

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

Kelda Aparecida Godói dos Santos

**Impactos Do Aumento Da Entrada Da Energia
Solar Fotovoltaica Na Rede Elétrica
Distribuída: Implicações Técnicas Do Aumento
Da Geração Própria De Energia**

Itajubá-MG, 29 de Agosto de 2016.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

Kelda Aparecida Godói dos Santos

**Impactos Do Aumento Da Entrada Da Energia
Solar Fotovoltaica Na Rede Elétrica
Distribuída: Implicações Técnicas Do Aumento
Da Geração Própria De Energia**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

Área de Concentração: Automação e Sistemas Elétricos Industriais.

Orientador: Prof. PhD. Paulo Fernando Ribeiro

Itajubá-MG, 29 de Agosto de 2016.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Jacinto e Mariléia.

AGRADECIMENTOS

Agradeço sobretudo a Deus por me dar forças para continuar mesmo quando as situações difíceis tentam me fazer desistir.

Agradeço imensamente aos meus pais por serem meus exemplos e guiarem no meu caminho, por sempre apoiarem minhas escolhas e também me prevenirem nos momentos que as decisões não são as mais acertadas. Sempre pude contar com o porto seguro que é minha família para dividir as tristezas e alegrias e contar com seu carinho sem medidas mesmo. Suas palavras e gestos de incentivo sempre estavam presentes.

Agradeço aos amigos que coloriram meu caminho durante os anos de estudos durante as diferentes fases desde a pré-escola até o Mestrado, me ajudaram a conhecer a mim mesmas enquanto desfrutava de sua amizade e carinho.

Meus estudos no CERIn com certeza foram muito abrilhantados pela ajuda sempre bem vinda dos colegas de estudos sempre dispostos a partilhar seus conhecimentos e experiências com generosidade.

Ao meu namorado muito atencioso e compreensivo que sempre me incentivou e entendeu minhas ausências.

Aos meus colegas de trabalho que se tornaram grandes amigos que admiro e me espelho para ser cada vez melhor.

Ao meu orientador pelo incentivo constante, o qual admiro muito por seu entusiasmo e disposição na prática docente, que me inspira por sua simplicidade e humildade.

Aos professores em especial da graduação e pós que mostraram um universo de novidades e possibilidade para serem exploradas e vividas não só na vida acadêmica como em tudo.

“É sempre mais escuro antes da aurora”

Maria Aparecida Freitas Godoi (avó)

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	I
AGRADECIMENTOS.....	III
SUMÁRIO.....	IV
RESUMO.....	V
ABSTRACT.....	VI
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Relevância do Tema.....	1
1.2 Objetivos e Contribuições da Dissertação	2
1.3 Estrutura da Dissertação	3
2. CENÁRIO DE CONSUMO E GERAÇÃO DE ENERGIA	5
2.1 Cenário Mundial.....	6
2.2 Cenário Brasileiro	8
3. SISTEMA DE GERAÇÃO DISTRIBUIDA	13
3.1 Definições	13
3.2 Normas para micro e mini geração.....	13
3.2.1 Norma 482	12
4. EFEITOS DA GERAÇÃO DISTRIBUIDA NA QUALIDADE	18
4.1 Variação de Tensão Em Regime Permanente.....	19
4.2 Flicker.....	20
4.3 Distorções Harmônicas	21
4.3.1 Definições.....	21
4.3.2 Cargas não lineares.....	22
4.4 Normas e limites de harmônicas.....	22
5. SIMULAÇÃO DE FONTES POLUIDORAS NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO	28
5.1 Considerações Iniciais	28
5.2 Condições Iniciais do Sistema	28
5.3 Carga Equilibrada.....	32
5.4 Cargas desequilibradas.....	41
5.5 Resultados.....	44
6. CONCLUSÕES.....	45
6.1 Conclusões Gerais.....	46
6.2 Proposta para Trabalhos Futuros	47
6.3 Artigo Aceito em Conferência.....	47

REFERÊNCIAS	47
--------------------------	-----------

RESUMO

O presente trabalho apresenta estudos sobre os impactos da inserção de fontes de geração distribuída no sistema elétrico com a expansão do uso das energias renováveis no Brasil e no mundo. A geração distribuída está em fase de implementação e para tal algumas normas foram feitas para regular essa relação de consumidor-gerador de energia com as concessionárias. Recentemente, com a reestruturação da regulamentação, a geração própria de energia foi alavancada e a estimativa é que cada vez mais essas fontes sejam inseridas no sistema. A qualidade da energia poderá ser afetada com a implantação de tais tecnologias e torna-se necessário conhecer quais as possíveis consequências que a rede pode sofrer, olhando as vantagens e desvantagens que tal técnica pode trazer. Mais especificamente, será abordada a inserção de distorções nas formas de onda de corrente e tensão relacionadas às frequências harmônicas. Essas distorções que são injetadas na rede através de cargas não lineares ou eletrônicas incluem os inversores, que são usados na grande maioria das instalações existentes hoje em dia, uma vez que a fonte predominante para geração é a energia fotovoltaica. As simulações dessas fontes injetando distorções em várias frequências diferentes permitem estudar seus impactos quando associadas a cargas equilibradas e desequilibradas não lineares.

Palavras-Chaves: geração distribuída, geração fotovoltaica, distorções harmônicas, qualidade da energia elétrica.

ABSTRACT

This study address the impact of the integration of generation sources in the distribution system due to the expanding use of renewable energy in Brazil and in the world. Distributed generation is in implementation phase and for that, some rules were made to regulate this power generator-consumer relationship with utilities. Recently, with the restructuring of the regulation, distributed generation was leveraged, and most of these sources are estimated to be connected to the system. The electric power quality may be affected with the implementation of such technologies, and it is necessary to know what the possible consequences that the network may suffer, looking at the possible advantages and disadvantages. More specifically it is addressed the insertion of distortions in the waveforms of current and voltage related to harmonic frequencies. These distortions are injected into the network through electronic or non-linear loads including inverters, which are used in most existing installations today, since the predominant distributed generation source is photovoltaic. The simulations of these sources injecting distortions in several different frequencies allow to evaluate their impact when combined with balanced and unbalanced nonlinear loads.

Keywords: distributed generation, photovoltaic generation, harmonic distortion, power quality.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Relevância e atualidade do Tema

A energia tem grande importância na sociedade e na economia e a oferta de energia a custos razoáveis e confiáveis é de suma importância para a qualidade de vida das pessoas e o desenvolvimento de uma nação, já que o desenvolvimento de um país tem como base também seu consumo de energia per capita. Gerar energia com qualidade com impacto ambiental controlado é um desafio que oferece múltiplas alternativas e possui outras tantas possibilidades para o desenvolvimento de novas tecnologias e aprimoramento de algumas já existentes. Pode-se observar nesse contexto um aumento significativo das tecnologias voltadas a aproveitar recursos renováveis como fonte de energia e uma tendência crescente no mundo todo em adotar tais tecnologias [1],[2]. Uma dessas fontes é a energia solar, que está em franca expansão e também aprimoramento de várias técnicas para aproveitar cada vez mais essa fonte tão abundante de energia.

Recentemente, à luz das demandas da sociedade, foi publicada pela ANEEL a Resolução Normativa ANEEL N° 482/2012 [3] que permite que os consumidores também gerem energia e forneçam o excedente à concessionária de energia em troca de créditos. A partir da primeira versão editada em 2012, tal iniciativa sofreu mudanças pela Resolução Normativa ANEEL N° 687/2015 [4] que oferece agora uma perspectiva melhor na relação entre a concessionária e o consumidor-gerador além de especificar com mais detalhes como devem ser os procedimentos para estabelecer essa relação.

A implementação do modelo de geração distribuída está em expansão em vários lugares do mundo e existe uma preocupação de como isso poderá impactar no desempenho da rede tradicional. Existe uma estimativa feita pela ANEEL de que até 2024 essas conexões de geradores diretas na rede de distribuição contarão com mais de 1,2 milhões de pontos de conexão com mini e micro geração com essa configuração [5].

1.2 Objetivos e Contribuições da Dissertação

O objetivo do presente trabalho é apresentar uma perspectiva do cenário nacional e internacional que fundamentam a preocupação com o novo modelo de geração distribuída que vem sendo adotado por cada vez mais consumidores. O foco é analisar o impacto do suprimento de tensões não senoidais na geração de harmônicos por conversores eletrônicos. Busca-se oferecer uma visão sobre como a normatização vigente irá afetar o cenário de expansão da geração distribuída e as preocupações que envolvem o novo modelo e sua interação com a rede tradicional instalada. A maior complexidade do sistema contribui para que haja muitas dúvidas de como o aumento da penetração de tal tecnologia irá oferecer vantagens ou desvantagens à rede de energia elétrica como um todo. É necessário conhecer com mais detalhes esses efeitos para que seja possível adotar medidas para mitigar possíveis danos que essa rede venha a enfrentar devido à inserção de pontos de geração onde anteriormente só havia consumo de energia, mas não somente evitar os danos como também aproveitar as oportunidades que tal mudança provocará [6].

As contribuições do presente trabalho ficarão no âmbito das consequências que o sistema pode causar à rede, e mais especificamente no que se refere em como a qualidade da energia será afetada pela expansão da geração distribuída, principalmente observando os sistemas fotovoltaicos. No tangente à qualidade, que também é um assunto vasto, será dado maior foco aos distúrbios relacionados a frequências harmônicas que estão presentes no sistema, devido à interação das cargas com o crescimento de uso de fontes de energia que utilizam inversores de frequência para condicionar a energia gerada aos padrões estabelecidos. A principal fonte a ser estudada é a fotovoltaica, que gera energia a partir da irradiação solar, uma vez que tal fonte representa uma das mais usadas e tem maior crescimento entre as demais tecnologias de fontes alternativas de energia [6], [7].

1.3 Estrutura da Dissertação

O trabalho apresenta seis capítulos que irão discorrer sobre o tema de forma objetiva, apresentando uma breve introdução, composta pela relevância do tema abordado, mostrando algumas características das tendências de abordagem do assunto escolhido, dados que corroboram com o interesse pelo desenvolvimento do estudo além de sua aplicabilidade e atualidade.

Em seguida, tem-se a contribuição e os objetivos pretendidos pelo estudo que irá orientar o desenvolvimento dos próximos capítulos.

O Capítulo 2 trata do cenário mundial e brasileiro da geração de energia com foco nas energias renováveis, mas principalmente no que se refere à energia a partir de fonte solar, oferecendo um panorama da aplicabilidade da técnica em alguns países que possuem grande relevância no quesito de produção energética. Tratando-se do cenário brasileiro apresenta-se uma perspectiva do crescimento previsto do tema e reforça mais uma vez a relevância do assunto abordado pelos estudos.

A geração distribuída que faz parte do Capítulo 3 mostra que vários aspectos da produção e consumo de energia estão mudando e as técnicas para entender e operar o sistema tem que ser desenvolvidas de acordo com as necessidades que se fazem presentes. Assim, relata algumas definições que permeiam o tema e as vantagens e dificuldades das novas técnicas inseridas na rede tradicional.

A inserção de pontos de geração na rede tradicional de distribuição abordada no Capítulo 3 traz certos aspectos fortemente ligados à qualidade de energia que será o tema do Capítulo 4. Como os fenômenos de qualidade têm uma grande abrangência, que afeta não somente as redes distribuídas, o foco será dado aos fenômenos que estarão presentes quando as fontes alternativas de energia forem inseridas diretamente na rede de distribuição, e mais especificamente referentes aos pontos geradores que utilizam unidades fotovoltaicas (PV) nos sistemas.

Algumas simulações forem feitas no Capítulo 5 para observar a inserção de fontes de energia acopladas ao sistema através de conversores eletrônicos como é a conexão dos painéis fotovoltaicos (PV), que necessitam de um inversor de frequência para gerar energia dentro dos padrões utilizados na rede elétrica tradicional. É a fonte que mais crescerá durante a expansão da rede distribuída.

O objetivo desse capítulo é observar as interações entre as harmônicas geradas pelas cargas e as harmônicas que podem ser geradas por tais equipamentos eletrônicos que conectam o PV à rede.

Por fim, serão apresentadas as conclusões do estudo desenvolvido, bem como sugestões para trabalhos vindouros e o artigo aceito na 17ª Conferência Internacional sobre Harmônicos e Qualidade de Energia.

2. Cenário de Consumo e geração de energia

A energia tem um papel de destaque na sociedade e na economia, bem como no desenvolvimento social. Mas o modelo de produção energética usado pela grande maioria dos países, inclusive o Brasil, trouxe grandes problemas sociais e ambientais [2], [6].

Observando melhor o impacto da energia na sociedade pode-se notar uma relação direta entre o consumo de energia e a qualidade de vida da população. Se o índice de desenvolvimento humano (IDH) for observado, é notável a relação entre a demanda de energia e o valor do índice, assim como mostra o gráfico na Figura 2.1.

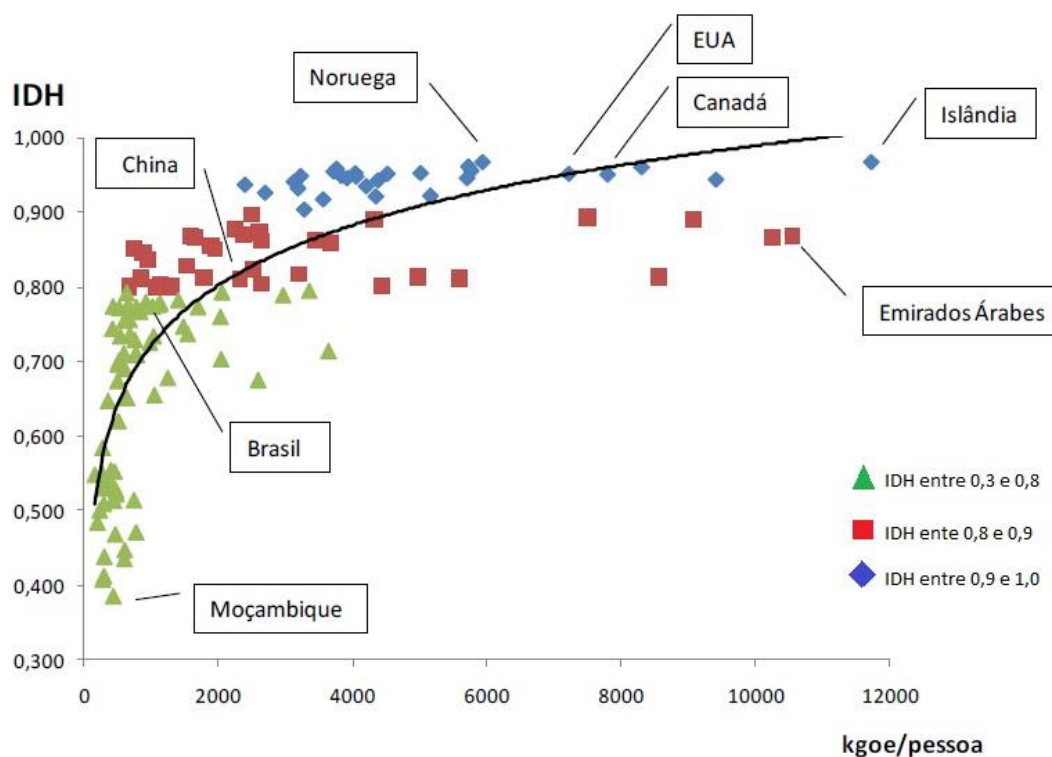


Figura 2.1- Relação entre o IDH e o consumo de energia elétrica [8].

