

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS**  
**ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**RODRIGO CÉSAR REIS PEREIRA**

**ESTUDO DOS EFEITOS DO ACOPLAMENTO DE MICROGERAÇÃO  
FOTOVOLTAICA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE BAIXA TENSÃO**

**Varginha**  
**2016**

**RODRIGO CÉSAR REIS PEREIRA**

**ESTUDO DOS EFEITOS DO ACOPLAMENTO DE MICROGERAÇÃO  
FOTOVOLTAICA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE BAIXA TENSÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário do Sul de Minas como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel, sob orientação do Prof. Esp. Thiago Cornélio da Fonseca.

**Varginha  
2016**

**RODRIGO CÉSAR REIS PEREIRA**

**ESTUDO DOS EFEITOS DO ACOPLAMENTO DE MICROGERAÇÃO  
FOTOVOLTAICA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE BAIXA TENSÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário do Sul de Minas, como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel pela banca examinadora composta pelos membros:

Aprovado em 05 / 12 / 2016

---

Prof. Esp. Thiago Cornélio da Fonseca

---

Prof. Me. Hugo Rodrigues Vieira

---

Prof. Esp. Paulo Roberto de Paiva Novo

OBS.:

Dedico este trabalho à Maria José dos Reis  
Pereira, minha eterna mãe...

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela vida e por caminhar sempre ao meu lado. Aos meus pais, meus alicerces, formadores do meu caráter, por sempre batalharem pelo meu melhor. A minha família, pelo apoio incondicional. Aos meus amigos, pelas conversas, conselhos e momentos de descontrações. Aos colegas de classe, especialmente aqueles que me tornei grandes amigos, grato pela ajuda e motivação. Aos professores, pelos ensinamentos disseminados durante todos esses anos. A tantas pessoas inesquecíveis, que já partiram, mas continuam sendo verdadeiros exemplos para minha vida. Obrigado a todos que colaboraram e me auxiliaram de alguma forma durante esse período. E de modo especial, externo meus agradecimentos a pessoas fundamentais não só na minha jornada acadêmica, mas em todos os aspectos: Roberto, Aurora e Teresinha. Meu muito obrigado!

“Se você encontrar um caminho sem obstáculos, ele provavelmente não leva a lugar nenhum.”

Frank Clark

## RESUMO

Numa atualidade mais consciente sobre os danos ambientais causados pelo processo de geração até a distribuição de energia, faz-se refletir do aproveitamento de fontes de energia alternativas. E de forma a utilizar dessas fontes mais próximas do consumidor, surge o conceito da geração distribuída, com o acoplamento de geradores de pequeno porte em linhas de distribuição de baixa tensão em pontos juntos ou próximos do cliente. Assim o objetivo deste trabalho consiste em estudar o comportamento de uma rede de distribuição de baixa tensão com presença de microgeração distribuída fotovoltaica através de simulações realizadas por meio de modelagem no *software* MATLAB/SIMULINK. O que se justifica diante da forte perspectiva de crescimento desta modalidade de geração de energia. Tais simulações ocorreram com base em um modelo computacional para a rede e para o microgerador. No qual foram coletados dados como a potência, taxa de distorção harmônica, perdas nos condutores e fator de potência da rede em três situações de operação. Com finalidade de concluir quais são os impactos sobre os níveis de qualidade de energia e a confiabilidade dos sistemas de distribuição que possuem a conexão de fontes distribuídas. Onde se notou de modo geral variações dos parâmetros dentro dos limites normatizados, exceto para o fator de potência.

**Palavras-chave:** Geração distribuída. Rede de distribuição. Baixa tensão. Microgeração fotovoltaica.

## **ABSTRACT**

*In a more conscious today of the environmental damage caused by the generation process and the distribution of energy, reflect the use of alternative energy sources. And in order to use these sources closer to the consumer, comes the concept of distributed generation, with the coupling of small generators in low voltage distribution lines in points together or close to the customer. So the aim of this work is to study the behavior of a low voltage distribution network with presence of photovoltaic distributed micro generation through simulations by modeling in MATLAB / SIMULINK software. What was justified by the strong growth prospects of this type of power generation. The simulations occurred based on a computer model for the network and for the microgenerator. In which data was collected as electric power, harmonic distortion, loss in the conductors and network power factor in three operating situations. In order to conclude what are the impacts on the quality of energy levels and the reliability of distribution systems with a distributed source connection. Where was noted generally variations of parameters within standardized limits, except for the power factor.*

**Keywords:** *Distributed generation. Distribution network. Low voltage. Photovoltaic microgeneration.*



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Conceito de geração distribuída .....	15
Figura 2 – Cadeia de valores da energia elétrica .....	17
Figura 3 – Etapas e prazos de viabilização de acesso à microgeração .....	17
Figura 4 – Célula, módulo e painel fotovoltaico .....	19
Figura 5 – Sinal de frequência fundamental na presença da 3ª e 5ª harmônica e o resultante .	22
Figura 6 – Arranjo de uma rede de distribuição .....	23
Figura 7 – Interface MATLAB/SIMULINK “ <i>SimPowerSystems</i> ” .....	25
Figura 8 – Sistema de compensação de energia elétrica .....	27
Figura 9 – Esquema de ligação triângulo-estrela com neutro aterrado .....	31
Figura 10 – Alimentador primário e trafo modelados em <i>Simulink</i> .....	32
Figura 11 – Dados de um trafo convencional 45 kVA .....	32
Figura 12 – Esquema equivalente em T de um transformador .....	32
Figura 13 – Esquema equivalente do transformador em vazio .....	33
Figura 14 – Esquema equivalente do transformador em curto-circuito .....	34
Figura 15 – Modelo em <i>Simulink</i> do cabeamento BT .....	37
Figura 16 – Modelo em <i>Simulink</i> de carga linear .....	39
Figura 17 – Carga não linear tipo retificador monofásico .....	40
Figura 18 – Modelo em <i>Simulink</i> do sistema fotovoltaico .....	42
Figura 19 – Modelo da rede BT com microgerador fotovoltaico acoplado em <i>Simulink</i> .....	42
Figura 20 – TDHi Situação I .....	43
Figura 21 – TDHv Situação I .....	44
Figura 22 – TDHin Situação I .....	44
Figura 23 – TDHi Situação II .....	45
Figura 24 – TDHv Situação II .....	46
Figura 25 – TDHin Situação II .....	46
Figura 26 – TDHi Situação III .....	47
Figura 27 – TDHv Situação III .....	47
Figura 28 – TDHin Situação III .....	48

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Comportamento da potência ativa fornecida pelo trafo .....	49
Gráfico 2 – Comportamento da potência reativa fornecida pelo trafo .....	49
Gráfico 3 – Comportamento da potência aparente no trafo .....	50
Gráfico 4 – Comportamento do fator de potência .....	51
Gráfico 5 – Comportamento das perdas nos condutores da rede .....	51
Gráfico 6 – Comportamento da corrente no neutro .....	52
Gráfico 7 – Comportamento da TDHi .....	53
Gráfico 8 – Comportamento da TDHv .....	53
Gráfico 9 – Comportamento da TDHin .....	54

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>14</b>
2.1 Cenário atual e perspectivas .....	14
2.2 Eficiência energética.....	14
2.3 Fontes alternativas de energia .....	15
2.4 Geração distribuída (GD) .....	15
2.4.1 Microgeração .....	16
2.5 Painéis fotovoltaicos .....	18
2.6 Qualidade da energia elétrica .....	20
2.7 Sistemas de distribuição e redes de baixa tensão.....	22
2.8 O <i>software</i> : MATLAB/SIMULINK .....	24
2.9 Regulamentação da geração distribuída de pequeno porte no Brasil .....	25
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>29</b>
3.1 Metodologia da modelagem .....	29
3.2 Metodologia da simulação .....	29
3.3 Metodologia da análise.....	30
<b>4 MODELAGEM DA REDE DE BAIXA TENSÃO (BT) E DO MICROGERADOR ...</b>	<b>31</b>
4.1 Modelo do transformador de distribuição .....	31
4.1.1 Ensaio em vazio.....	33
4.1.2 Ensaio de curto-circuito.....	34
4.2 Modelo dos cabos condutores BT.....	35
4.3 Modelo das cargas elétricas .....	37
4.3.1 Cargas lineares.....	37
4.3.2 Cargas não lineares .....	38
4.3.3 Modelagem .....	39
4.4 Modelo do microgerador fotovoltaico.....	41
4.5 Modelo da rede BT com microgerador fotovoltaico acoplado em <i>Simulink</i> .....	42
<b>5 SIMULAÇÕES, RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>43</b>
5.1 Dados coletados nas simulações .....	43
5.1.1 Situação I – Rede sem microgeração.....	43
5.1.2 Situação II – Rede com microgeração 2,3 kW .....	45
5.1.3 Situação III – Rede com microgeração 6,3 kW .....	46
5.2 Resultados e discussão.....	48
<b>6 CONCLUSÃO.....</b>	<b>56</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>58</b>
<b>ANEXO.....</b>	<b>61</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A sociedade moderna depende indiscutivelmente da energia elétrica para garantir a produção de bens e serviços, promover o convívio social e alavancar o progresso. É quase impossível imaginar uma sociedade nos tempos de hoje que não demande da eletricidade para se desenvolver. No entanto, como a geração de energia elétrica carece de altos investimentos e acaba causando danos ambientais, o setor elétrico tem buscado se reinventar nos últimos anos, através da procura por novas fontes de energia, que consigam suprir a crescente demanda de energia e ao mesmo tempo sejam capazes de propagar a eficiência energética.

Em âmbito mundial, a matriz energética se baseia na utilização de combustíveis fósseis, geração termo nuclear e usinas hidrelétricas de grande porte. Não diferente do cenário mundial, no Brasil de acordo com Silva (2012) as formas mais empregadas de geração de energia são: usinas hidrelétricas (79,09%), usinas termoeletricas (18,51%) e usinas atômicas (2,37%). Esta informação preocupa, já que tais matrizes acarretam grandes impactos ambientais.

A geração por meio dos combustíveis fósseis libera inúmeros gases que causam efeito estufa e inclusive por isso foi assinado no ano de 1997 o Protocolo de Kyoto no Japão, visando à redução de emissão desses gases. As usinas nucleares deixam em cheque a questão da real segurança desse tipo de geração, evidenciado principalmente após o tsunami que atingiu o Japão em 2011 e causou falhas e lançamento de material radioativo da usina Fukushima I, além do problema de destinação do lixo atômico. Já as hidrelétricas de grande porte alagam imensas áreas, desapropriando terras cultiváveis e reservas florestais, contribuindo para destruição da fauna e flora local.

Como meio de amenizar a degradação ambiental, vários países têm adotado políticas de incentivo ao uso de fontes renováveis e alternativas de energia elétrica, como é o caso da aplicação da geração distribuída. Que no Brasil teve como marco inicial referente ao assunto a aprovação da Resolução Normativa 482/12 da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL na data de 17 de abril de 2012, que dispõe das regras que incentivam a mini e microgeração no país (ANEEL, 2012).

A geração distribuída (GD) é, conforme Padilha (2010), a denominação para o conceito de instalação e operação de médias e pequenas unidades de geradores elétricos (mini e microgeradores) conectados diretamente à rede de distribuição e subtransmissão de energia, o que acontece geralmente próximo ou junto aos consumidores finais.

Os principais benefícios dessa modalidade de geração para o sistema elétrico são a postergação de investimentos em expansão nos sistemas de distribuição e transmissão, o baixo

impacto ao meio ambiente, a redução no carregamento das redes, a diminuição de perdas, além da diversificação da matriz energética (ANEEL, 2014).

Por consequência do crescente interesse de implantação da GD, justifica-se a necessidade de estudar e analisar minuciosamente os sistemas de distribuição que possuem a conexão destas fontes. De modo a observar o seu comportamento, identificar possíveis alterações na qualidade de energia e verificar os problemas causados pelo mau planejamento de introdução da GD na rede e quais seriam as prováveis soluções. Pois de acordo com Barin (2007), a entrada destas novas fontes de energia sem o devido estudo tende a causar vários transtornos ao sistema, acarretando em problemas de natureza gerencial, regulatória e operacional.

O principal objetivo deste trabalho é estudar o comportamento de uma rede de distribuição de baixa tensão com presença de microgerador fotovoltaico, através de simulações realizadas por meio de modelagem no MATLAB/SIMULINK para identificar o perfil elétrico da rede.

O desenvolvimento da pesquisa demandará de consulta a artigos, monografias, revistas, internet e outros meios e tipos de publicações que abordam o tema no Brasil e no exterior. Para embasar da melhor maneira possível à modelagem que será criada pelo *software*, e a partir dos dados coletados através das simulações fazer as devidas análises, possibilitando estudar de maneira consistente e eficaz o comportamento da linha de distribuição com acoplamento de microgerador fotovoltaico.

Além do propósito de incentivar a inserção da GD sob um olhar analítico e ordenado, e fornecer material que possa contribuir com o conhecimento técnico do assunto, explorando questões importantes do cenário energético atual: as fontes alternativas de energia, a geração distribuída e a microgeração, a qualidade da energia elétrica, a conservação da energia e a eficiência energética.

A estrutura deste trabalho é dividida em seis capítulos. Onde neste primeiro capítulo, foi descrito a introdução ao tema abordado. No segundo capítulo é feito um referencial teórico, com finalidade de apresentar vários tópicos importantes sobre o assunto, a fim de promover um embasamento e facilitar a compreensão das informações posteriores.

A seguir, o capítulo 3 traz a metodologia utilizada para alcançar o objetivo pretendido e o capítulo 4 faz uma explanação da modelagem desenvolvida para estudar o comportamento do microgerador fotovoltaico em uma rede de distribuição de baixa tensão.

E após, no capítulo 5 são expostas as simulações realizadas no *software* MATLAB/SIMULINK e feitas às discussões sobre os resultados alcançados. Por fim, no

capítulo 6, são apresentadas as conclusões a respeito do trabalho desenvolvido e suas contribuições.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

Neste capítulo vários tópicos importantes relacionados ao tema serão considerados, a fim de promover um embasamento e facilitar a compreensão das informações posteriores. Onde de início ressalta-se o momento atual e as expectativas de futuro da geração distribuída de pequeno porte.

### **2.1 Cenário atual e perspectivas**

Segundo informações do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL (2015), até o final de 2014, devido à redução das tarifas de energia pela Lei 12.783 a micro e minigeração não vinham se mostrando financeiramente atrativas. Cenário este que está mudando, e pesquisas energéticas fazem uma projeção considerando apenas sistemas fotovoltaicos, de que ocorra a instalação de 664 MW de potência de geradores distribuídos de pequeno porte no ano de 2023, o que representa 166 vezes a capacidade instalada atual. Entretanto estudiosos ressaltam que esses números podem ser tratados como conservadores, pois leva em conta uma evolução das tarifas de energia relacionada com a inflação, o que historicamente não acontece no Brasil. Ou seja, a tendência é de que a geração distribuída de pequeno porte, impulsionada principalmente pelos sistemas fotovoltaicos, alcance um espaço ainda maior nos próximos anos, não só devido ao aumento das tarifas de energia, como também devido às questões de incentivo por parte do governo.

### **2.2 Eficiência energética**

A eficiência energética é um conceito que se resume em fazer mais com menos energia, e então é definida pela Companhia Energética de Pernambuco (CELPE, 2013) como a obtenção do melhor desempenho na produção de um serviço com o menor gasto de energia.

Deste modo busca-se melhor aproveitar os recursos dispostos pelas fontes de energia, através do seu uso racional, consequentemente evitando desperdícios. O que tende a estreitar a razão entre a quantidade de energia que é empregada numa atividade e aquela que foi disponibilizada para realização de tal.

## 2.3 Fontes alternativas de energia

As fontes de energia chamadas alternativas são aquelas consideradas como opção ao uso das fontes tradicionais de energia: petróleo, gás natural, carvão mineral, hídrica, dentre outras.

Silva (2012) esclarece que são fontes que possuem baixas ou nenhuma taxa de poluição, conseqüentemente agredindo menos o meio ambiente em relação às fontes tradicionais. São exemplos a energia eólica, a fotovoltaica, a maré motriz e o biogás.

Com foco na geração distribuída de energia, principalmente a produção eólica e a fotovoltaica ganham espaço, através de geradores de pequeno porte com possibilidade de serem acoplados nas redes de baixa tensão, próximo aos consumidores.

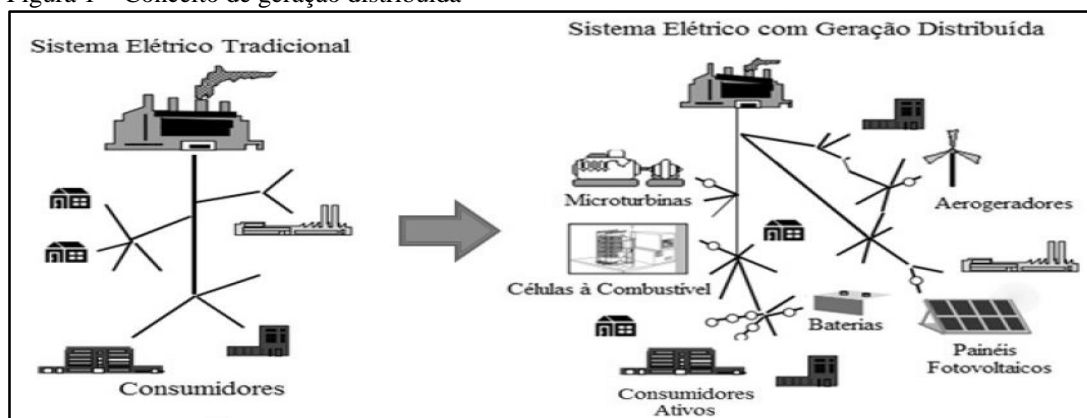
## 2.4 Geração distribuída (GD)

A geração distribuída como já dito anteriormente é a instalação de unidades de geração de pequeno e médio porte junto à rede de distribuição de energia ou diretamente ao consumidor.

Segundo Frigo (2013) a literatura define no Brasil como geração distribuída aquela até uma potência máxima de 30 MW. Destaca ainda que a GD tem como vantagens as menores perdas de energia na rede, o aumento da disponibilidade de energia, a contribuição para diminuição dos gases do efeito estufa, o aproveitamento de recursos naturais e conseqüentemente uma melhor confiabilidade do sistema elétrico.

Na Figura 1 é representado o conceito de geração distribuída, através da comparação de um sistema elétrico tradicional e outro com a concepção de GD.

Figura 1 – Conceito de geração distribuída



Fonte: TREVISAN, 2011.



As redes de distribuição têm sido por muito tempo projetadas conforme a consideração de que a subestação da concessionária fosse a única fonte com capacidade de abastecimento de energia. Mas atualmente, como esclarece Padilha (2010), essa realidade se transformou, pois ocorreu o aparecimento de outras fontes de energia nos sistemas de distribuição, pela inserção das unidades de geração distribuída. E assim, é altamente desejável que análises criteriosas sejam realizadas quando tais unidades estão para ser integradas ao sistema. Condição necessária para estabelecer os requisitos de operação entre os geradores distribuídos e a rede elétrica para garantir fornecimento de energia nos padrões determinados pelas agências reguladoras. Além é claro de validar que a rede de distribuição por si só seja capaz de fornecer eletricidade aos consumidores, mesmo no caso da possibilidade de os geradores distribuídos sejam desconectados por ocorrência de algum problema ou mesmo de modo programado.

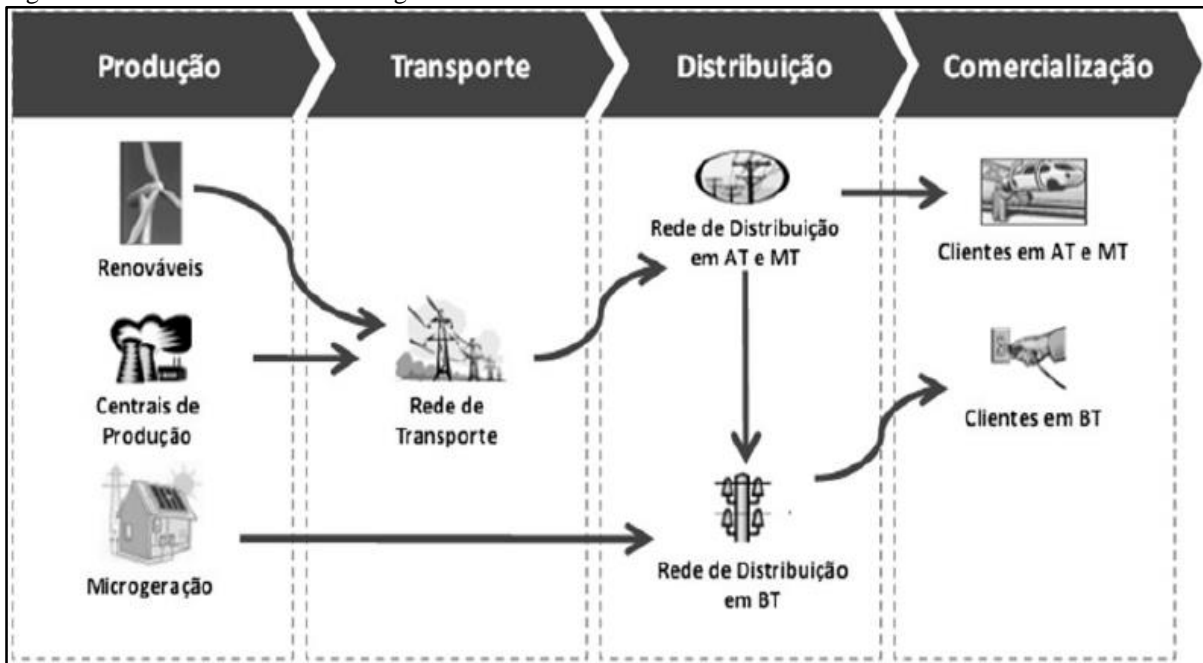
Apesar dos benefícios que a GD pode proporcionar ao sistema elétrico, Barin (2007) ressalva a importância de observar que a injeção de potência destas fontes descentralizadas em lugares inapropriados, sem a regulação dos meios de controle de tensão, pode acarretar em um aumento nas perdas de potência e em indesejáveis níveis de tensão, fora dos limites estabelecidos pela ANEEL. O que resulta na elevação dos custos de operação, manutenção e planejamento de expansões, além de implicar em severas multas às companhias fornecedoras de energia.

#### 2.4.1 Microgeração

A microgeração de energia, que é regida pela normatização recém-atualizada da ANEEL (2012), é tida como aquela de potência de até 75 kW, e basicamente para consumo próprio, com o excedente repassado para a concessionária de energia, como crédito. O consumidor pode ser residencial ou comercial e o sistema de microgeração pode ser constituído de uma só fonte produtora de energia ou da combinação entre elas.

Em Schreiber (2013), é adotado o conceito de cadeia de valores da energia elétrica (Figura 2). Que basicamente é dividido em quatro etapas: produção, transporte, distribuição e comercialização, que são interligadas. Pode-se notar que a microgeração é um ramo direto entre a produção e distribuição da energia, o que contribui para redução de perdas de potência na rede.

Figura 2 – Cadeia de valores da energia elétrica

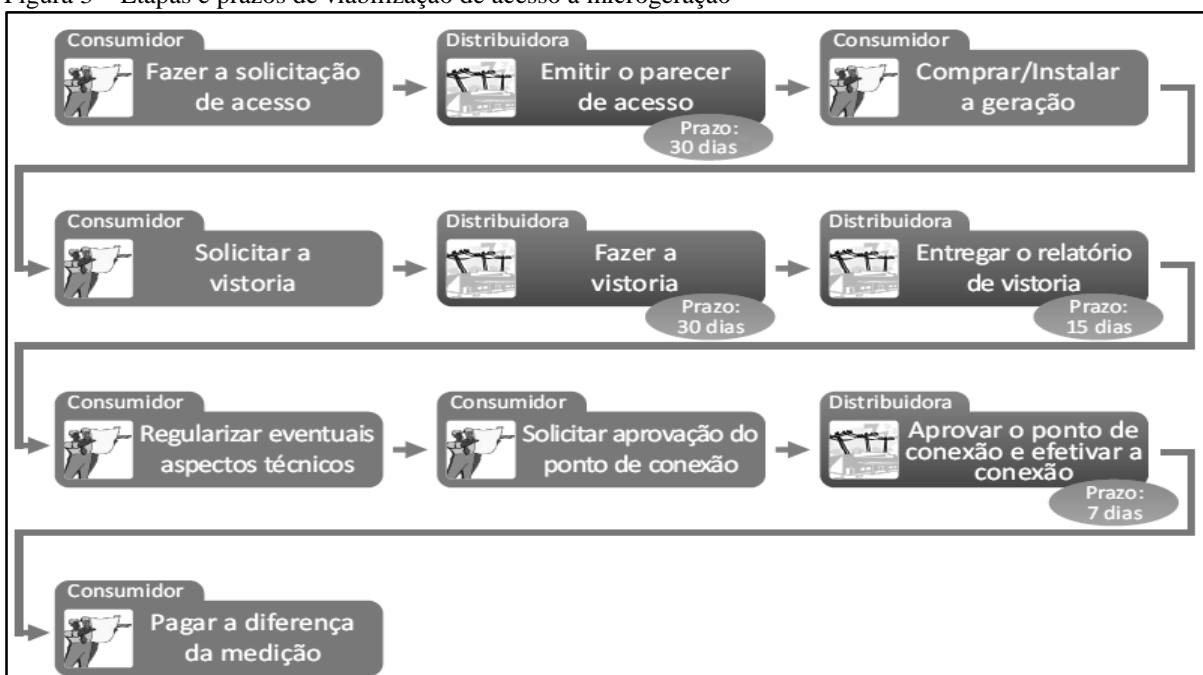


Fonte: SCHREIBER, 2013.

O cenário de produção de eletricidade por microgeração ganha cada vez mais espaço, e inúmeros países tem adaptado suas legislações para incentivar a inserção desta modalidade na matriz energética.

No Brasil, o processo para viabilizar a instalação microgeradora é pautado pela ANEEL e segue as etapas e prazos mostrados na Figura 3.

Figura 3 – Etapas e prazos de viabilização de acesso à microgeração



Fonte: adaptado de ANEEL, 2014.

Apesar do grande incentivo, Frigo (2013) relata que alguns obstáculos seguraram a expansão da microgeração. Um deles é o custo para se adquirir e instalar os equipamentos, devido à baixa demanda de fabricação em larga escala.

Outro ponto é a falta de informação por parte dos investidores sobre a possibilidade de ser um microgerador, sobre a utilização de fontes alternativas de energia, sua credibilidade, e as questões regulatórias e de retorno do investimento. Arelados, no caso do Brasil, à falta de mão de obra especializada para executar a implantação dos sistemas.

Além disso, ocorrem dificuldades relacionadas às redes de distribuição que não foram projetadas para responder ao fluxo bidirecional de energia, o que pode interferir no sistema de proteção da rede. E também devido a esse fluxo reverso podem-se constatar alguns problemas referentes à qualidade da energia, que serão discutidos posteriormente.

## **2.5 Painéis fotovoltaicos**

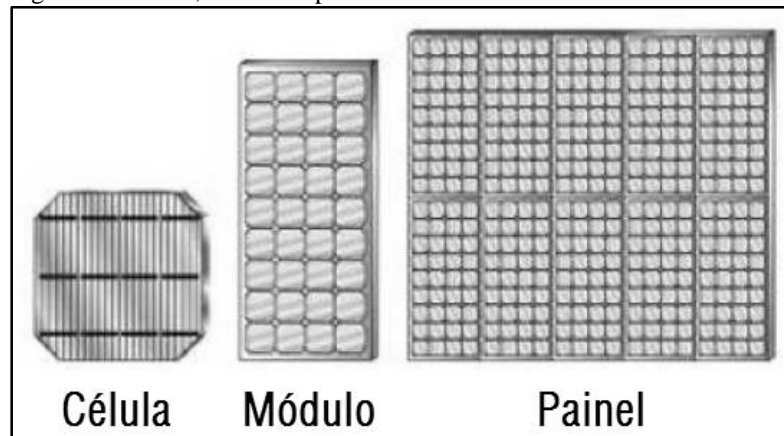
O efeito fotovoltaico é o fenômeno responsável pela geração de energia elétrica a partir da luz solar, e como exposto por Aramizu (2010), foi observado pela primeira vez no ano de 1839 pelo físico francês Edmond Becquerel, que notou em certos materiais uma característica de produzir pequena quantidade de corrente elétrica ao serem expostos à luz.

Após tal descoberta, no ano de 1876 foi então inventado o primeiro dispositivo fotovoltaico, mas apenas em 1956 ocorreu o início de sua produção industrial, impulsionado pela corrida espacial, que procurava meios de fornecimento de energia durante períodos de permanência no espaço e também para a manutenção dos satélites.

Santos (2013) explica que o efeito fotovoltaico acontece em materiais da natureza denominados semicondutores, que apresentam uma banda de energia onde é permitida a presença de elétrons (banda de valência) e outra totalmente vazia (banda de condução).

Os semicondutores são configurados em elementos chamados células fotovoltaicas. Hoje o semicondutor mais usado para fabricação destas células é o silício, que como narrado por Assunção (2008) possui um rendimento possível razoável de cerca de 25 a 30%. Onde cada célula produz uma corrente contínua de intensidade relativamente fraca, produzindo potências da ordem de 1,5 W (0,5V/3A). E então estas células são associadas de modo a se obter um conjunto chamado módulo fotovoltaico, com potências em torno de 50 a 100 W. Que agrupados e arranjados em série ou paralelo numa mesma estrutura de suporte, forma um painel fotovoltaico. Conforme a ilustração da Figura 4.

Figura 4 – Célula, módulo e painel fotovoltaico



Fonte: adaptado de FRIGO, 2013.

A potência de saída de um painel fotovoltaico, de acordo com Trevisan (2011), não depende somente do material semicondutor utilizado na sua construção, mas também de fatores como a temperatura ambiente, o ângulo de incidência da luz sobre as células e as condições ambientes. Estudos demonstram que se observa melhor desempenho de potência em condições consideradas padrões: nível de irradiação de  $1000 \text{ W/m}^2$  e temperatura de  $25^\circ\text{C}$ . E a potência tende a cair com o aumento desta temperatura, em torno de 0,16 a 0,33% para cada grau Celsius acima. Verifica-se ainda queda na potência de saída para temperaturas bem frias.

A composição de um sistema de geração fotovoltaica para operar conectado à rede, conforme Santos (2013), dispõe além dos módulos, de inversores para conversão da energia elétrica em corrente contínua que é produzida para corrente alternada, dispositivos de proteção, sistema de fixação e suporte dos módulos e cabos.

De acordo com Trevisan (2011) existem basicamente quatro tipos diferentes de formas para montar painéis fotovoltaicos, sendo: montagem sobre telhados de casas, montagem como parte de telhados, instalado na fachada de casas e edifícios, e no solo em espaços reservados para tal finalidade.

Quanto às vantagens do sistema de painéis fotovoltaicos, Barin (2007) discorre do fato de ser uma fonte de energia gratuita, silenciosa, sem consumo de combustível, resistente a condições climáticas extremas, de manutenção reduzida, e com possibilidade de aumento da potência produzida através do acréscimo de módulos, além de ser um meio propício de autonomia energética.

Souza (2014) considera a produção fotovoltaica como uma das mais promissoras fontes de energia renovável, e ainda destaca que o seu tempo de vida útil é elevado (25 anos).

Um sistema fotovoltaico, como explanado por Aramizu (2010), pode ser classificado em três categorias: sistema isolado ou autônomo, sistema híbrido e sistema conectado à rede de distribuição. Onde os sistemas isolados são aqueles que produzem energia elétrica independentemente de outras fontes e alimentam cargas de corrente contínua e/ou alternada, pode ser necessário o uso de baterias, e os elementos que constituem o sistema variam de acordo com a aplicação desejada.

Enquanto isso, os sistemas híbridos configuram sistemas isolados operando em conjunto com outras fontes geradoras. E no caso do sistema interligado à rede, os painéis fotovoltaicos atuam como uma fonte de energia complementar ao sistema elétrico conectado, caracterizando a geração distribuída. A energia produzida em excesso é injetada na rede e retirada da mesma em períodos que a produção não é suficiente para alimentar a carga. Neste caso é dispensado o uso de baterias para armazenamento de energia.

Em Barin (2007), para título de valores, é atribuído um custo da ordem de aproximadamente R\$ 3500,00 para instalar um sistema fotovoltaico capaz de fornecer 15 kWh/mês. Serviço que satisfaz a condição mínima de abastecimento de energia elétrica.

Conforme publicação de Borges (2015), a microgeração solar tem levado vantagem em relação às pequenas torres eólicas essencialmente pelo motivo de preço, pois estudos apontam que, em média, um projeto eólico previsto para gerar a mesma quantidade de energia de uma estrutura fotovoltaica é até 40% mais caro, não apenas pelo uso de equipamentos de custos mais elevados, como também devido à complexidade de engenharia empregada nesses projetos.

## **2.6 Qualidade da energia elétrica**

Para que seja analisado o comportamento de redes de distribuição com geradores distribuídos fotovoltaicos acoplados, primeiramente é importante conhecer os parâmetros que influenciam na qualidade da energia, para assim haver uma melhor compreensão dos estudos subsequentes.

Friço (2013) enfatiza que a energia elétrica assim como qualquer outro produto deve atender requisitos de qualidade, de um modo geral os parâmetros de qualidade da energia elétrica são relacionados à amplitude e forma de onda da tensão disponibilizada.

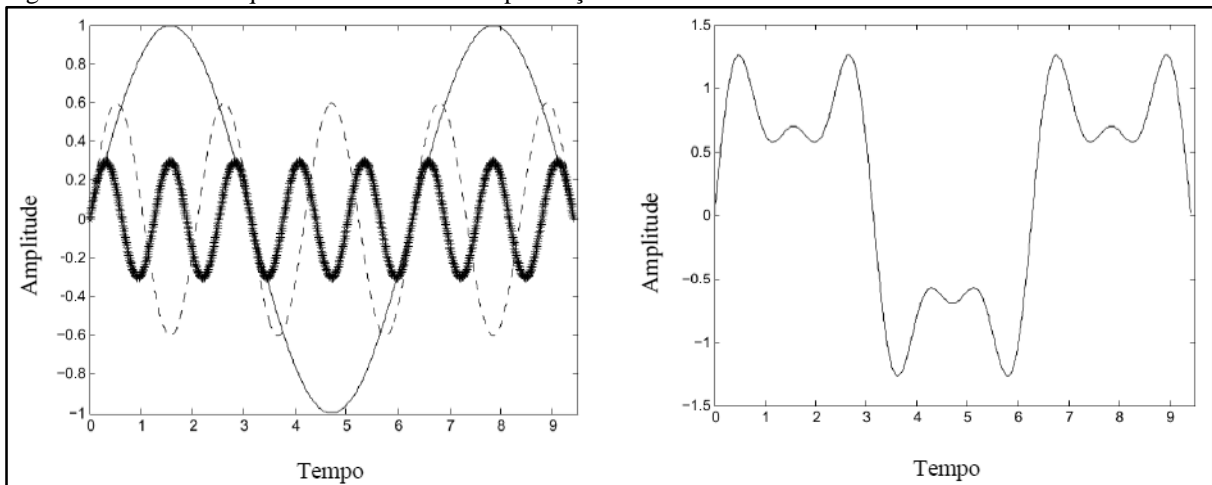
Existe uma forte relação entre a geração distribuída e a qualidade da energia. Por um lado, a geração distribuída pode contribuir como um suporte para os problemas de qualidade de energia, como por exemplo, no auxílio da melhoria da tensão fornecida em áreas de difícil acesso. Mas por outro lado, a implementação errada de unidades de geração na rede pode causar

efeitos maléficis à qualidade da energia elétrica, como por exemplo, no caso de haver um excesso de conexões de geradores distribuídos concentrados numa linha específica, que acarreta numa diferença no fluxo de potência entre linhas da rede de distribuição, que resulta em desvios consideráveis do perfil de tensão das linhas (MATOS; CATALÃO, 2013).

Os aspectos considerados da qualidade da energia são pautados pelo Módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2015) e são: tensão em regime permanente, fator de potência, flutuação de tensão, harmônicos, desequilíbrios de tensão, variação de tensão de curta duração, variação de frequência. Na sequência são detalhados tais parâmetros.

- a) Tensão em regime permanente: são os limites adequados para os níveis de tensão em regime permanente. Esses valores são medidos e comparados com os níveis que são estipulados e considerados adequados, de acordo com o tipo de atendimento da unidade consumidora.
- b) Fator de potência: o fator de potência é calculado através da razão da potência ativa com a potência aparente. O resultado dessa divisão irá indicar a eficiência energética, ou seja, um alto fator de potência caracteriza uma alta eficiência energética e um baixo fator de potência indica uma baixa eficiência energética. Em Sadiku (2013), temos que o valor de fator de potência varia entre zero e a unidade. Para uma carga puramente resistiva, a tensão e a corrente estão em fase, de modo que o fator de potência seja unitário. Isso faz com que a potência aparente seja igual à potência ativa. Para uma carga puramente reativa, o fator de potência equivale à zero, o que faz com que a potência ativa seja nula.
- c) