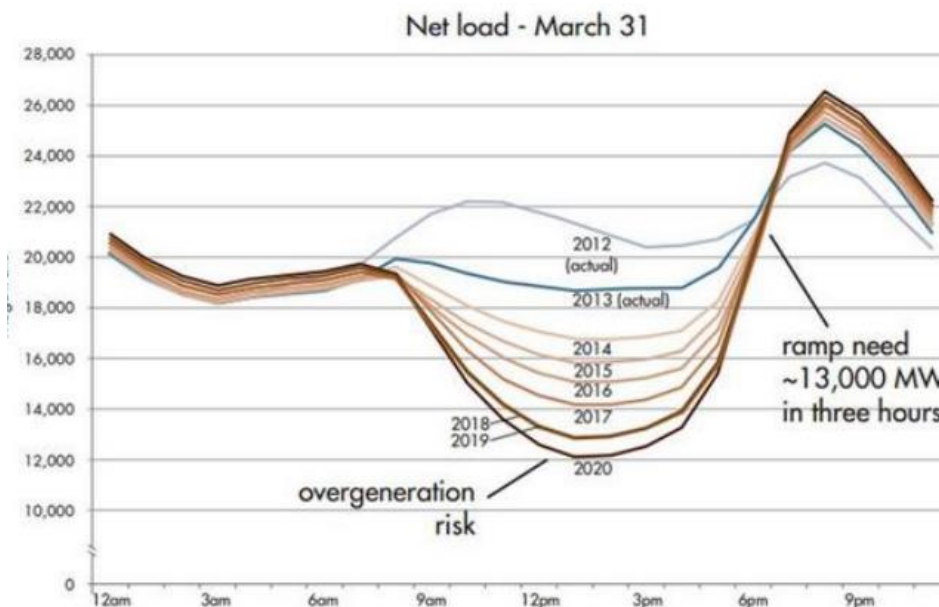


Fonte: Castro (2016)

Segundo Guerreiro (2016), a intermitência da geração de energia elétrica vinda de fontes alternativas, causa uma grande distorção nas curvas de carga, devido ao fato da geração fotovoltaica ser totalmente dependente da intensidade da luz solar, onde seu pico de geração acontece por volta do meio dia, e ao anoitecer, há uma queda abrupta da energia gerada e ao mesmo tempo um aumento da carga conectada à rede.

A figura 12 mostra uma previsão desse fato, baseada nas curvas de carga reais do estado da Califórnia nos Estados Unidos.

Figura 12 - Curvas de Carga



Fonte: Guerreiro (2020)

Guerreiro (2016) denomina esse efeito de *fading* da geração fotovoltaica o qual em um período do dia a geração é tão alta que chega ao ponto de ocasionar uma completa inversão do fluxo de potência e em outro, num período de aproximadamente 3 horas são necessários 13 GW de potência na rede, devido ao término da luz solar diária. O autor também cita que essa diferença tem que ser suprida por fontes despacháveis.

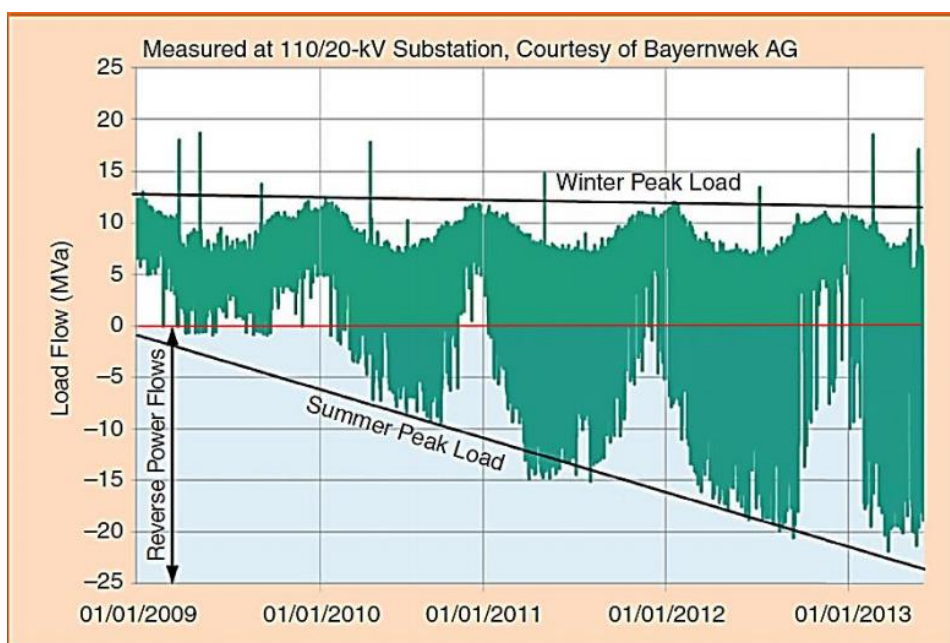
Segundo Castro et al (2016) a inserção de energia fotovoltaica em grande escala na rede gera curvas de carga instáveis. Ao invés de variações graduais durante o dia, observam-se grandes picos e vales, fato esse que é indesejável considerando um ponto de vista operacional, pois dessa forma apresentam-se dificuldades de controle de tensão, aumento de perdas durante a transmissão, piora na qualidade de energia e um aumento na demanda de energia em espera.

3.2.2. Estudo de caso: Alemanha

“A jornada da Alemanha, rumo as fontes de energia renováveis, está causando tanta instabilidade vindas da geração solar e eólica, que as concessionárias de energia estão recebendo mais recursos, oriundos do governo, do que nunca para ajudar a estabilizar a rede elétrica do país” Guerreiro (2016).

Na figura 13 abaixo, Djalma (2016) mostra um exemplo bem similar ao apresentado anteriormente, de uma análise feita na Alemanha durante quatro anos. Além do considerável aumento da geração fotovoltaica ao longo dos anos, pode-se perceber um outro fator, que são as estações do ano e as mudanças que elas trazem tanto para a geração quanto para a carga conectada à rede.

Figura 13 - Análise da geração solar na Alemanha



Fonte: Falcão (2013)

De acordo com Kelsey (2018), esse aumento da instalação de geradores fotovoltaicos na Alemanha aconteceu principalmente por causa de generosos

benefícios fiscais e diminuição dos custos dos produtos. Com o passar do tempo, a preocupação com a estabilidade da rede foi crescendo, pois os inversores de frequência utilizados para mandar a energia gerada para a rede tinham uma frequência de *cutoff*² de 50.2-Hz. Porém, as perturbações geradas pela energia fotovoltaica ultrapassam esse valor, o que quase ocasionou diversos blecautes. Esse era um risco muito grande, pois se a geração saísse de repente da rede geraria um aumento na demanda e tornaria a emergência mais severa, ocasionando em um efeito “bola de neve”.

Em resposta a isso, foram necessários realizar *retrofits*³ em aproximadamente 315.000 inversores de sistemas fotovoltaicos, o que gerou um custo de aproximadamente 175 milhões de euros.

3.2.3. Principais problemas no Brasil

Visto os problemas apresentados anteriormente, Castro et al (2016) deixa claro que se tivesse que resumir a principal deficiência do sistema elétrico brasileiro atual para que a micro geração possa entrar numa escala maior são os sistemas de proteção e controle.

Em linhas de transmissão existem tecnologias sofisticadas para proteção e controle, pois como essas linhas transmitem altas quantidades de energia elétrica, essa inovação se fez necessária com o passar do tempo, porém o mesmo não aconteceu com as linhas de distribuição, que são onde as fontes geradoras em uma rede de geração distribuída estariam conectadas.

Quanto mais longe dos sistemas de transmissão menos controle se tem nas redes de distribuição. (Castro et al, 2016). Uma rede de subtransmissão, por exemplo, possui um razoável nível de proteção e controle, porém em uma rede de baixa tensão esse recurso é praticamente inexistente.

Alguns reguladores de tensão que são próprios para distancias maiores, já começam a aparecer no mercado, porém faltam profissionais capacitados e

² Frequência em que os equipamentos param de funcionar quando atingido um valor.

³ Processo de modernização de um equipamento ou sistema, onde novas peças e configuração são incluídas na estrutura já existente.

ferramentas de análise nas empresas de distribuição, que atualmente não são encontrados no Brasil.

Falcão (2013), salienta que a presença de diversas fontes intermitentes em uma rede de distribuição altera toda a lógica de controle dessa rede e para que a mini e microgeração funcionem em larga escala essa lógica convencional precisa ser modificada. Convencionalmente, o sentido do fluxo de potência é sempre na mesma direção, porém nesse novo contexto, assim como visto anteriormente, existem períodos de inversão desse sentido de fluxo, o que reforça mais uma vez a necessidade de atualizações e inovações na área de proteção e controle.

3.3. Possíveis soluções

3.3.1. Incentivos regulatórios e fiscais

Fontes (2018) diz que para que as tecnologias voltadas a mini e microgeração se desenvolvam de forma mais rápida, alguns incentivos, fiscais e regulatórios são necessários, e o autor cita como exemplo alguns que foram adotados em outros países:

- Japão: Instituiu em 1994 o programa 70.000 telhados solares com investimentos no valor de 457 milhões de dólares. Esse programa contava com redução fiscal para a indústria solar e subsídios. Como resultado, a geração solar no país aumentou aproximadamente 850% entre 1993 e 2001.
- Alemanha: Em 1991 foi instituída uma lei chamada de *Feed-in-law*, em que as concessionárias de energia são obrigadas a comprar toda energia gerada por sistemas fotovoltaicos e, inclusive, pagar um prêmio referente a essa energia. Entre 1991 e 1995, 70% do custo de instalação de sistemas fotovoltaicos era subsidiado pelo governo e, em 1999, um financiamento com juros 0 e 10 anos para pagamento.

- EUA: Em 2006 foi lançado um programa na Califórnia para estimular o uso de energia fotovoltaica residencial, o que contou com um investimento de 17.6 milhões de dólares vindos do departamento de energia do governo americano.

2 Seguindo esses exemplos, o Brasil já tem o seu próprio programa de desenvolvimento de geração distribuída (pro GD) e dentre diversas itens o programa visa fomentar a adoção da energia distribuída por meio de uma parcela maior da população, investindo recursos e transmitindo informação à todas as camadas da população a respeito dessa nova modalidade de geração e suas vantagens. (Ministério de Minas e Energia, 2015).

3.3.2. Novas tecnologias

De acordo com o que se pode observar nos tópicos anteriores, para que o Brasil chegue no mesmo patamar que os países desenvolvidos estão hoje, são necessários investimentos, principalmente, na área de proteção e controle. Porém, mesmo em locais onde a mini e micro geração distribuída já estão consolidadas, existem diversos estudos sendo conduzidos para o aumento dessa modalidade de geração de energia.

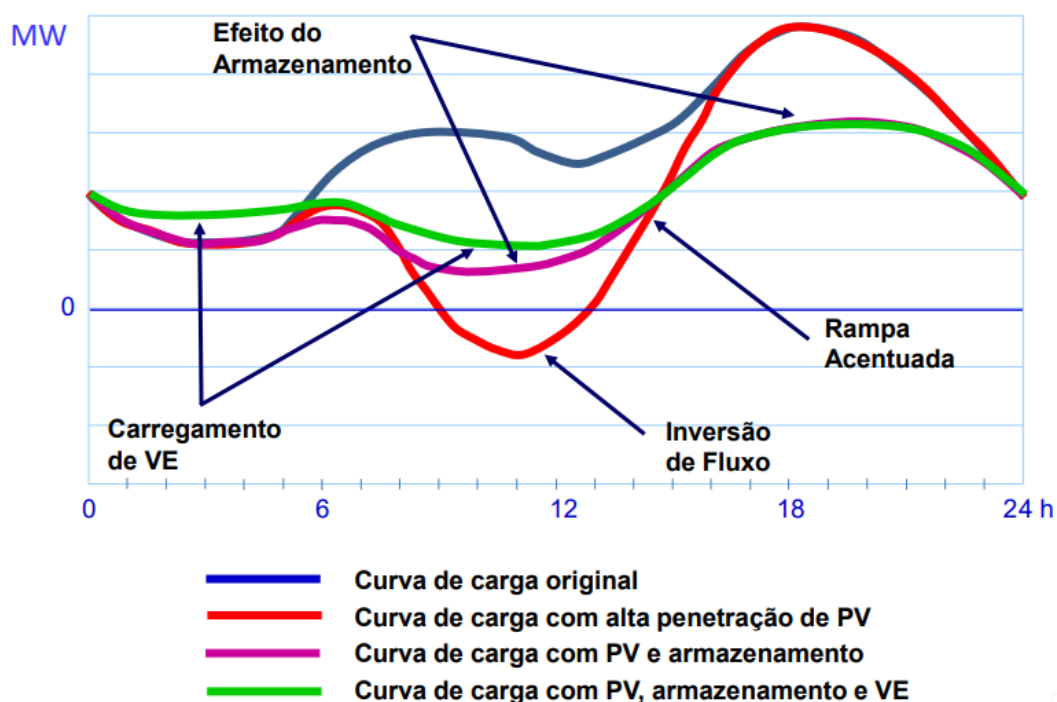
Segundo Castro (2016), a solução técnica que tem o maior potencial de sanar o efeito deformante que a geração distribuída apresenta nas curvas de carga são novas tecnologias para armazenamento de energia. Caso existissem baterias que suportassem carga suficiente para manter energia fluindo na rede durante as 12h que os sistemas fotovoltaicos estão desligados, os impactos nas curvas de carga seriam praticamente inexistentes. E, enquanto ainda se caminha rumo a esse cenário ideal, novas ideias surgem para amenizar esses problemas.

3.3.2.1. *Vehicle to Grid (V2G)*

De acordo com Pritish et. al (2015), *Vehicle to Grid (V2G)* é uma tecnologia que pode ser definida como um sistema que tem a capacidade de controlar um fluxo bidirecional de energia entre um veículo e a rede elétrica.

Todo veículo elétrico possui uma fonte de energia (bateria) e que a maioria desses veículos passam a maior parte do tempo estacionada, inclusive durante horários de pico de consumo de energia. A ideia é utilizar um veículo parado que esteja conectado na tomada, para amenizar os efeitos da geração de energia a partir de energias renováveis e suavizar as curvas de carga desse sistema. Esse efeito de suavização da curva de carga pode ser visto na Figura 14.

Figura 14 - Suavização da curva de carga



Fonte: Falcão (2016)

Onde: PV – Geração Fotovoltaica

VE – Veículo Elétrico

Conforme pode-se observar na figura 14 e segundo o que diz Castro (2016), a curva de carga com a geração proveniente de energia solar, já observada em outros exemplos anteriores, se comporta de uma maneira muito aquém do que se deseja. Adicionando armazenamento (bateria) junto com a geração fotovoltaica tem-se uma

suavização nos grandes picos e vales que se formaram. Além do armazenamento, quando os carros elétricos entram em cena, com a tecnologia *vehicle to grid*, a situação se torna ainda melhor.

4. CONCLUSÃO

A mini e micro geração distribuída são o futuro da geração de energia elétrica em todo o mundo. Não só pelo fato de que a matriz energética global está mudando para fontes renováveis focada em uma crescente preocupação com o meio ambiente, mas também pelos inúmeros benefícios que surgem devido a descentralização das unidades geradoras.

Atualmente, existem muitos desafios para que a geração distribuída seja adotada em massa ao redor do mundo, mas todos aqueles que estão envolvidos nesse assunto concordam que esses desafios são apenas pequenos obstáculos e que logo não serão mais problemas e poder-se-á desfrutar de todos os benefícios da geração distribuída integralmente.

O Brasil ainda está um passo atrás quanto à instalação e geração de energia proveniente de mini e micro geração, porém a cada dia que passa, observam-se maiores esforços voltados para uma análise mais detalhada da situação e problemas, e, como em outros países, serão propostas ações que irão levar a geração distribuída para um novo patamar visto a crescente quantidade de energia proveniente deste tipo de geração.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3ª edição, Brasília: Aneel, 2008.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, **Geração distribuída amplia número de conexões em 2015.**, Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output_Noticias.cfm?Identidade=9044&id_area=90> Acesso em: 15 mai 2017

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, **Micro e Minigeração Distribuída – Sistema de compensação de energia elétrica.**, Brasília: Aneel, 2008.

ANABUKI, Erika Tiemi; CAMOLESI, Sthefany Campos; MALHEIRO, Teresa I. R. C. SILVA, Luciana Oliveira da; VASCONCELLOS, Arnulfo Barroso de. **Análise da migração de uma unidade consumidora para o mercado livre de energia**. Universidade Federal de Mato Grosso: Artigo, 2013

CAÑIZARES, Claudio; CONEJO, Antonio; GÓMEZ-EXPÓSITO, Antonio. **Sistemas de Energia Elétrica**. Tradução de Antonio Padilha Feltrin; José Roberto Sanches Mantovani, Rúben Romero. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

CASTRO, Nivalde de, DANTAS, Guilherme, BRANDÃO, Roberto, MOSZKOWICZ, Maurício, ROSENTAL, Rubens, **Perspectivas e desafios da difusão da micro e mini geração fotovoltaica no Brasil** Disponível em <<http://www.gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/publications/TDSE67ING.pdf>> Acesso em 02 fev 2020

CENTRO BRASILEIRO DE INFRAESTRUTURA (CBIE), **Quantos quilômetros de linha de transmissão de energia temos no Brasil?** Disponível em: <<https://cbie.com.br/artigos/quantos-quilometros-de-linha-de-transmissao-de-energia-temos-no-brasil/>> Acesso em: 10 jul. 2019

EECA Energywise, **Power from the people: a guide to micro-generation.**, New Zealand, 2010.

FALCÃO, Djalma M., **Impacto da mini e microgeração distribuída nas redes de distribuição de energia elétrica.**, IEEE, 2013.

FIRJAN: FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO, **Propostas para melhorar a qualidade da energia no Brasil.**, Rio de Janeiro, 2016.

FONTES, Ruy. **Geração distribuída da ANEEL avança com Energia Solar Fotovoltaica.** Disponível em <<https://blog.bluesol.com.br/geracao-distribuida-da-aneel/>> Acesso em 03 mar 2020.

FRIGO, Murilo Miceno, **Impacto da microgeração de energia elétrica em sistemas de distribuição de baixa tensão.**, Campo Grande, Dissertação de pós-graduação, Faculdade de engenharias, arquitetura e urbanismo e geografia, 2013.

GOMES, T. C. **Análises de Estratégias para o mercado de energia livre no Brasil.** São Carlos: Trabalho de conclusão de curso, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2013.

GUERREIRO, Amilcar **Impactos dos recursos energéticos distribuídos (RED) sobre o setor de distribuição.** Disponível em <<http://www.gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/workshops/epe1.pdf>> Acesso em 20 fev 2020

HANANIA, Jordan, STENHOUSE Kailyn, DONEV Jason, **Dispatchable source of electricity.** Disponível em <https://energyeducation.ca/encyclopedia/Dispatchable_source_of_electricity> Acesso em 10 fev 2019

KELSEY, A. W., HOROWITZ, Fei Ding, BARRY, Mather, BRYAN, Palmintier, **The Cost of Distribution System Upgrades to Accommodate Increasing Penetrations of Distributed Photovoltaic Systems on Real Feeders in the United States.**

Disponível em <<https://www.nrel.gov/docs/fy18osti/70710.pdf>> Acesso em: 20 fev 2019

LEÃO, Ruth. **GTD - Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica**. Ceará: Departamento de Engenharia Elétrica, 2009. 38 p. Apostila.

MAGALHÃES, Gerusa. **Comercialização de Energia Elétrica no Ambiente de Contratação Livre: Uma Análise Regulatório-Institucional a partir dos contratos de Compra e Venda de Energia Elétrica**. 2009. 140p. Dissertação (Mestrado em Energia). Programa de Pós-Graduação em Energia. Universidade de São Paulo, 2009.

MEIER, Alexandra von. **Electric power systems: A conceptual introduction**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Portaria nº 538**, de 15 de dezembro de 2015. Cria o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica - ProGD. Diário Oficial da União, n. 240, Brasília-DF, 16 de dez. p. 96, 2015.

PEPERMANS G., DRIESEN., HAESELDONCKX D., D'HAESELEER W., BELMANS R., **Distributed Generation: Definition, Benefits and Issues**, Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/222561651_Distributed_generation_definition_benefits_and_issues> Acesso em 23 set 2019.

PRITISH PANI, ABHISHEK R ATHREYA, AISHWARYA PANDAY e HARI OM BANSAL, **Integration of the Vehicle-to-Grid Technology**, 2015, 5p, Conference Paper, Department of Electrical and Electronics Engineering Birla Institute of Technology and Science, Pilani, India, 2015.

REN21 2019, **Renewables 2019 Global Status Report.**, Paris, REN21 Secretariat, 2019.

ROWLATT, Justin, **Why micro turbines don't work.** Disponível em: <https://www.bbc.co.uk/blogs/ethicalman/2009/12/why_micro_wind_turbines_dont.html> Acesso em 03 mar 2020.

STEVENSON, William D., **Elementos de análise de sistemas de potência.** Tradução de Arlindo Rodrigues Mayer, João Paulo Minussi, Somchai Ansuaj. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

THE WORLD BANK. **Acesso universal a energia: muito mais que eletricidade.** Disponível em: < <https://www.worldbank.org/pt/news/feature/2018/05/18/sustainable-development-goal-7-energy-access-all> > Acesso em 10 jul 2019.