A partir de determinado patamar, não há grande evolução em relação à quantidade de energia consumida e o IDH. Para garantir o acesso aos níveis de energia dos países que possuem IDH perto de 0,9 (o índice vai de 0 a 1), seria necessário um acréscimo de 33% de energia para a população atual do planeta. Deve-se lembrar que existe um crescimento populacional maior que ocorre justamente nos países menos desenvolvidos como Índia e China, fator que elevaria ainda mais a necessidade de aumento da

disponibilidade de energia ao longo dos anos para atender a demanda e aproximar as populações de um nível de IDH próximo dos países desenvolvidos [8]. A repressão dessa demanda pode afetar negativamente o desenvolvimento das nações e o bem-estar de suas populações.

A geração de energia evoluiu muito desde o uso da lenha até o uso da energia nuclear durante o período de pouco menos de dois séculos, antes usando fontes de baixa potência e desenvolvendo-se nesse período até o uso de geradores nucleares [8].

Existe grande dependência de energia de energia confiável e a custo razoável, sendo que o cenário atual de oferta e demanda de energia mostrou-se bastante volátil nos últimos anos. Vários motivos estão por trás dessa falta de constância, como a mudança no clima e a variação dos custos dos recursos energéticos não renováveis como petróleo e carvão [1], [9].

2.1 Cenário Mundial

A tecnologia de geração a partir de fontes renováveis conta com 50% ou mais do total de novas capacidades globais adicionadas em 2011. Em 2015 cerca de 148 GW de energia renovável foi adicionada à rede. Políticas de apoio ao redor do mundo às fontes renováveis têm aumentado significativamente, resultando no desenvolvimento de inovações tecnológicas e reduzindo custos, levando a um círculo virtuoso.

Embora as energias solar e eólica estejam comercialmente maduras, estão longe da maturação do ponto de vista dos custos. Inovações tecnológicas e a competição pressionam a cadeia de abastecimento e as economias de escala podem ser destravadas com ênfase na política adequada. Aproveitando essa oportunidade poder-se-ia ver o custo da eletricidade para energia solar e eólica cair entre um quarto e dois terços até 2025. Os ganhadores desta transferência serão os clientes e o meio ambiente e as gerações futuras [10].

Embora as tecnologias de energia solar e eólica estejam comercialmente disponíveis, ainda existe um potencial significativo para a redução de custos. Em 2025 o custo médio ponderado mundial nivelado de eletricidade (LCOE) de energia fotovoltaica (PV) poderia cair até 59% o LCOE de energia solar concentrada pode cair até 43%, eólica em terra (onshore) e no mar (offshore) podem experimentar quedas de 26% e 35% respectivamente [10].

A figura 2.2 mostra a capacidade instalada de energia solar em MW nos Estados Unidos, e torna notável a expansão desse tipo de energia nos últimos anos.

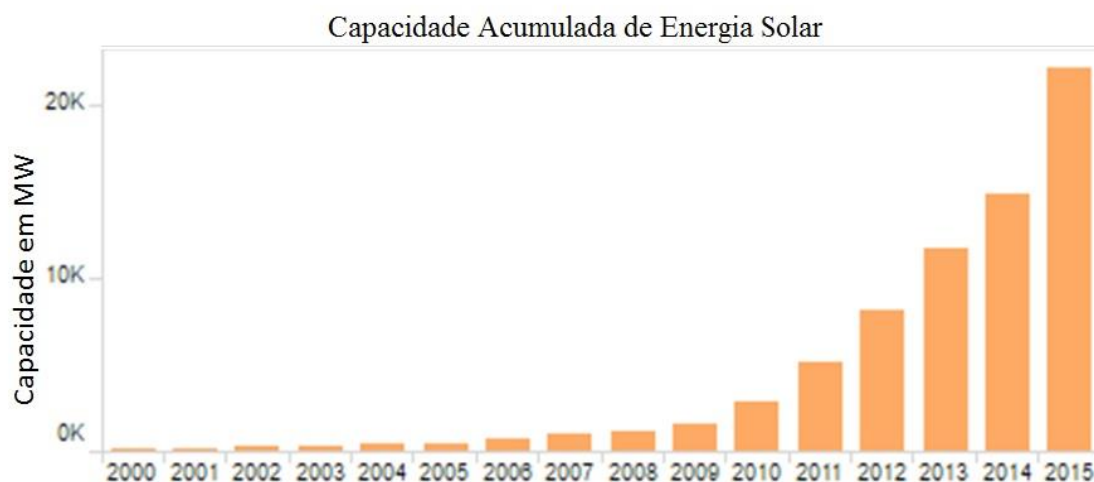


Figura 2.2- Capacidade Instalada de energia renovável [11].

A figura 2.3 a seguir mostra o cenário de energia a partir de fonte solar na Alemanha, um dos países de destaque no uso de energia a partir dessa fonte. A Alemanha possui um desenvolvimento nessa área há mais tempo, mais consolidado do que os Estados Unidos e muitos estudos na área que podem ser usados como referencia para estudos dos impacto como em [12] e que foi um dos propulsores para desenvolvimento do estudo abordado por este trabalho.



Figura 2.3 capacidade instalada energia solar Alemanha [13].

A China outro gigante quando se trata do consumo de energia, junto com os Estados Unidos são responsáveis por praticamente metade das emissões de CO₂ experimentou uma entrada tardia no desenvolvimento do uso da energia solar, mas nos últimos anos experimentou grande desenvolvimento nessa área como mostra a figura 2.4.



Figura 2.4 - Capacidade instalada energia solar China [14].

Como pode ser observada a quantidade de energia renovável e mais especificamente de PV tem aumentado significativamente durante os últimos anos e seu potencial ainda foi pouco explorado até o momento, assim pode-se afirmar que ainda há muito a se desenvolver à cerca das energias renováveis mundo afora.

2.2 Cenário brasileiro

O consumo total de energia elétrica apurado no Brasil no ano de 2015 foi 464.724 GWh e a previsão é de que em 10 anos esse número chegue em 677.645 GWh [15]. A matriz energética brasileira tem grande dependência dos recursos hídricos, já que as usinas hidrelétricas são responsáveis por um alto percentual da energia elétrica gerada.

Com as mudanças climáticas experimentadas por todo mundo o modelo brasileiro de produção energética apresentou grandes dificuldades em manter o suprimento da demanda de energia da população durante a crise hídrica e expôs a

necessidade da diversificação da matriz energética. Tal diversificação é essencial para o desenvolvimento do país e deve ser uma preocupação a ser levada em conta de forma a promover ambiente propício ao desenvolvimento sustentável do país e ponto estratégico para garantir seu desenvolvimento [16].

A hidroeletricidade tem papel de peso nesse contexto de geração de energia, mas o potencial a ser aproveitado de geração estará próximo do esgotamento nos próximos 30 anos.

Além disso, a construção de grandes barragens e imensas áreas alagadas gera muita discussão em torno do impacto ambiental que tais empreendimentos provocam. A clara tendência é que esse modelo seja cada vez menos utilizado e, ao invés disso, passam a ser usados hidro geradores que operam a fio d'água, ou então represas menores para mitigar os impactos [16].

Considerando-se apenas a energia elétrica, a matriz energética brasileira apresenta 84% de sua energia gerada através de fontes renováveis. O Ministério de Minas e Energia (MME) prevê que até o fim de 2015 o país terá 42,5% do total da energia consumida no país vindo de fontes renováveis. As outras fontes que compõem a matriz são os derivados de petróleo como gás liquefeito de petróleo (GLP), gasolina, diesel e também uma parcela de carvão e urânio, como pode ser observado na Figura 2.5.

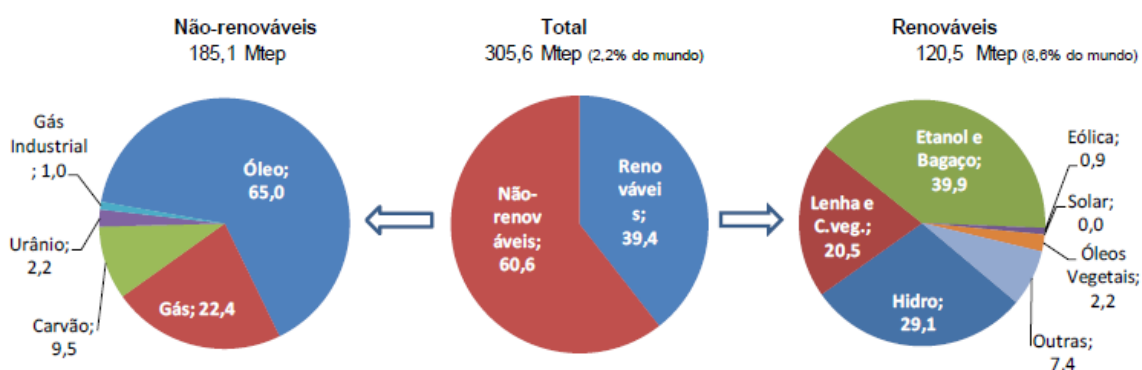


Figura 2.5 - Comparação entre energias renováveis e não renováveis [16].

O destaque se deve para as energias renováveis alternativas à hidrogeração, como eólica, solar e biomassa, já que a influência dessas fontes passou de 2,8 % em 2004 para 4,1% em 2014 [16].

Dados mais recentes mostram a evolução das conexões no lado de baixa tensão. O destaque vai para a energia solar fotovoltaica que corresponde a mais de 97% do número de conexões, sem contar os sistemas híbridos que combinam energia eólica e solar, o que pode ser observado com clareza na Figura 2.6 [5] com base em estudos da ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica.

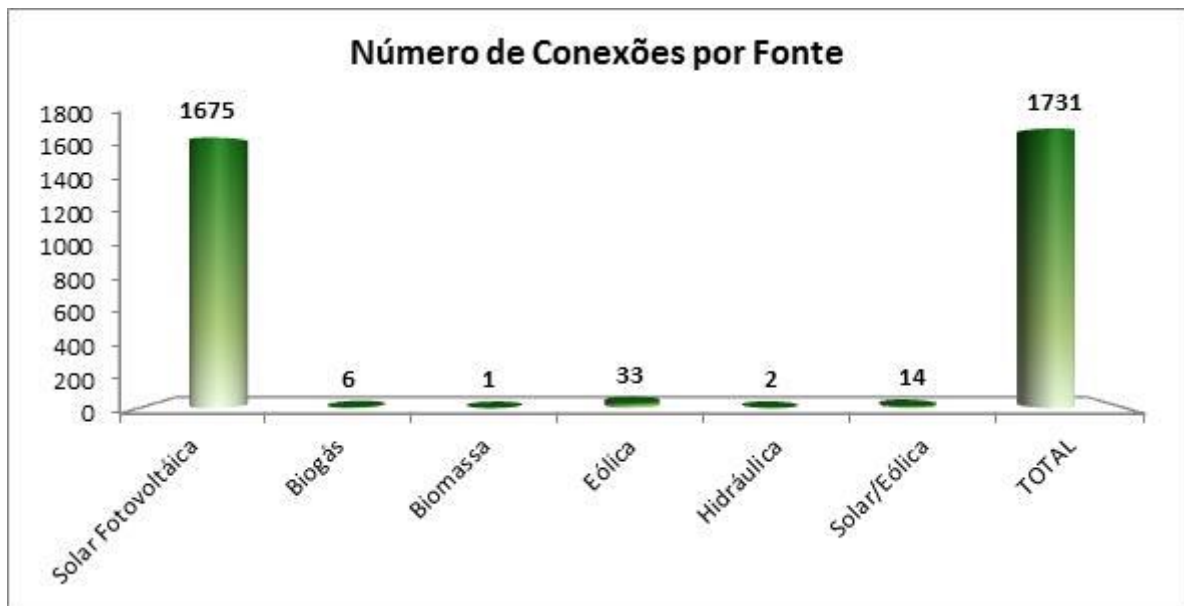


Figura 2.6 - Numero de conexões por fonte [5].

A potência instalada de energia solar também é predominante, mas corresponde a pouco mais de 80% da potência total instalada. Os valores correspondentes a cada tecnologia podem ser vistos na figura 2.7.

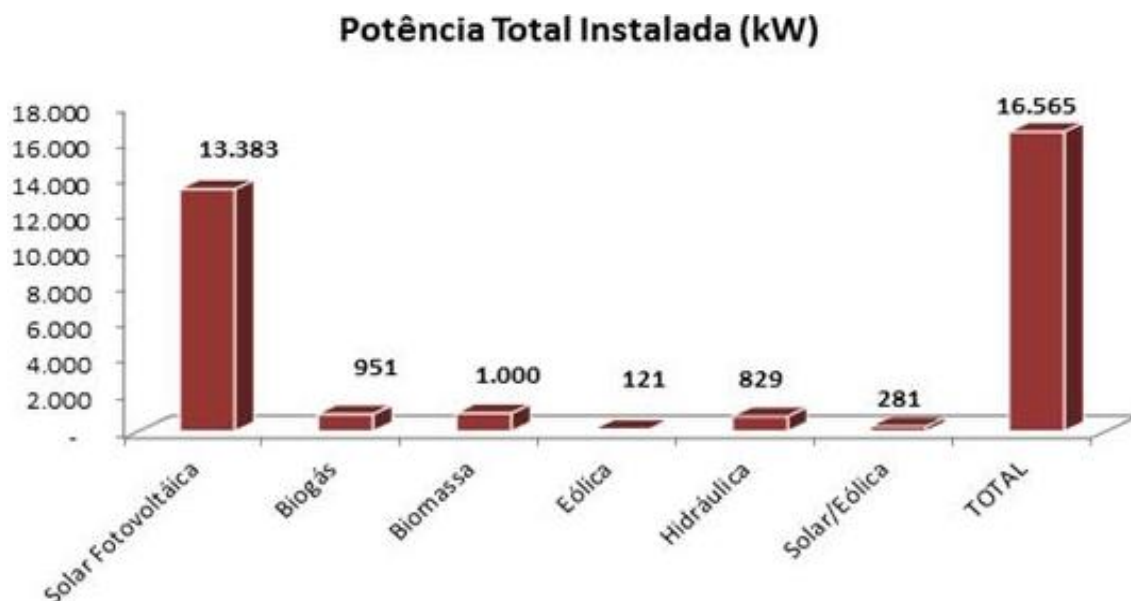


Figura 2.7 - Potencia total Instalada ANEEL [5]

Alguns estados apresentam maior aderência à tecnologia de geração distribuída como pode ser visto na figura 2.8. Com grande número de conexões aparecem os estados de Minas Gerais, com a maior concentração de pontos, seguido por Rio de Janeiro e Rio Grande do Sul como apresentado com dados de todos os estados.



Figura 2.8 - Conexões por estado [5]

As últimas atualizações mostram um aumento significativo com a atualização da norma [4] e o ultimo estudo apresentado com dados de janeiro mostram que o número de conexões já apresentava quase 200 conexões a mais do que no levantamento anterior

com mostra à figura 2.9 que apresenta a evolução do número de conexões acumuladas no período. [7]



Figura 2.9 - Número de conexões acumuladas no período [7].

A ANEEL disponibiliza uma planilha que deve ser preenchida pelo consumidor que deseja se conectar à rede de distribuição e é uma das condições para que seja feita o sistema de geração à rede. Essa tabela fica disponível para consulta e pode gerar dados para qualquer interessado.

3. Sistema de geração distribuída

3.1 Definições

Os sistemas de distribuição tradicionais (radiais) são projetados para conduzir o fluxo de energia apenas em uma direção: das fontes para a carga. O sistema de transmissão (em malha) por sua vez funciona em ambos os sentidos [2], [17]. Desenvolvido no início dos anos de 1900, hoje em dia tornou-se uma rede interconectada, em alguns locais mais que outros, com muitos centros geradores e centros de carga [2].

A crescente preocupação com o clima e os constantes problemas em relação à disponibilidade e preço dos combustíveis fósseis como o petróleo aumentaram o interesse na geração distribuída (GD) a partir de fontes renováveis.

No planejamento e operação assume-se que a energia elétrica flui do secundário do transformador nas subestações para o fim dos alimentadores radiais. Com a introdução de GD o sistema de distribuição torna-se ativo, com sistemas com ambos, consumo e geração de energia, em nós onde previamente possuía-se apenas cargas. Em geral, os recursos de geração distribuída são definidos como fontes de energia que não são conectadas diretamente no sistema de transmissão.

GD é um sistema que prevê instalar e operar geradores conectados diretamente na rede de distribuição ou do lado do consumidor, com valores típicos de no máximo 10 MW. Considerando sistemas de armazenamento e também cargas controláveis, o nome fontes distribuídas de energia também pode ser usado.

O espalhamento das fontes distribuídas tem criado uma série de novos problemas, alguns deles relacionados à qualidade da energia e proteção, como coordenação seletiva de proteção contra sobrecorrente e efeitos na continuidade (qualidade do serviço), somando-se ao controle de afundamentos de tensão.

O maior risco é o ilhamento que, se não projetado e controlado adequadamente, pode ser altamente perigoso tanto para as pessoas como para os equipamentos. Logo, a interação e o impacto de GD na operação da rede, detecção de falhas, correção e operações de religamento são grandes preocupações.

Foi sugerido que a alta difusão do uso de GD defina novos cenários, necessitando de equipamentos sofisticados (usando tecnologias de comunicações,

dispositivos eletrônicos e microprocessadores), de modo a operar com segurança e eficiência um complexo sistema de distribuição.

Os estudos a respeito da proteção dos sistemas se tornaram mais difíceis com o aumento da complexidade do sistema uma vez que existem mais componentes a serem considerados durante as manobras no caso de operação ou mesmo de falhas.

Com a GD novas regras para conexão foram feitas e também algumas mudanças foram implementadas nos sistemas já existentes. A Norma ANSI/IEEE 1001 apresenta as seguintes configurações para excursões fora do limite.

- Tensão maior que 137% com máximo de permanência de 2 ciclos.
- Tensão maior que 106% e menor que 88% com máximo tempo de permanência de 6 ciclos
- Tensão menor que 50% com máximo de tempo de permanência de 6 ciclos
- Frequência é considerada normal entre 59,3 a 60,5Hz com 15 ciclos de permanência.

Algumas questões ainda estão sob estudo para determinar como deverá ser a atuação da proteção com a inserção de GD, se seria possível a melhoria da estabilidade em condições transitórias e sob afundamentos. Algumas questões estão sendo consideradas:

- Desconectar rapidamente ou manter a conexão o máximo tempo possível.
- Prejuízo ou melhora da coordenação tradicional de sobre corrente.
- Ilhamento e suas vantagens ou desvantagens.

A grande questão que divide os engenheiros desse setor é a falta de conhecimento do que pode acontecer ao sistema tradicional com a alta penetração de GD. Existe uma previsão de que cerca de 20% da energia gerada entre 2010 e 2020 seja proveniente do sistema de geração distribuída, sendo que o impacto no sistema depende do nível de penetração de GD no sistema [2].

Um sistema elétrico deve ser projetado para isolar com sucesso as falhas com elevados níveis de corrente, que pode ser previsto pelos sistemas de proteção desde o gerador até ramos da rede elétrica. Se a corrente de curto-circuito exceder a capacidade disruptiva dos disjuntores de extinguir a falta pode haver graves danos ao sistema, ocorrências de incêndios e danos permanentes à infraestrutura. A contribuição da corrente de falta deve ser calculada e as medidas para mitigar os efeitos desse aumento

devem ser prioridade sobre a conexão da microrrede de distribuição. Nos estudos de falta assume-se que o sistema permanece balanceado, exceto no ponto de falta. A maior parte das faltas acontece entre fase e terra (os sistemas se isolam da rede, se desconectam).

Em uma rede inteligente, um grande número de microrredes opera como parte de um sistema interconectado. Por exemplo, um sistema residencial baseado em PV e equipado com baterias para armazenamento e carga seria a menor microrrede no sistema inteligente de energia.

O objetivo é fornecer um serviço contínuo e de qualidade com frequência e tensão aceitável, segurança adequada, confiabilidade e impacto ambiental aceitável – sem danificar os equipamentos da rede de energia, ao menor custo possível.

GD baseado em renováveis são tipicamente: turbinas eólicas, painéis fotovoltaicos, biomassa, pequenas centrais hidrelétricas, energia geotérmica, maré e ondas motrizes.

Sistemas de armazenamento podem ser constituídos por: baterias, *flywheels* (guarda a energia em uma roda que gira a grande velocidade, armazena energia em forma de movimento) e outros.

Essas tecnologias estão entrando em uma era de rápida expansão e comercialização. A ideia por trás da GD é oferecer eletricidade para o consumidor a um custo reduzido e mais eficiência com menores perdas que no sistema tradicional, o qual possui uma planta central envolvendo perdas na transmissão e distribuição.

GD pode ter um impacto significativo no fluxo de potência, no perfil da tensão, estabilidade da tensão, sistema de proteção e qualidade da energia experimentada pelos clientes. Esse impacto pode mostrar-se negativa ou positivamente, dependendo do sistema de distribuição.

A qualidade de energia tornou-se um problema durante as últimas décadas tanto pelo crescente uso de equipamentos eletrônicos como pela maior sensibilidade da carga. A adição da GD pode ter um efeito significativo bem como certamente aumentar a complexidade desse problema. A injeção de potência da carga para a fonte pode aumentar o nível de tensão em regime permanente. Geradores conectados nos consumidores-produtores podem causar injeção de correntes não senoidais na rede causando harmônicos adicionais. As flutuações de injeção de energia de algumas tecnologias de GD como as turbinas eólicas e fotovoltaicas, entre outras, podem causar

a injeção de tais correntes. Entretanto, a conexão de GD pode melhorar a confiabilidade dos sistemas de distribuição. A alocação ótima de GD pode reduzir as perdas e melhorar o perfil da tensão do sistema [17] , [18].

3.2 Normas para micro e mini geração

3.2.1 Norma 482

A geração distribuída é um sistema recente e sua inserção no sistema tradicional depende de normatização específica. A Resolução Normativa ANEEL N° 482 de abril de 2012 [3] veio ao encontro das necessidades do setor elétrico no Brasil. Com as primeiras resoluções definidas por esta resolução surgiram alguns pontos de questionamentos e pontos que ficaram pouco claros. Assim, a muitas definições foram alteradas pela Resolução Normativa ANEEL N° 687/2015 [4], que definiu a mudança nas regras, que passaram a ser vigente a partir do início de 2016 para o sistema de geração distribuída e mecanismos de compensação de energia. A nova normatização redefiniu limites de geração para os diversos sistemas que podem integrar a cogeração dentro da mini e microgeração. A micro geração compreende sistemas que têm potência instalada de até 75 kW e minigeração são sistemas que possuem de 75 kW a 5MW, com exceção de hidrogeradores que podem ter potência instalada de até 3MW nessa categoria.

Outro ponto importante ajustado pelas novas regras foi o maior prazo para utilização dos créditos gerados pela injeção de energia na rede a partir da unidade consumidora que passa a ser de 60 meses (5 anos).

A revisão da norma ofereceu grande impulso para a expansão do sistema de cogeração, como mostrado nos capítulos anteriores, sendo que os números refletem a situação presente no Brasil e a propensão de aumento da inserção de tais tecnologias na rede.

Mais uma modificação importante foi a possibilidade de compensar os créditos de unidades que não apresentam a geração e o consumo no mesmo endereço, que marca uma diferença importante entre a regra de 2012 e a vigente a partir de 2016.

As concessionárias também tiveram os tempos de resposta para as diferentes etapas de desenvolvimento do projeto diminuídas, reduzindo o tempo de implantação do projeto, e conseqüentemente um atendimento mais satisfatório para o cliente.

Os condomínios e parcerias entre diferentes pessoas também foram previstos e flexibilizados pela nova redação da Resolução ANEEL N° 482/2012 e permitem agora que a compensação seja partilhada entre os diferentes usuários a partir de uma só instalação ou fonte de geração.

O real impacto sobre os consumidores e distribuidoras poderá ser melhor observado com a consolidação do modelo de política pública adotado pelo Brasil, à medida que a expansão das unidades gerar dados suficientes para maiores estudos sobre as vantagens e desvantagens trazidos pelas inovações tecnológicas.

Como toda iniciativa, existem também aqueles que se opõem, como as distribuidoras, que já preveem uma queda significativa de suas receitas e apresentam questões relevantes sobre os custos que os demais usuários terão que arcar com a evolução da penetração de tal sistema.

Como toda nova regra, a norma está sujeita a adaptações e mudanças conforme o desenvolvimento da tecnologia e sua aderência e deve evoluir com o passar do tempo. Assim sendo, as implicações globais da norma ainda não podem ser antecipadas, mas em contrapartida, há um campo vasto para maiores discussões e estudos sobre o tema e possíveis proposições serão abordadas no item de trabalhos futuros.

Em adição à norma que define os parâmetros e regras para a micro e minigeração no país, também há a preocupação com o financiamento dos equipamentos e a diminuição do tempo de retorno do investimento. Várias linhas de crédito foram criadas para atender as pessoas que se interessem por esse sistema e alguns estados já estão praticando a isenção do ICMS sobre a energia gerada pelo consumidor, abrindo o caminho para que esta seja uma prática adotada cada vez em mais localidades do país com o aumento de incentivos.

4. Efeitos da Geração distribuída na qualidade

A normatização que trata especificamente da qualidade de energia no sistema de distribuição brasileiro se encontra no módulo 8 do PRODIST [20] que está na sétima revisão e é usado como referência para estabelecer a qualidade do produto e a qualidade do serviço no Brasil.

A qualidade do produto está relacionada com a conformidade em regime permanente e com a forma de onda da tensão e as perturbações que podem afetá-la. Já a qualidade do serviço está relacionada com os indicadores de continuidade e os tempos de atendimento das distribuidoras a seus clientes.

Neste capítulo será abordada com mais ênfase a qualidade do produto com base nos índices determinados pelo PRODIST no Brasil e a comparação com outros índices de referência usados em outras partes do mundo.

Os aspectos considerados da qualidade do produto em regime permanente ou transitório são:

- Tensão de regime permanente;
- Fator de potência;
- Harmônicos;
- Desequilíbrios de Tensão;
- Flutuação de Tensão;
- Variação de tensão de curta duração;
- Variação de frequência;
- Injeção de DC.

Alguns aspectos da qualidade terão mais ênfase devido ao fato de estarem fortemente ligados com a inserção de fontes no sistema distribuído, interferindo diretamente na rede.

Existem algumas diferenças entre os valores admitidos pelas normas brasileiras e as demais adotadas pelo mundo e em alguns casos a norma brasileira não possui limites nem valores de referência.

A injeção de DC na rede de corrente alternada não possui limites nem referências no PRODIST, mas pode ser observado na legislação da Bélgica, por exemplo [19]. O mesmo ocorre com as variações de tensão de curta duração (*Voltage Sags*) sendo que está atualmente em discussão e deverá ser adicionado ao PRODIST [20] em um futuro próximo.

É possível observar que a forma de medição é um fator determinante para observação dos diversos fenômenos que podem afetar a qualidade do produto. O PRODIST prevê algumas exigências mínimas para os equipamentos de medição que devem ser atendidas por todas as distribuidoras que ainda devem atender aos protocolos que dizem respeito à forma como as medidas devem ser feitas.

Os critérios e exigências a cerca das medições são um fator determinante para registrar os diversos tipos de fenômenos, pois, sem os requisitos mínimos de resolução e erro dos equipamentos alguns fenômenos de qualidade podem não ser registrados ou registrados de forma errônea, trazendo prejuízos.

As medidas de harmônicos, por exemplo, são diretamente afetadas pelo modo de medição dos equipamentos tanto no que diz respeito ao algoritmo como na resolução da aquisição de dados.

4.1 Variação de Tensão Em Regime Permanente

A rede possui valores típicos padronizados de tensão que são aplicados em diferentes níveis, dependendo do ponto da rede no qual se encontra e também pode ser diferente entre os países.

Tendo em vista o sistema brasileiro de distribuição, os valores usuais de base para tensões na baixa tensão são 220V entre fases e 127V entre fase e neutro. Assim, geralmente as distribuidoras usam tais valores como referência [20].

Existem faixas de variação que são toleradas durante a operação do sistema sem que haja danos nas instalações. A partir de variações maiores, a concessionária de energia que opera o sistema pode sofrer penalidades dependendo dos níveis de inconformidade e tempo em que tal anomalia foi registrada.

Os sistemas de GD atuam e são impactados por tais variações na rede. Por um lado, os geradores inclusos na distribuição podem melhorar os níveis de tensão quando injetam potência ativa e potência reativa. Por outro lado, pode haver ilhamentos conforme a tensão da rede se distancia da tensão de referência, necessária para que o equipamento que conecta a rede ao ponto gerador sincronize sua operação e ofereça proteção ao sistema.

Para manter os níveis de tensão em intervalos adequados, deve existir uma previsão de qual será a queda de tensão ao longo dos alimentadores da rede para

dimensionar corretamente os equipamentos, para que não haja sobretensão nos pontos próximos à subestação e subtensão nos pontos mais distantes.

Quando fontes de geração são inseridas ao longo da rede de distribuição, os níveis de tensão nas extremidades de uma ramificação da rede podem ser melhorados. Existirá menor necessidade de aumento de tensão para compensar as perdas ao longo das linhas e a tensão nos pontos mais distantes do alimentador principal também poderão alcançar melhoras.

A menor necessidade de tensão aplicada pelos alimentadores/subestações também traz diminuição nas perdas técnicas, uma vez que a distância entre o centro consumidor e o gerador é menor.

O ponto negativo no emprego dessa técnica é a característica intermitente da grande parte dos geradores que está sendo empregada na GD, pois como visto previamente, a tecnologia predominante aplicada é a geração fotovoltaica.

Além da intermitência da geração que depende das condições climáticas do dia, a energia solar não está disponível no horário de pico de consumo, que normalmente ocorre no fim da tarde e começo da noite. Tal característica traz novos desafios para a operação dos sistemas que, como visto, se torna mais complexa com riscos de aumento de tensão quando a geração distribuída está em alta e necessidade de maior regulação de tensão quando a GD não está atuando [17], [18].

4.2 Flutuações de Tensão (*Flicker*)

O fenômeno consiste em uma variação intermitente da tensão. É imperceptível com alguns tipos de lâmpadas, sendo que a incandescente é mais suscetível a esse fenômeno que pode causar efeitos físicos em pessoas expostas a esse fenômeno na iluminação, que podem variar de desconforto e cansaço visual até causar convulsões em pessoas mais sensíveis. Esses efeitos variam de acordo com a atividade praticada e de acordo com a idade das pessoas expostas.

Esse fenômeno é comum em fontes de energia renováveis principalmente nos geradores eólicos, devido à variação da velocidade do vento e o sombreamento provocado pela passagem das pás pela base da torre.

As demais tecnologias de renováveis não tendem a provocar esse efeito no sistema. Os painéis PV apesar de também oferecerem variações na tensão devido a

mudanças de irradiação, não provocavam tais mudanças de forma tão rápida e cíclica como os geradores eólicos, por exemplo [19].

4.3 Distorções Harmônicas

4.3.1 Definições

A distorção da forma de onda é analisada através de técnicas como a transformada de Fourier, por exemplo, que decompõe a onda em frequências harmônicas. Existem outras técnicas disponíveis para análise de sinais como a transformada *Wavelet*, por exemplo. Para definir a técnica a ser usada é necessário conhecer algumas características do sinal para que o método seja o mais eficiente para sua decomposição.

No caso de análises para regime permanente o melhor método até agora é a transformada de Fourier, enquanto que para sinais transitórios a melhor alternativa para análise do sinal é a transformada *Wavelet*.

Os harmônicos por definição ocorrem em regime permanente e são múltiplos inteiros da frequência fundamental, sendo que há estudos recentes que também tratam dos Interharmônicos, mas esse fenômeno ainda não será tratado no contexto deste estudo.

Os transitórios são usualmente dissipados em alguns segundos e normalmente ocorrem durante o acionamento dos circuitos, e como são distúrbios de curtíssima duração não têm grande interferência nos sistemas que serão estudados.

Os harmônicos mais comuns são aqueles que apresentam frequências mais baixas. Os harmônicos de ordem maior que 25 (1500 Hz para frequência base de 60 Hz) não afetam o sistema de potência, mas podem interferir com dispositivos eletrônicos de baixa potência [17].

Para analisar a onda e descobrir quais são as harmônicas que a compõem existem alguns algoritmos diferentes que são baseados na transformada de Fourier para decompor o sinal obtido de forma computadorizada.

Como a transformada exige procedimentos matemáticos complexos, demanda certo processamento do equipamento que a utiliza, e assim vários esforços foram empregados para simplificar o processo e otimizar o processamento computacional sem que a qualidade da análise seja comprometida.

O *software* usado para as análises dos sinais estudados é o Matlab e o ambiente de simulação Simulink que possui a ferramenta FFT que aplica a transformada rápida de Fourier.

4.3.2 Cargas não lineares

Cargas eletrônicas são consideradas como cargas não lineares, pois sua corrente não segue o mesmo perfil da onda de tensão. São exemplos dessas cargas: computadores, lâmpadas compactas entre outros usados em diversos tipos de ambientes, tanto residenciais como comerciais e industriais.

Já retificadores trifásicos, por exemplo, são usados em aplicações industriais e é um exemplo de carga que gera muitas distorções na rede, principalmente no setor industrial onde são muito utilizados.

Como visto anteriormente muitas cargas presentes na rede têm características cada vez menos lineares devido ao aumento de cargas eletrônicas e, conseqüentemente, não lineares e por si só provocam distúrbios na rede que podem afetar os consumidores.

Assim como na frequência fundamental, a fase entre as tensões e correntes harmônicas pode “fluir” numa determinada direção, outra harmônica pode estar transferindo energia no sentido oposto. Tudo depende de onde estão as fontes e as cargas e esse efeito gerado pelas cargas não lineares interferem em todo o ambiente onde estão alocados geradores e consumidores de potência que podem ser sensíveis aos efeitos das distorções.

A simples mudança de fase pode modificar significativamente a forma de onda, sem mudar seu valor eficaz. Cargas que sejam sensíveis à forma de onda (como o retificador com filtro capacitivo) reagirão de maneira distinta em cada situação [21].

4.4 Normas e Limites de Harmônicas

A norma EN 50160 trata dos limites harmônicos de tensão tolerados de acordo com cada ordem harmônica. Essa normatização é usada para caracterização da tensão fornecida pelas redes gerais de distribuição.

Tabela 4.1- Limites harmônicos de tensão na rede pública de distribuição- EN 50160 [22].

Harmônicas ímpares				Harmônicas pares	
Não múltiplo de 3		Múltiplos de 3			
Ordem h	Tensão Relativa (%)	Ordem h	Tensão Relativa (%)	Ordem h	Tensão Relativa (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.5	6 a 24	0.5
13	3	21	0.5		
17	2				
19	1.5				
23	1.5				
25	1.5				

A seguir algumas normas brasileiras ditadas pelo Procedimento de Distribuição [20] que devem ser seguidas como referencia pelas distribuidoras de energia para garantir a qualidade do produto aparecem descritas na tabela 4.2.

A primeira tabela diz respeito ao nível de distorção total da tensão admitido, de acordo com o nível do barramento existe uma distorção máxima permitida que decai de acordo com o aumento da tensão.

Tabela 4.2 Valores de referencia globais das distorções harmônicas totais (em porcentagem da tensão fundamental) [20].

Tensão nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT) [%]
$V_N \leq 1\text{kV}$	10
$1\text{kV} < V_N \leq 13,8\text{ kV}$	8
$13,8\text{ kV} < V_N \leq 69\text{ kV}$	6
$69\text{ kV} < V_N < 230\text{ kV}$	3

A tabela 4.3 também do [20] indica as distorções harmônicas individuais de tensão admitidas por nível de tensão, lembrando que é possível ultrapassar o nível

permitido de determinado nível e não ultrapassar o nível de distorção total indico pela tabela anterior.

Tabela 4.3: Níveis de referencia para distorções harmônicas individuais de tensão (em percentagem da tensão fundamental) [20].

Ordem Harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão [%]				
	$V_N \leq 1\text{kV}$	$1\text{ kV} < V_N \leq 13,8\text{ kV}$	$13,8\text{ kV} < V_N \leq 69\text{kV}$	$69\text{kV} < V_N < 230\text{kV}$	
Ímpares não múltiplas de 3	5	7,5	6	4,5	2,5
	7	6,5	5	4	2
	11	4,5	3,5	3	1,5
	13	4	3	2,5	1,5
	17	2,5	2	1,5	1
	19	2	1,5	1,5	1
	23	2	1,5	1,5	1
	>25	1,5	1	1	0,5
Ímpares múltiplas de 3	3	6,5	5	4	2
	9	2	1,5	1,5	1
	15	1	0,5	0,5	0,5
	21	1	0,5	0,5	0,5
	>21	1	0,5	0,5	0,5
Pares	2	2,5	2	1,5	1
	4	1,5	1	1	0,5
	6	1	0,5	0,5	0,5
	8	1	0,5	0,5	0,5
	10	1	0,5	0,5	0,5
	12	1	0,5	0,5	0,5
	>12	1	0,5	0,5	0,5

Assim como existem limites para os harmônicos na onda de tensão também existem limites para os harmônicos de corrente que circulam pelos sistemas. E assim como na tensão a corrente também apresenta diferentes níveis de tolerância para as diferentes ordens harmônicas dependendo do nível de corrente empregado como mostrado nas tabelas 4.4, 4.5, 4.6, sendo que a tabela 4.6 é aplicada para sistemas de cogeração.

Tabela 4.4 - Limites de distorção da corrente para sistemas de distribuição (120 V a 69kV) [20].

Máxima corrente harmônica em % da corrente de carga(Io-valor da componente fundamental)						
Harmônicas Ímpares						
Icc/Io	<11	11≤N<17	17≤N<23	23≤N<35	35<N	TDD(%)
<20	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20<50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50<100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100<1000	12	5,5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2,5	1,4	20

Tabela 4.5 - Limites de Distorção da corrente para sistemas de subdistribuição (69kV a 161 kV) [20].

Limites para harmônicas de corrente de cargas não-lineares no PAC com outras cargas						
Harmônicas Ímpares						
Icc/Io	<11	11≤N<17	17≤N<23	23≤N<35	35<N	TDD(%)
<20	2	1	0,75	0,3	0,15	2,5
20<50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4
50<100	5	2,25	2	0,75	0,35	6
100<1000	6	2,75	2,5	1	0,5	7,5
>1000	7,5	3,5	3	1,25	0,7	10

Tabela 4.6 - Limites de distorção de corrente para sistemas de alta tensão (>161kV) e sistemas de geração e cogeração.

Harmônicas ímpares						
Icc/Io	<11	11≤N<17	17≤N<23	23≤N<35	35<N	THD(%)
<50	2	1	0,75	0,3	0,15	2,5
≥50	3	1,5	1,15	0,45	0,22	3,75

A recomendação do Institute of Electrical and Eletronics Engineer (IEEE) (Instituto de Engenheiros Eletrônicos e Eletricistas) presente na tabela 4.7 serve como base para muitas normatizações e geralmente apresenta limites mais restritos desenvolvidos a partir de estudos e convenções entre os especialistas da área.

Tabela 4.7: Limite de injeção de corrente harmônica da IEEE 519-1992

Limite de injeção de corrente harmônica	
Ordem Harmônica	Porcentagem
<11 ^a	4,0%
<11 ^a a <17 ^a	2,0%
<17 ^a a <23 ^a	1,5%
<23 ^a a <35 ^a	0,6%
<35 ^a ou maior	0,3%
Distorção Harmônica Total	5,0%

Existem também limites para os equipamentos que são divididos de acordo com a classe na qual se encaixam conforme mostra a tabela 4.8.

Tabela 4.8: Limites para harmônicos de corrente

Ordem do Harmônico N	Classe A Máxima corrente[A]	Classe B Máxima corrente [A]	Classe C(>25W) % da fundamental	Classe D(>75W,<600) [mA/W]
Harmônicas Ímpares				
3	2,30	3,45	30 FP	3,4
5	1,14	1,71	10	1,9
7	0,77	1,155	7	1,0
9	0,40	0,60	5	0,5
11	0,33	0,495	3	0,35
13	0,21	0,315	3	0,296
$15 \leq N \leq 39$	$0,15 \cdot \frac{15}{N}$	$0,225 \cdot \frac{15}{N}$	3	$\frac{3,85}{N}$
Harmônicas Pares				
2	1,08	1,62	2	
4	0,43	0,645		
6	0,3	0,45		
$8 \leq N \leq 40$	$0,23 \cdot \frac{8}{n}$	$0,35 \cdot \frac{8}{N}$		

A figura a seguir mostra um estudo que testou diferentes inversores usualmente aplicados nos sistemas de geração solar usados nos sistemas de distribuição. É possível observar uma grande diferença em algumas ordens harmônicas de um equipamento para outro.

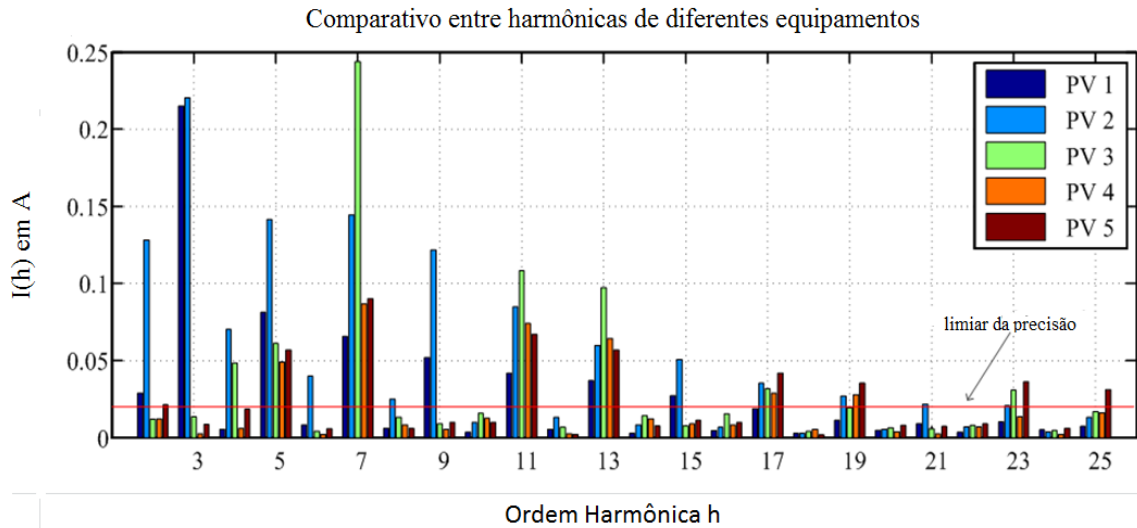


Figura 4.1- Harmônica de corrente medidos em diferentes equipamentos (PV) [1].

Segundo as normas, esses equipamentos não teriam problemas por sua natureza harmônica em si, mas sua interação com a carga pode fazer com que os níveis de tensão e corrente harmônicas sejam ultrapassados, e com o aumento da inserção de tais fontes da rede de distribuição essa poluição pode se tornar problemática.

A normatização e limites impostos pelos diferentes órgãos governamentais e centros de estudos são fundamentais para garantir a qualidade do produto que chega aos consumidores. A definição de limites e punições para sua ultrapassagem permite preservar e garantir a vida útil dos equipamentos e instalações sujeitas às distorções.

Com o novo cenário de geração distribuída torna-se imprescindível observar atentamente como os novos pontos geradores irão se comportar, uma vez inseridos no sistema, e implementar ações de controle e mitigação de potenciais riscos que a nova tecnologia pode trazer à rede tradicional.

5. Simulação de Fontes de Harmônicos na Rede de Distribuição.

5.1 Considerações Iniciais

Nos capítulos anteriores foram apresentados alguns conceitos e definições que serão usados como apoio para obtenção e comparação de resultados. Alguns cenários foram simulados com a ferramenta de *software* Matlab para verificar o comportamento da interação entre fontes de tensão e cargas não lineares. Para analisar um determinado sinal é necessário conhecer algumas de suas características, pois existem diferentes métodos para tratar os sinais obtidos através das simulações. Um desses métodos muito usados para sinais em regime permanente, como é o caso das simulações feitas nos circuitos que serão apresentados, é a teoria de Fourier. Para sinais transitórios, por exemplo, o método de Fourier não seria o mais indicado e uma alternativa poderia ser o método utilizando a transformada *Wavelet* [17].

5.2 Condições iniciais do sistema

O sistema simulado no simulink, ferramenta do Matlab, foi configurado com cargas lineares (resistores e indutores) e não lineares (cargas alimentadas por um conversor eletrônico) com valores típicos para um sistema de baixa tensão alimentado com 220 V alimentados por um transformador e uma fonte de tensão controlada, além de um medidor para aferir corrente e tensão nas três fases como mostrado na figura 5.1 que apresenta a captura de tela do ambiente de simulação, simulink, assim sendo não é possível à tradução dos componentes.

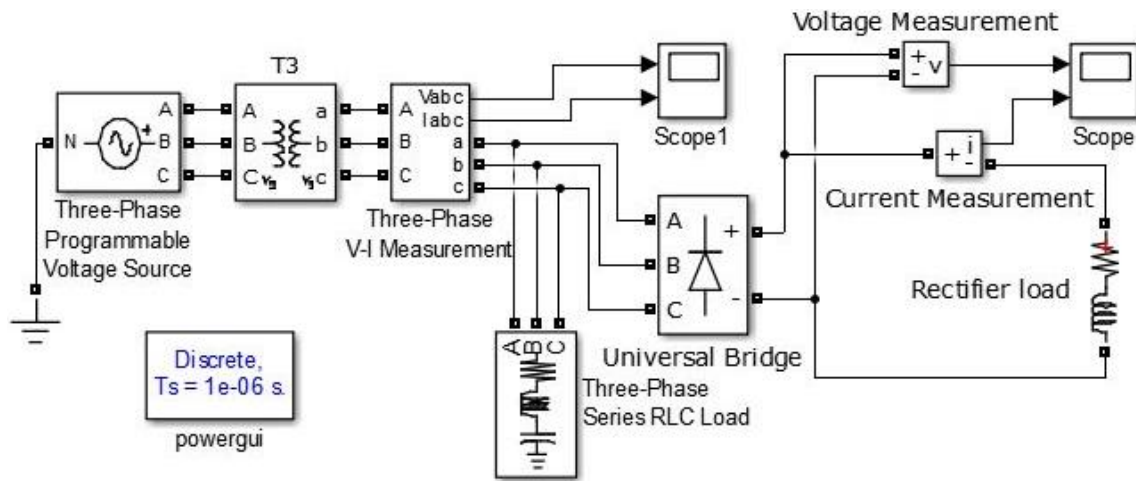


Figura 5.1- Modelo simulado com carga equilibrada

A fonte que irá simular a injeção da poluição na rede gerada pelos inversores de frequência pode ser programada com os harmônicos desejados para que se possa avaliar os efeitos da poluição harmônica no circuito de forma controlada e a figura 5.2 apresenta a janela que permite a configuração dos parâmetros.

Importante observar que não foi considerada a variação de fase das harmônicas, bem como diferentes configurações de conexão no transformador para possibilitar uma visualização das interferências de forma mais direta. A rede utilizada para as simulações foi simplificada apenas com as cargas. E observando também que o trabalho não considerou o GD com PV nas simulações.

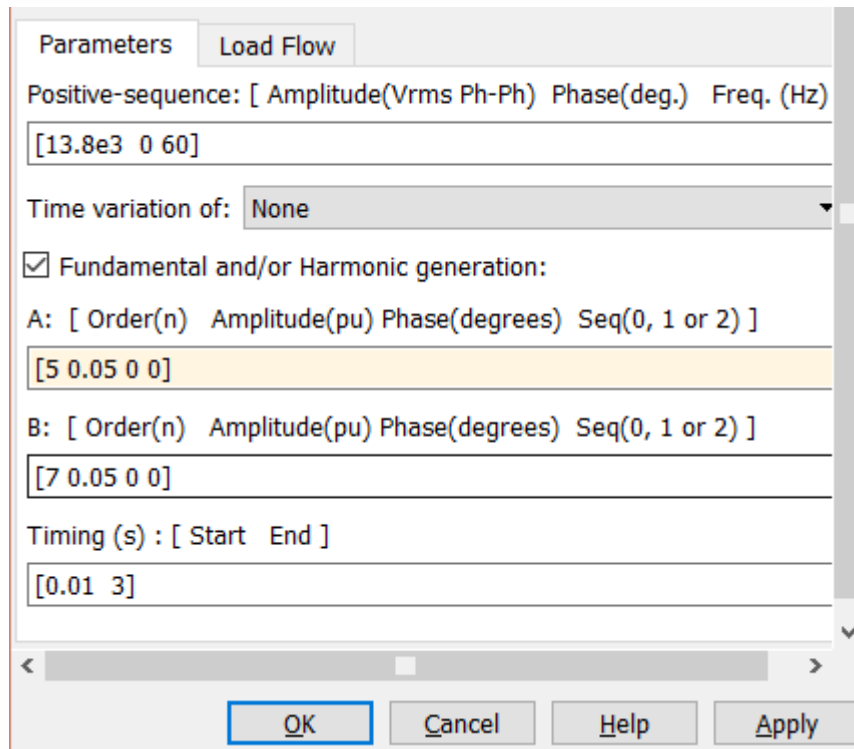


Figura 5.2- Bloco para configuração da fonte programada

Para analisar as formas de onda e suas componentes será utilizada a função “FFT Analysis” como mostra a figura 5.3.

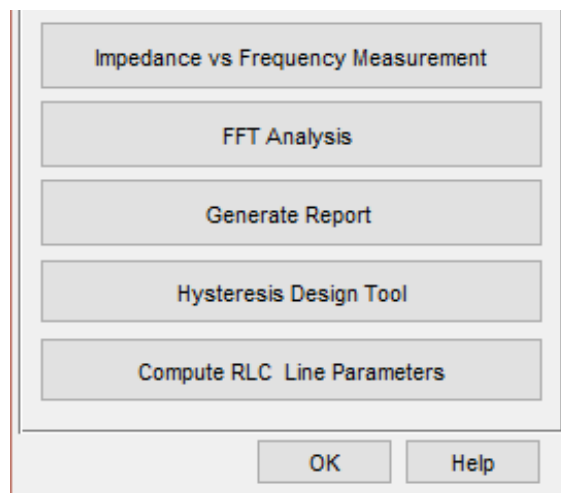


Figura 5.3- FFT Analysis.

Como resultado a tela com a forma de onda selecionada ou a amostra selecionada será mostrada na parte superior da tela e sua decomposição em corrente ou tensão harmônica mostrada no quadro logo abaixo como mostrado na figura 5.4.

A onda em azul mostra o sinal de tensão e a parte em vermelho é a amostra analisada. Também é mostrado o Índice total de distorção harmônica da onda com relação à frequência fundamental de 60 Hz.

As frequências harmônicas presentes neste circuito são devidas somente a influencia dos elementos da carga e do circuito em geral, nenhuma poluição foi injetada, a fonte idealmente deveria fornecer tensão senoidal apenas com a frequência fundamental de 60 Hz.

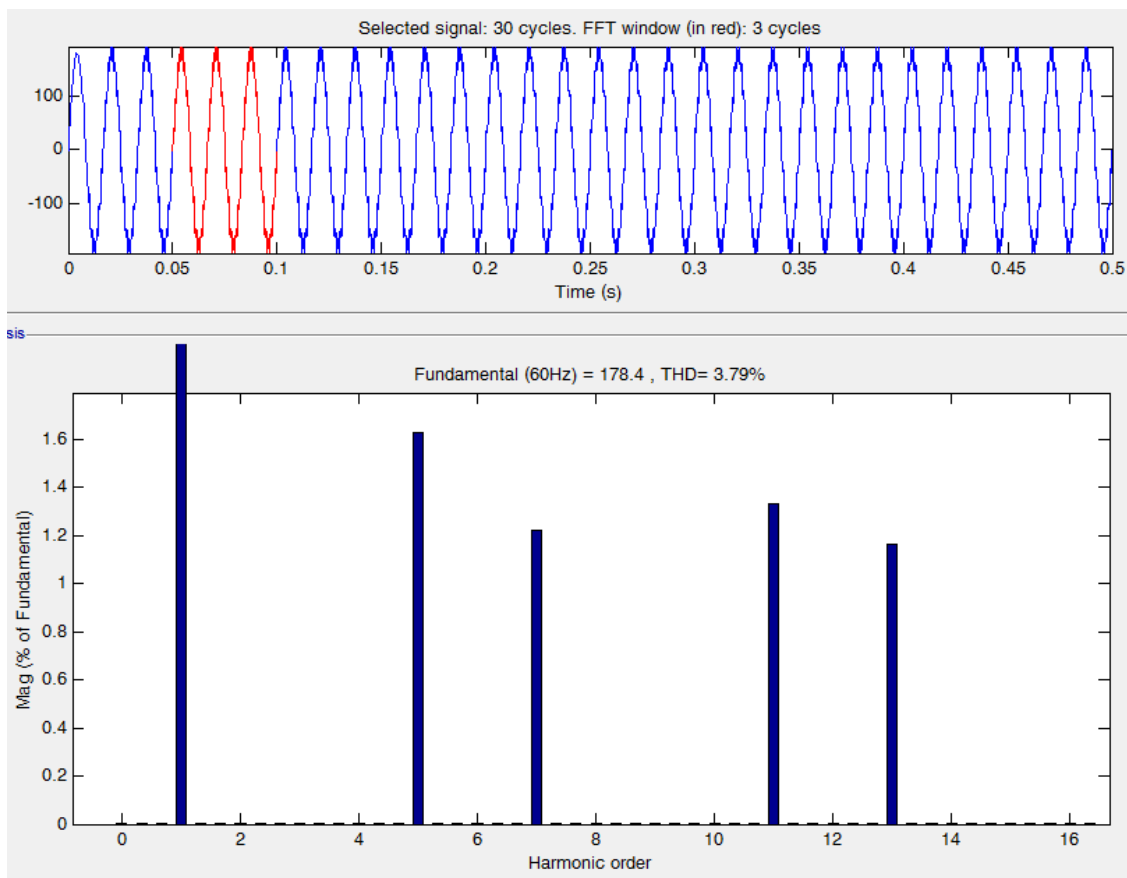


Figura 5.4- Forma de onda e decomposição em harmônicos.

A corrente consumida pela carga tem características condizentes com uma ponte de seis pulsos que pode ser observada na figura 5.5 e a figura 5.6 apresenta a forma de onda consumida pelas cargas assim como o índice de distorção harmônica de corrente.

A ponte de seis pulsos é usada para retificar o sinal que vai para a carga. Seu principio é recortar a onda de tensão injetada nos pontos desejados e fornecer corrente contínua à carga.

Comparando as diferenças entre as formas de onda de tensão e corrente observadas nas figuras é possível confirmar a não linearidade das cargas usadas nos circuitos, bem como a contribuição de cada harmônica em porcentagens da corrente da frequência fundamental.

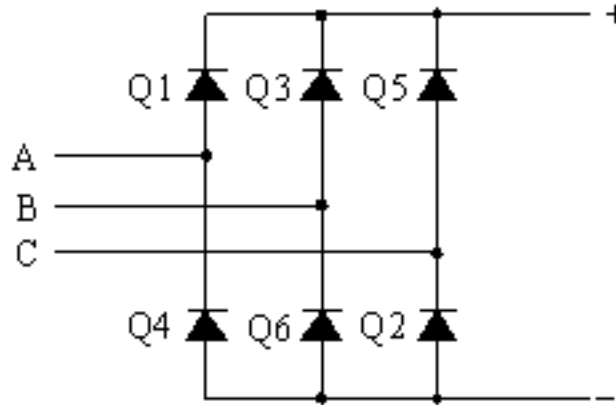


Figura 5.5- Ponte universal de seis pulsos

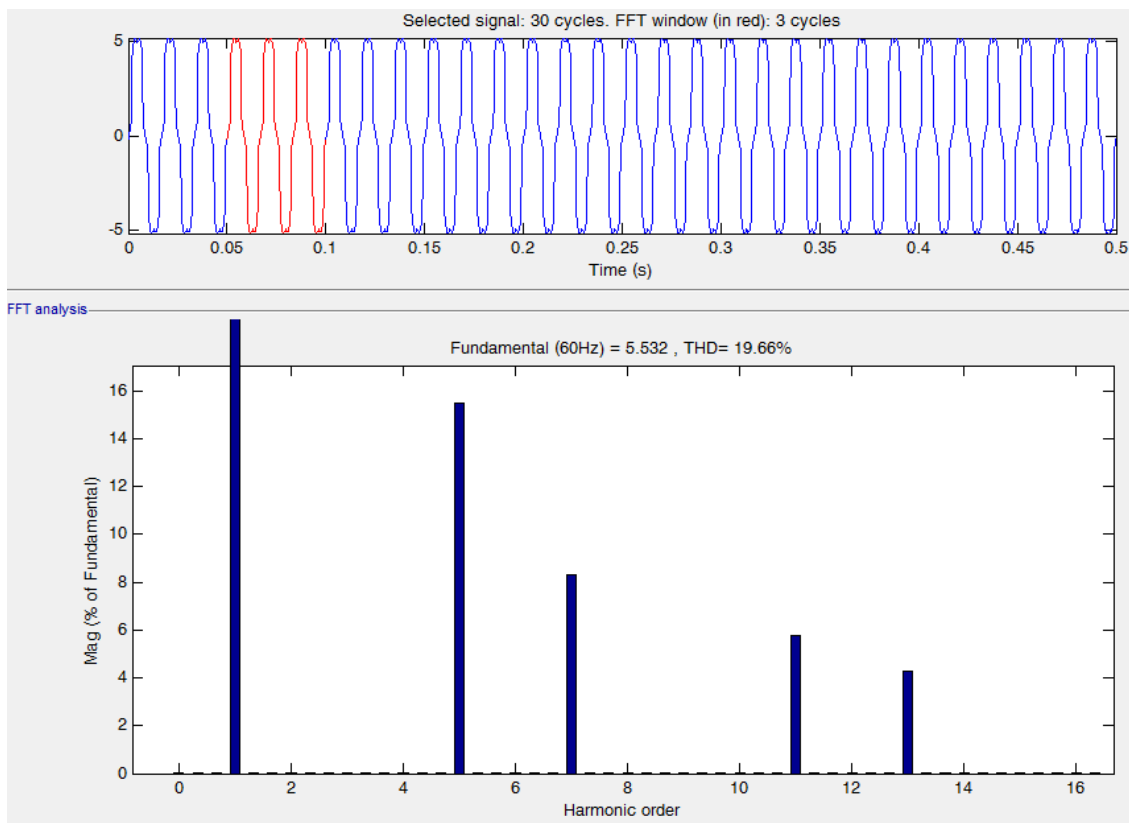


Figura 5.6- Onda de Correntes e harmônicos próprios da carga.

Observa-se apenas até a 16ª harmônica por causa da taxa de amostragem usada para coletar os dados que estão ligados com o número de pontos definidos pela

configuração do sistema. Para aumentar a quantidade de pontos a simulação ficará cada vez mais lenta.

5.3 Cargas equilibradas

No exemplo simulado, representado pela Figura 5.1, há um circuito com uma fonte que gera poluição na rede em forma de harmônicos como acontece com inversores de frequência acoplados a conversores de energia de corrente contínua (dc) como nos módulos fotovoltaicos.

Os principais efeitos observados na simulação foram os harmônicos gerados pela carga e os harmônicos advindos da fonte de tensão. Outros estudos sobre efeitos na qualidade positivos e negativos serão propostos para próximos trabalhos.

Para melhor observar os efeitos das frequências inseridas pela fonte e sua interação com a carga, primeiramente foram feitas simulações com apenas a situação ideal, que seria uma tensão puramente senoidal com frequência fundamental de 60 Hz, como mostrado nas Figuras 5.4 e 5.6.

O ambiente Simulink usa o recurso de análise de frequências que oferece a porcentagem das frequências harmônicas em relação à fundamental e para isso usa um algoritmo baseado na transformada rápida de Fourier.

No gráfico apresentado na Figura 5.7 é possível observar os valores aferidos através da simulação do circuito para a frequência fundamental. Pode-se observar as principais frequências que compõem o sinal de corrente, também com a adição de frequências harmônicas na tensão de alimentação.

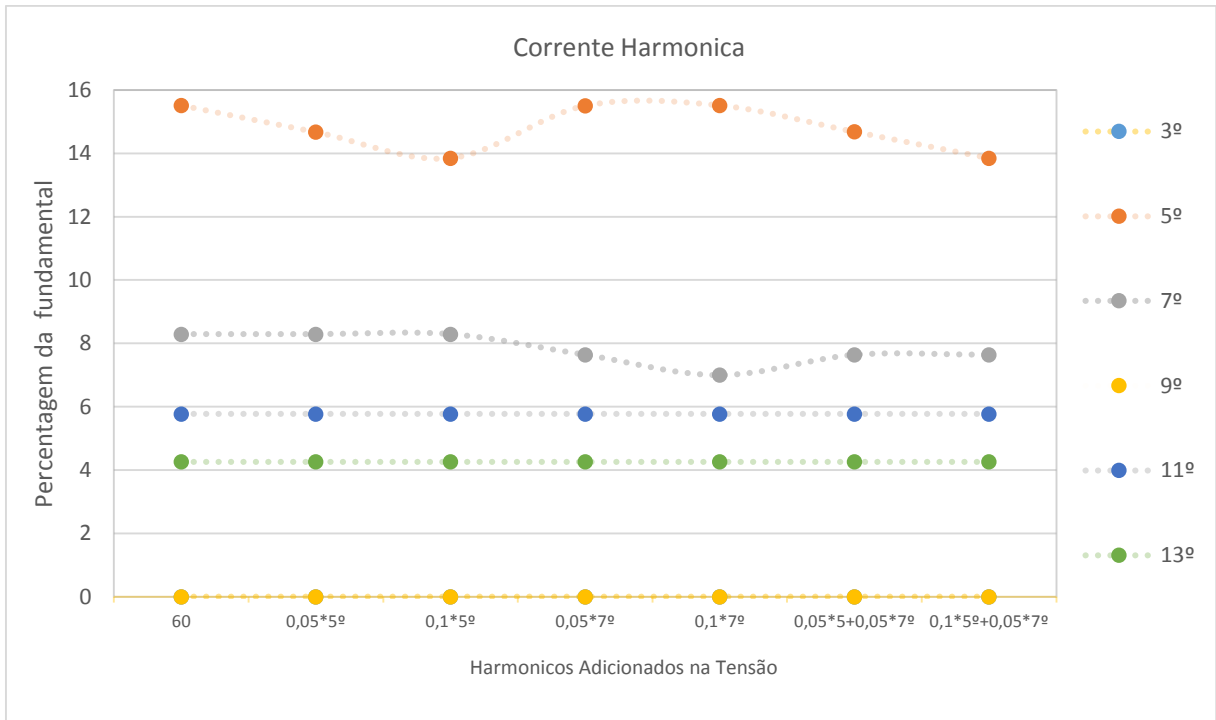


Figura 5.7- Corrente harmônica nas diferentes condições.

A adição de tensão harmônica presente no gráfico vai de 5 a 10% da fundamental e são aplicadas as harmônicas de 5ª e 7ª ordem que correspondem a 300 e 420 Hz respectivamente.

As frequências foram escolhidas em um primeiro momento de acordo com as frequências harmônicas já presentes no circuito devido à carga e sua característica de corrente.

A influência desses níveis de poluição pode ser representada também por um índice de distorção harmônica total (THD) que pode estar relacionado a corrente (THD_I) ou a tensão (THD_V). O índice pode ser calculado através da equação 1 [18].

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1}$$

Equação 1

O gráfico a seguir representa o THD_I obtido com a mesma simulação usada para obter os índices individuais de contribuições de cada harmônica aferida no gráfico anterior.

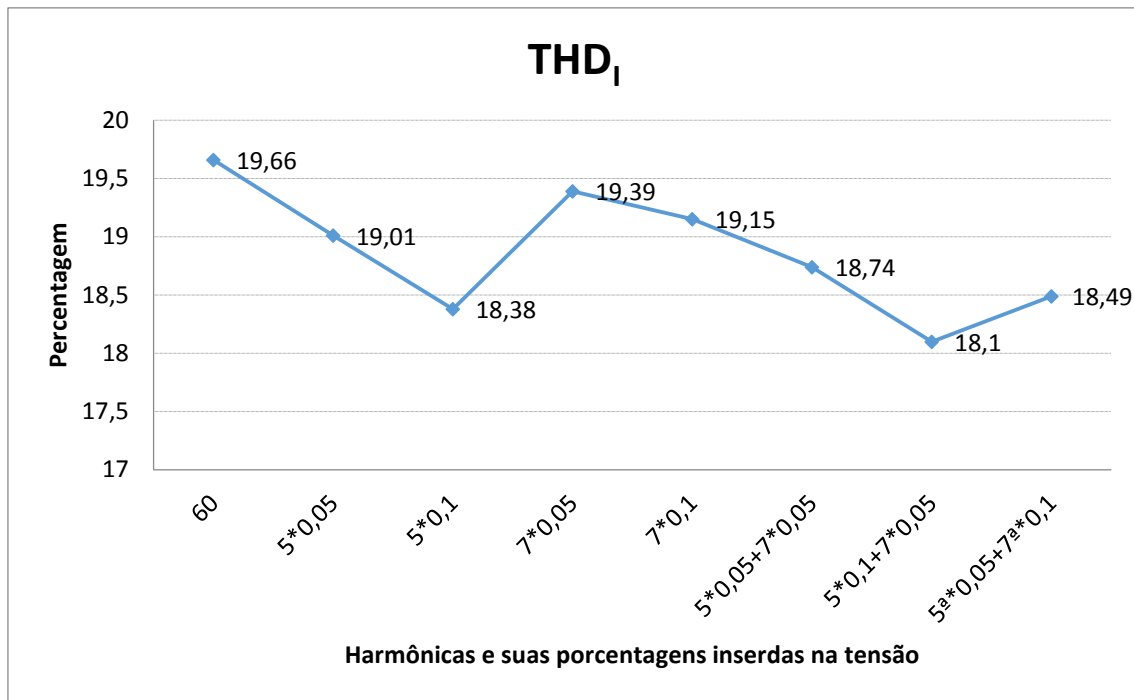


Figura 5.8 – Índice de distorção harmônica de corrente

A partir dos dados coletados é possível notar que, quando se adiciona frequências já presentes no circuito alimentado apenas com a frequência fundamental, as respectivas harmônicas diminuem devido ao cancelamento de fase, quando existe poluição injetada pela fonte de corrente que não possui ângulo defasado de 180 graus aproximadamente.

A relação entre a quantidade de poluição injetada e seu reflexo na corrente é praticamente linear, pois para variação de 5% na tensão existe variação de aproximadamente 5% na corrente somente na frequência injetada. No caso da 5ª harmônica, para injeção de 10% da 5ª harmônica na tensão, a variação dobra em relação ao circuito sem poluição e, novamente, apenas a 5ª harmônica de corrente sofrerá variação. O mesmo ocorre para a 7ª harmônica, mas sua variação apresenta variação inicial de aproximadamente 7,8% e para o dobro de tensão injetada a variação na corrente também dobra.

Simulando outras harmônicas que não estão presentes no circuito inicial como a 3ª harmônica, é possível notar um aumento no THD_I do circuito como mostra o gráfico da Fig. 5.8.

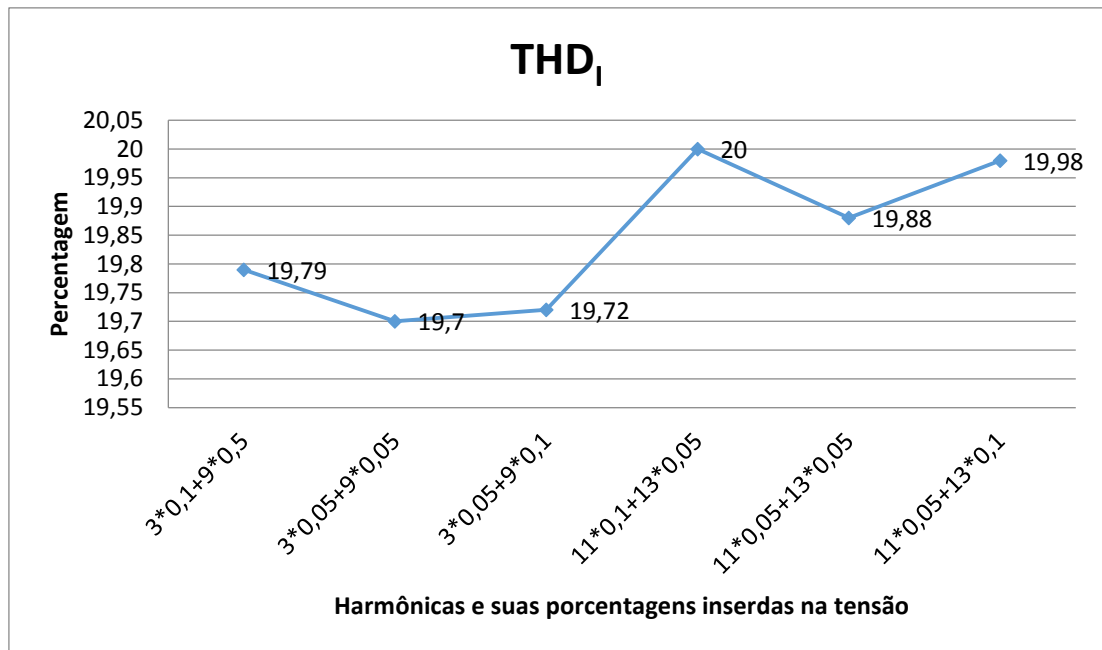


Figura 5.8 – Índice de distorção harmônica de corrente

Esse aumento ocorre, pois não há cancelamento de frequências, apenas adição de influência de outras frequências. Quando se observa o comportamento da corrente com o aumento da poluição da tensão, como mostrada na Figura 5.9, sua interferência fica clara, pois a contribuição da 3ª harmônica é praticamente 5 vezes menor do que a influência na tensão. Observando a 9ª harmônica, sua contribuição na corrente é praticamente 10 vezes menor como pode ser observado na Fig. 5.9.

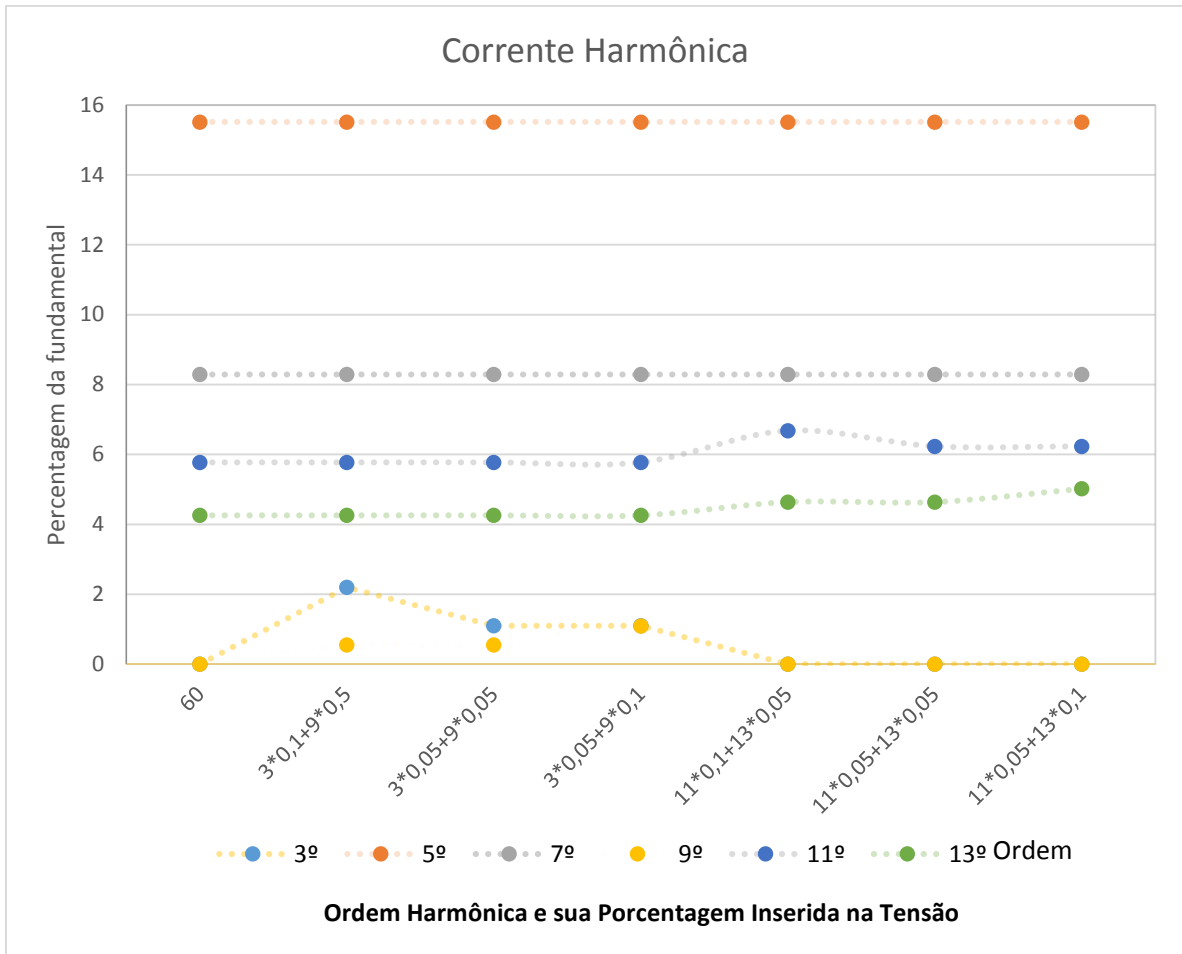


Figura 5.9- Corrente Harmônica.

Essa característica merece estudos mais aprofundados visto que muitos inversores comerciais avaliados segundo critérios de injeção harmônica apresentam forte presença dessas frequências [23]. Observando que as frequências que mudaram possuem sequência 0, outras frequências da mesma sequência foram simuladas para verificar a relação do resultado e com essa característica e se tais propriedades são válidas também para as demais frequências de sequências diferentes mais simulações foram feitas com níveis maiores de frequências de sequência positiva e negativa.

A figura 5.10 a seguir mostra a inserção de 15% da 15ª harmônica no circuito, uma quantidade bem acima dos valores admitidos para tal ordem harmônica e mesmo se considerar-se apenas o THD. Pode-se observar que a influência dela não se mistura com as demais frequências na corrente quando inserida na fonte de tensão mesmo quando a quantidade de harmônicas de uma mesma frequência é colocada em níveis maiores que 10%.

As simulações anteriores foram apenas adicionados valores próximos dos toleráveis segundo a norma, mas as influências passam ser mais acentuadas que as mostradas nas simulações anteriores, mas seu comportamento permanece inalterado em relação às frequências afetadas na corrente em relação à tensão.

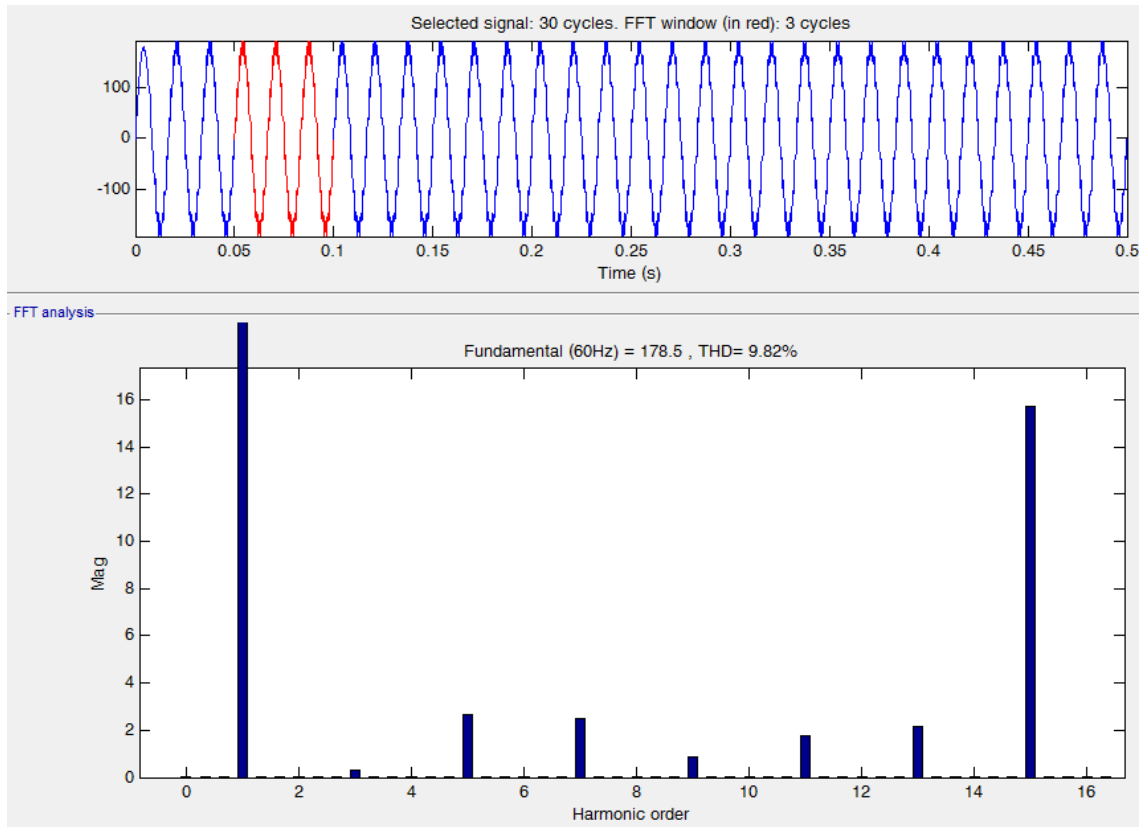


Figura 5.10 - Adição de 15% da 15^a harmônica.

É possível constatar que a relação entre a tensão e a corrente da 15^a ordem apresenta uma relação 15 vezes menor como pode ser visto na figura 5.11. A influência da harmônica simulada é de cerca de 1% para a adição de 15% de distorção na tensão.

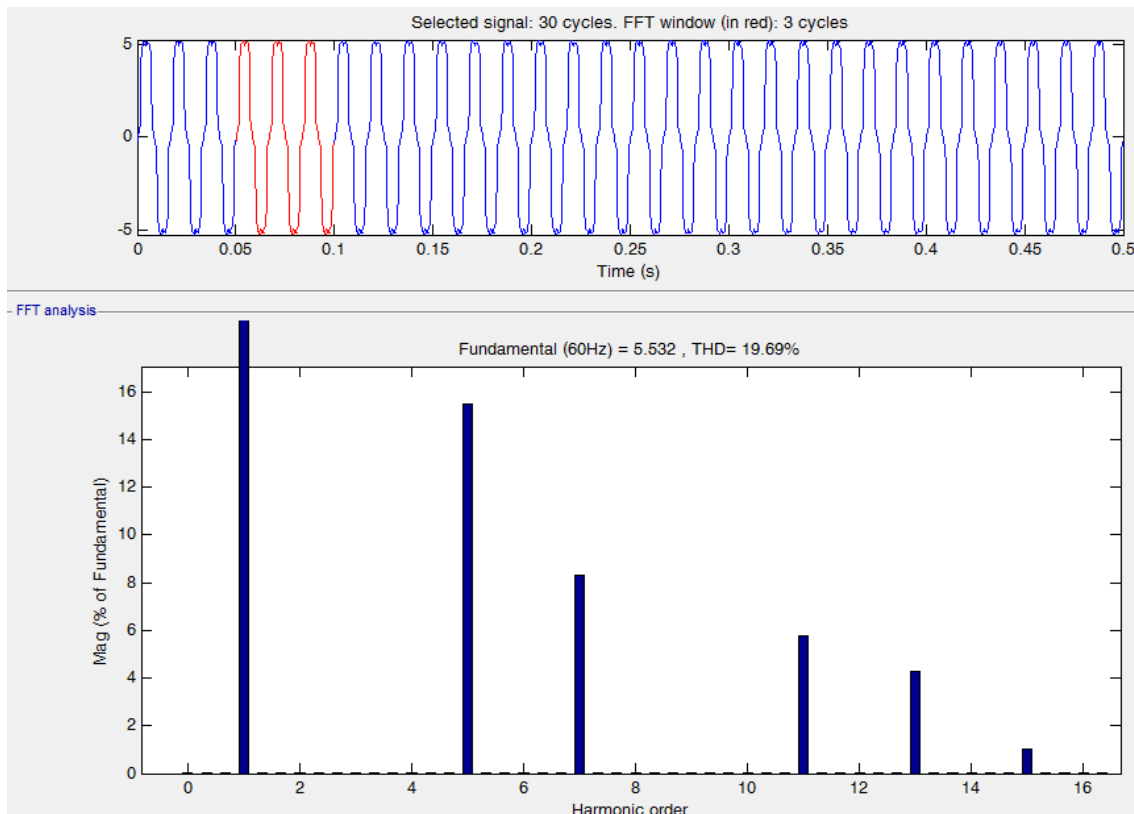


Figura 5.11 – Adição de apenas 1% da 15^a frequência harmônica.

A seguir foi verificado se as demais frequências também apresentavam mudança em sua relação entre os valores de tensão e corrente assim como observado com as frequências injetadas artificialmente no circuito

Mas, como pode ser observado na figura 5.12, as proporções se mantêm inalteradas mesmo com o aumento significativo das distorções independentemente da sequência a que façam parte.

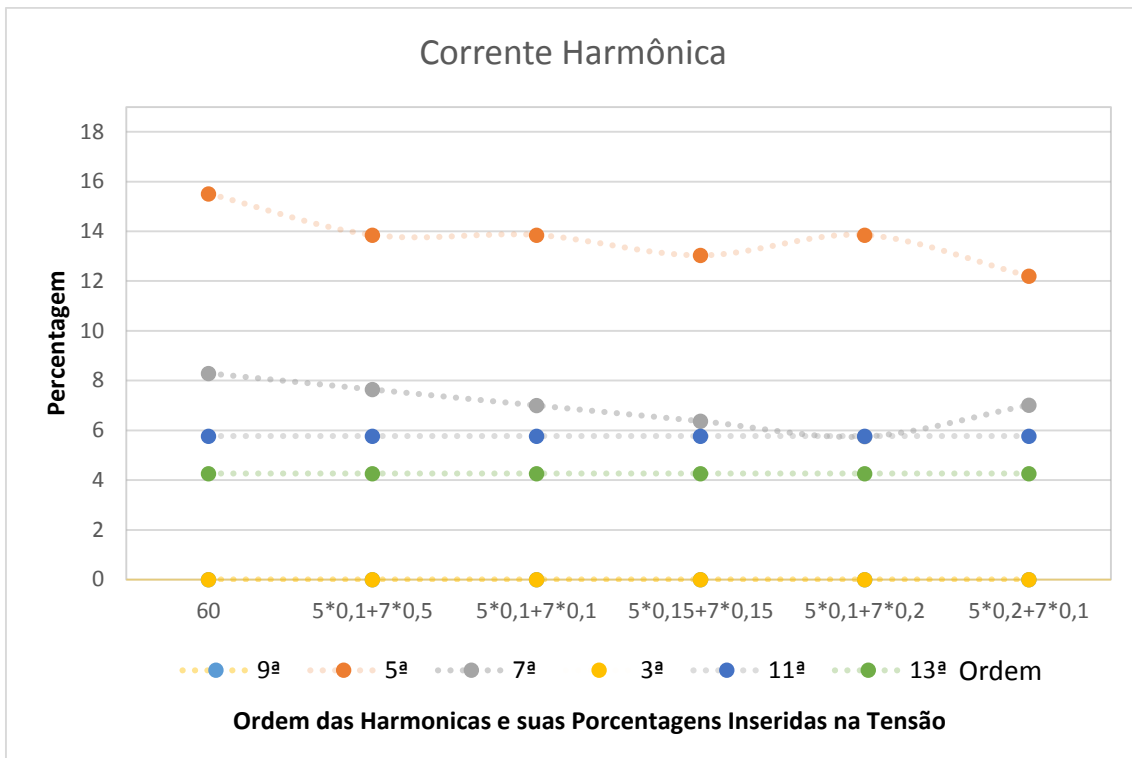


Figura 5.12 – Corrente harmônica com maiores distorções na tensão.

Mesmo quando se adicionam níveis mais elevados de harmônicas de 3ª e 9ª ordem como mostrado na figura 5.13 a relação entre sua injeção de tensão e corrente apresentam comportamento similar a baixas injeções de distorções e as proporções entre os valores de uma mesma frequência permanecem inalteradas, permitindo afirmar que seja uma relação linear e a mesma propriedade pode ser verificada nas demais frequências.

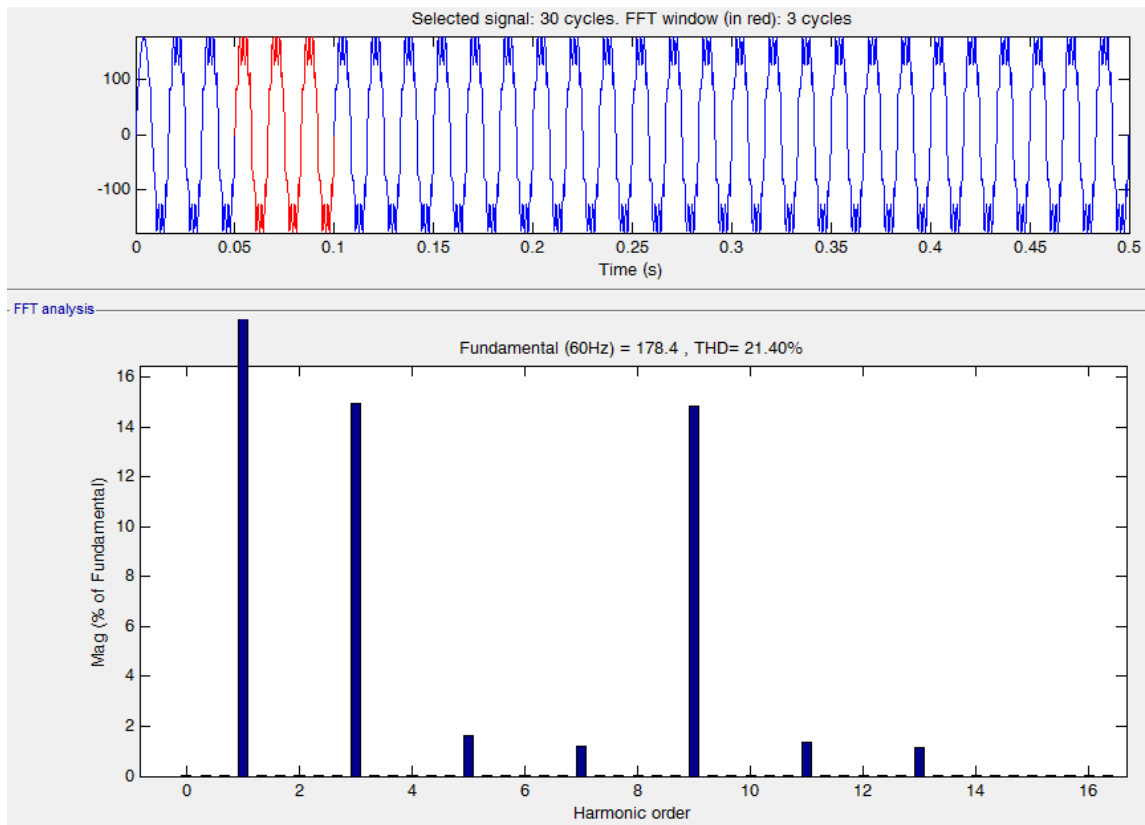


Figura 5.13 – Tensão com 3^a e 9^a harmônica

A injeção de mais distorção de tensão provocou aumento proporcional na corrente, assim mesmo quando a frequência não está presente anteriormente no sistema sua variação é proporcional se tratando de mesma frequência de comparação como pode ser observado na figura 5.14.

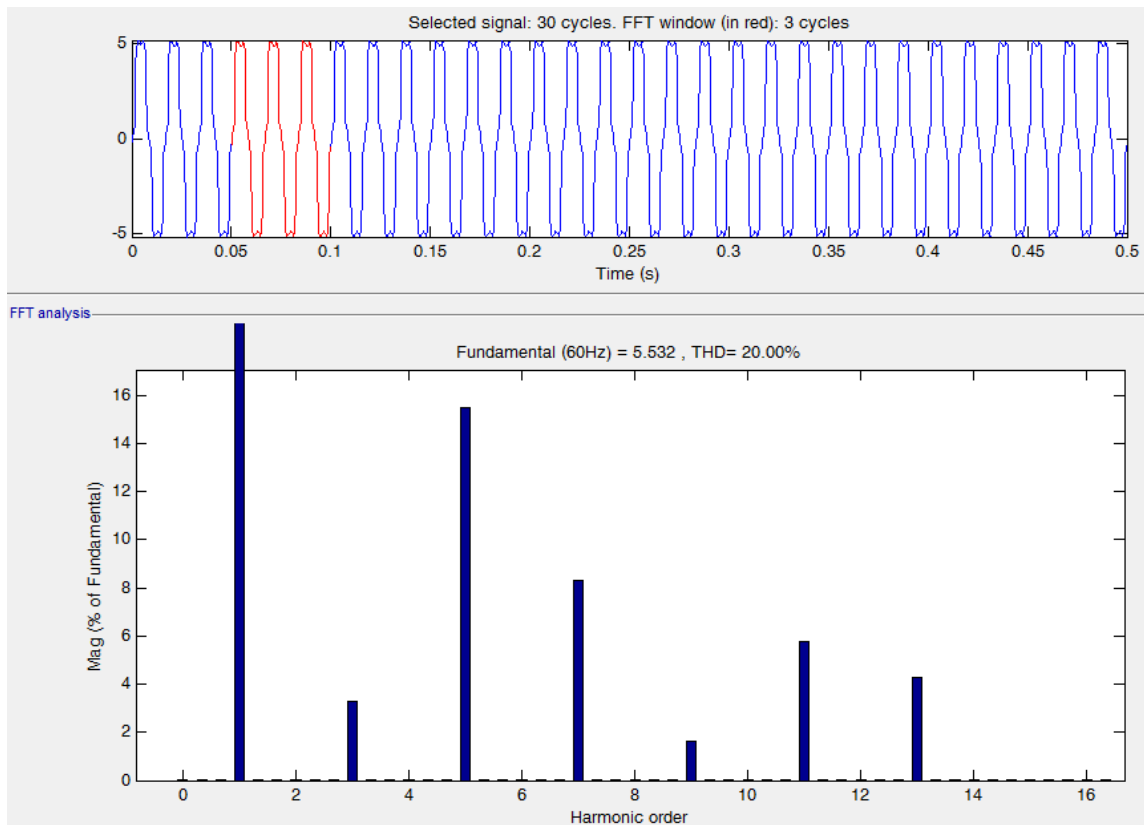


Figura 5.14 – Onda de corrente e harmônicos correspondentes.

5.4 Cargas desequilibradas

Para cargas desequilibradas foram utilizados 4 modelos diferentes, cujas topologias estão presentes nas figuras 5.15, 5.16, 5.17. A simulação foi feita como a anterior, mas a fonte permanece apenas com 60 Hz sem poluição para que seja aferida a influência da carga sobre a corrente.

Para o primeiro cenário foi usado como base o modelo presente na figura 5.15 que tem as cargas equilibradas. Para os demais cenários foram feitas pequenas mudanças como a inserção de uma carga resistiva e indutiva entre as fases “b” e “c”.

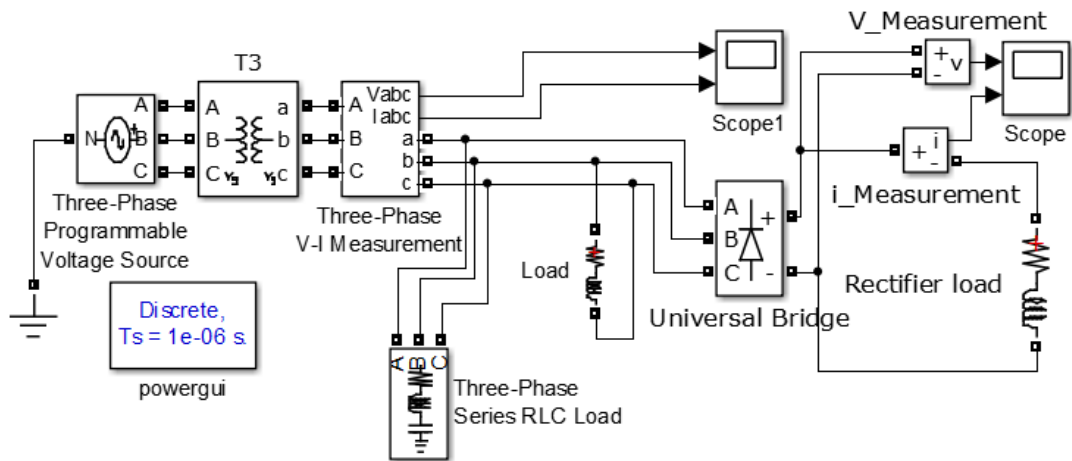


Figura 5.15 - Circuito estudado para a situação 2.

Para o cenário 3 além da carga entre fases também está presente uma carga entre a fase “a” e o neutro do sistema.

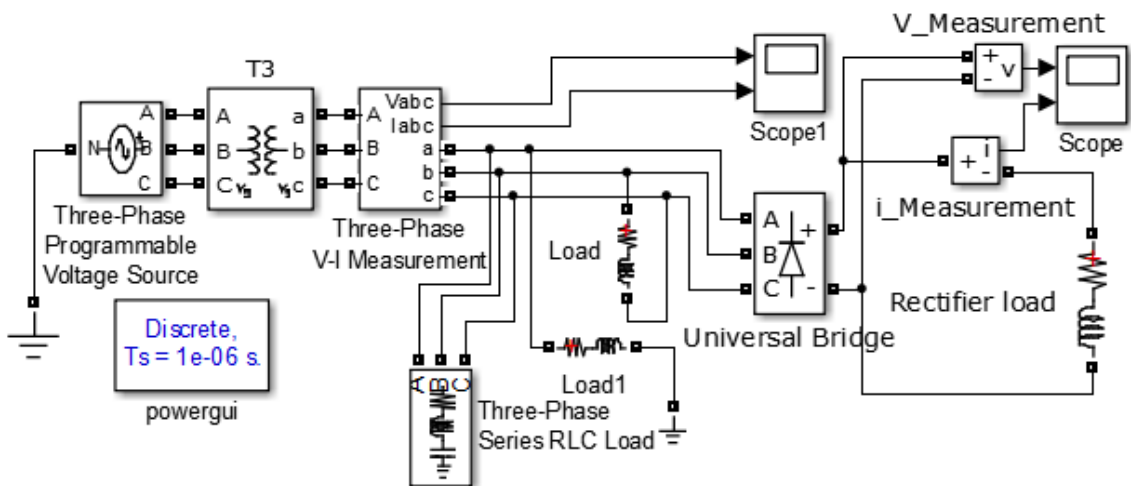


Figura 5.16 - Circuito estudado para a situação 3.

Para o cenário 4 a carga existe apenas entre a fase “a” e o neutro do sistema e a corrente de neutro foi aferida, e sua amplitude e quantidade de harmônico checada.

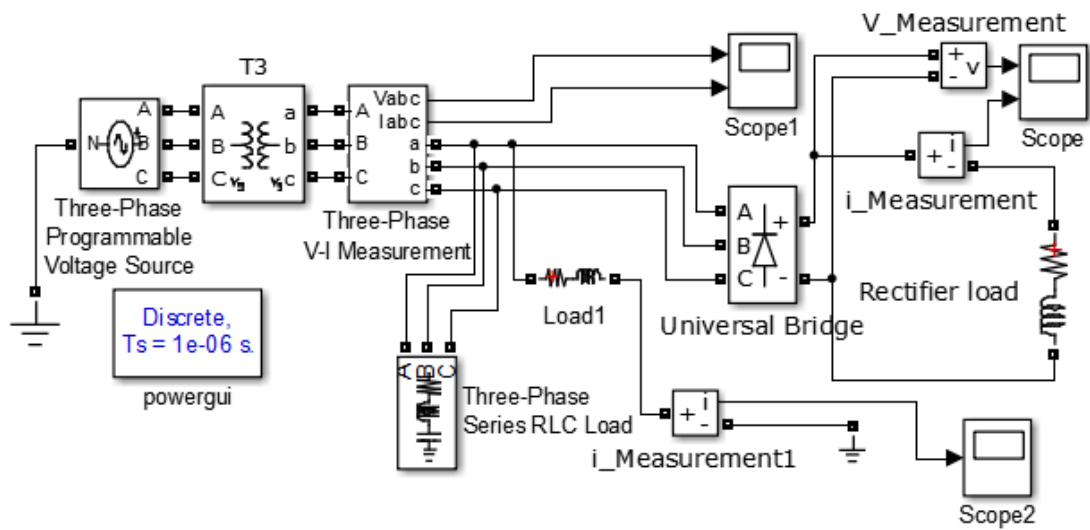


Figura 5.17 - Circuito estudado para a situação 4.

Uma comparação entre as situações foi feita através da medição do THD de cada cenário apresentado e permite observar claramente a interferência da topologia no nível dos harmônicos para pequenas diferenças de carga imposta para os cenários provoca uma variação no índice como apresenta a figura 5.18.

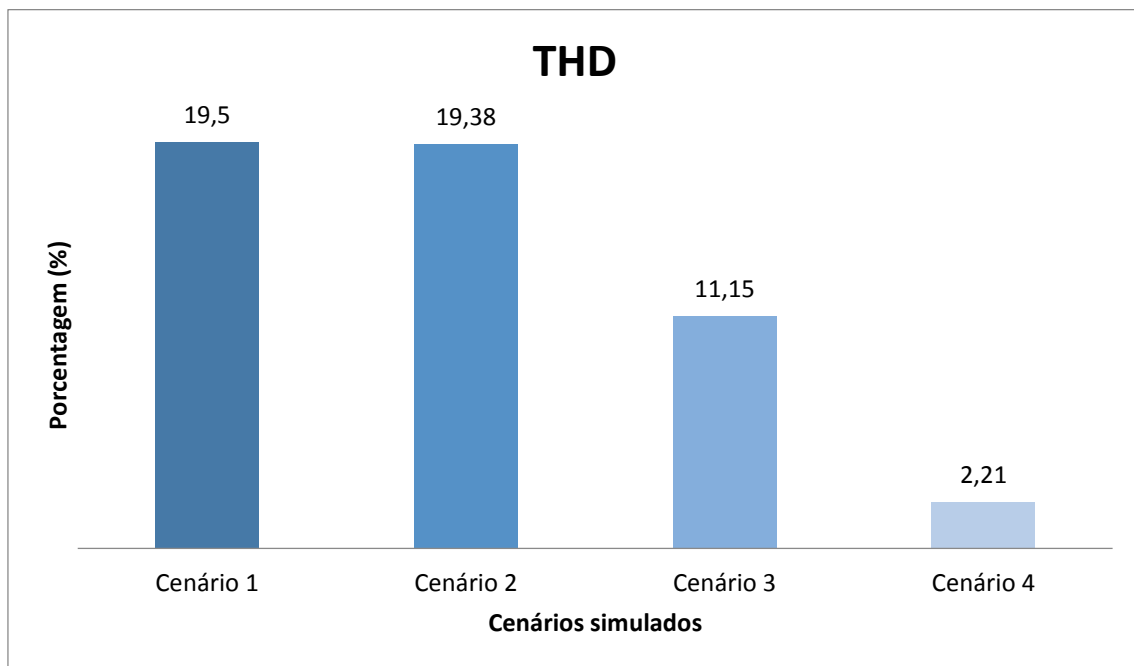


Figura 5.18 - Percentagem de distorção harmônica total de corrente para os diferentes cenários

Simulando distorções harmônicas nos circuitos desequilibrados é possível observar que tal fator não influencia as harmônicas de forma diferente, apenas a topologia interfere nos diferentes resultados obtidos para os diferentes circuitos. Importante ressaltar que a mudança na topologia do sistema não elimina os efeitos das harmônicas que percorrem o sistema.

5.5 Resultados

A partir das simulações foi possível observar a interação entre as tensões com harmônicos com as cargas equilibradas assim como a relação entre o desequilíbrio da carga e a corrente harmônica produzida por essas interações e estimar alguns efeitos que a penetração de fontes na rede de distribuição pode trazer, uma vez que a inserção desse “fluxo contrário” interfere no balanço das cargas entre as fases feita no planejamento da rede de distribuição.

É possível observar que a variação com o aumento de determinada frequência no circuito é linear, dobrando a intensidade de distorção na tensão seu efeito na corrente também dobrará. Mas a proporção que as diferentes frequências harmônicas terão na carga são específicas de cada ordem, algumas frequências interferem mais na corrente que outras como pode ser visto nas simulações.

Outro ponto que deve ser observado é que a maior parte dos consumidores conectados à rede de baixa tensão é cobrada apenas de acordo com a quantidade de energia que consome e os níveis de harmônicos consumidos e gerados não são levados em conta. Com a inserção de mais fontes eletrônicas poluindo tensão e corrente principalmente nas frequências mais baixas como mostra a figura 4.1 (pag.), que até esse momento apresentaram maior interferência na corrente, essa tecnologia pode trazer sérias consequências à rede de distribuição.

Apesar dos limites dos harmônicos serem maiores na distribuição, como apresenta o capítulo 4, mesmo que essas mudanças não sejam tão visíveis para os operadores do sistema e para o sistema de transmissão, as regiões com maior penetração de tal tecnologia podem sofrer com esse fenômeno.

6. CONCLUSÕES

6.1 Conclusões gerais

A tendência mundial é muito clara no sentido de incentivar a produção de energia a partir de fontes renováveis e de forma sustentável, e com menor impacto ambiental possível.

As fontes de energia que aproveitam a irradiação solar são muito promissoras em vários aspectos e seu crescimento nos últimos anos mostra que há um potencial grande a ser explorado o que tornará o investimento em tais fontes cada vez mais acessível.

É possível notar com as simulações e as literaturas de referência que com o aumento das fontes conectadas a rede através de inversores, como a fotovoltaica, e sua interação com cargas não lineares cada vez mais a qualidade da energia será afetada e apresentará poluição harmônica.

Alguns problemas observados em capítulos anteriores terão maior relevância com o aumento da penetração das novas fontes geradoras na rede de distribuição e torna-se necessário desenvolver planos de ação para evitar que a rede e os consumidores sejam prejudicados.

Existe ainda uma gama muito grande de aspectos a serem estudados sobre o assunto como, mas também muitas pessoas engajadas em desenvolver o tema e buscar alternativas aos desafios apresentados pela nova tecnologia, para que se possa usufruir dos benefícios que a técnica trará com seu amadurecimento.

O desenvolvimento das técnicas adequadas para o aproveitamento da energia solar irá permitir ao país posição de destaque entre as nações em desenvolvimento tendo em mente que muitas delas são fortemente dependentes de combustíveis fósseis e enfrentam problemas para modificar sua matriz energética e ajustar-se ao esforço mundial por menores impactos ambientais.

Com o devido incentivo a pesquisa e com a maturação das tecnologias e consequente barateamento dos investimentos as fontes renováveis, em especial a

energia fotovoltaica, oferecem uma perspectiva de geração de energia mais barata, sustentável, e com baixo impacto ambiental influenciando toda a cadeia produtiva assim como amplia o acesso das pessoas a energia barata e de qualidade.

6.2 Proposta para trabalhos futuros

As simulações precisam ser mais desenvolvidas e as influências de mais frequências devem ser exploradas para verificar a relação entre seus valores de interferência em diferentes circuitos equilibrados e desequilibrados em programas e simuladores diferentes para afirmar categoricamente quais podem ser os efeitos das diferentes harmônicas.

Os novos conjuntos de harmônicas, supra harmônicas e inter harmônicas também devem ser avaliados, caso apresentem as mesmas variações lineares em se tratando da mesma frequência e diferentes de uma frequência pra outra.

A segurança da informação é também um ponto relevante que tem de ser levado em conta para o desenvolvimento das novas tecnologias de redes distribuídas. Os equipamentos modernos são capazes de gerar muitos dados para facilitar a operação do sistema, mas também expõem seus usuários. Usar esses dados de forma adequada significará muito para o operador do sistema e os consumidores.

Outro ponto que oferece muitas possibilidades de expansão são as normatizações. Com a mudança da rede, a normatização também terá que se adaptar para se adequar à nova realidade e garantir não somente a qualidade do produto mas também cumprindo seu papel social de oferecer energia barata e de qualidade para os diferentes setores da sociedade sem que isso agrave as desigualdades sociais.

6.3 Artigo aceito em conferência

SANTOS, K.A.G., DUARTE, P.M., RIBEIRO, P.F., SILVEIRA, P.M. “The Impact of Non-Sinusoidal Voltages on the Harmonic Generation of Power Electronics Converters”. Belo Horizonte, MG. 17ª Conferência Internacional sobre Harmônicos e Qualidade de Energia. 2016.

REFERÊNCIAS

- [1] BOLLEN, M.; HASSAN, F. Integration of Distributed Generation in the Power System, in: IEEE Press Series on Power Engineering, Wiley-Blackwell, New York, 2011.
- [2] KEYHANI,A.;MARWALI,M.”Smart Power Grids 2011”. Berlin: Springer 2011.
- [3] ANEEL.”Resolução Normativa 482/2012”. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf> >.Acesso em 02/03/2016.
- [4] ANEEL. “Resolução Normativa nº687/2015”. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf> > Acesso em: 02/03/2016.
- [5] ANEEL.”Geração distribuída amplia número de conexões em 2015” Disponível em: http://www.aneel.gov.br/aplicações/notícias/output_notícias.cfm?Identidade=9044&id_area=90. Acesso em 30/03/2016.
- [6] SIOSHANSI,F.P.; “Smart Grid Renewable, Distributed & Efficient Energy”. USA:Elsevier 2012. “
- [7] ANEEL.”Novas regras para geração distribuída entram em vigor “. Disponível em : <http://www.aneel.gov.br/aplicações/notícias/output_noticias.cfm?Identidade=9086&id_area=90>. Acesso em 02/03/2016.
- [8]”Relatório Cenários e Perspectivas no desenvolvimento. Fontes Renováveis de Energia no Brasil”. Ribeirão Preto,SP; 2012: Núcleo de Estudos de Economias de Baixo Carbono.
- [9] DUGAN, R.C.;”Electrical Power Systems Quality, second edition, McGraw-Hill, 2002.
- [10] IRENA.” The power to change – solar wind cost reduction potential to 2025”. 2016 Disponível em:

<http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_Power_to_Change_2016.pdf> Acesso em 10/07/2016.

[11] IRENA. "Installed Renewable Power Capacity". USA. Disponível em: <<http://resourceirena.irena.org/gateway/countrySearch/?countryCode=USA>>. Acesso em 10/07/2016.

[12] VARATHARAJAN,A; SHOETTKE,S.; MEYER,J.;ABART,A. "Harmonic of Large PV Installations Case Study of a 1 MW Solar Campus". In: International Conference on Renewable Energies and Power Quality(ICREPQ '14). Cordoba, Spain, 2014.

[13] IRENA. "Installed Renewable Power Capacity". Alemanha. Disponível em: <<http://resourceirena.irena.org/gateway/countrySearch/?countryCode=DEU>>. Acesso em: 10/07/2016

[14] IRENA. "Installed Renewable Power Capacity". USA. Disponível em: <<http://resourceirena.irena.org/gateway/countrySearch/?countryCode=CHN>>. Acesso em 10/07/2016.

[15] BRASIL - Ministério de Minas e Energia. "Consumo de eletricidade avança 1,4% em abril". Resenha Mensal do Mercado de Energia Elétrica. Rio de Janeiro, RJ; maio de 2016. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br>>. Acesso em 04/06/2016.

[16] BRASIL - Ministério de Minas e Energia. "Resenha energética brasileira". Exercício 2014.. Brasília, DF, Maio de 2016

[17] MUÑOZ, A. M.;"Power Quality- Mitigation Technologies in a Distributed Environment", Londres: Springer 2007.

[18] SHORT, T. A. "Electric Power Distribution Handbook". Boca Raton, USA: CRC Press Ed. 2004.

[19]BAGGINI, A. “Handbook of Power Quality”, Bergamo, Itália: John Wiley & Sons, Ltd Ed. 2008.

[20] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL "Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica" , 2015. Disponível em <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/M%C3%B3dulo8_Revis%C3%A3o_7.pdf> Acesso em 11/05/2016

[21]DECKMAN,S. M.; POMILIO, J.A..”Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica-Distorção Harmônica: Causas, Efeitos, Solução e Normas”.Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/qualidade/a5.pdf>>. Acesso em 10/07/2016.

[22] POMILIO, J. A.”Normas Relativas à Corrente de Linha: Harmônicas e Interferência Eletromagnética Conduzida”Cap.1. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/pfp/Cap1.pdf>>. Acesso em 10/07/2016.

[23]VORTEX EQUIPAMENTOS.”Compreendendo Harmônicos de Energia-Resolução Basica de Problemas utilizando multímetros ou alicates de corrente”. Disponível em:<www.vortex.com.br/notas/harmonicas.pdf> Acesso em 10/07/2016.

[24]BOSMAN, A.J.A.; COBBEN,J.F.G.; MYRZIK, J.M.A.; KLING,W.L.”Harmonic Modelling of Solar Inverters and Their Interaction With the Distribution Grid”.41^a International Universities Power Engineering Conference Proceedings, 991-995.2006.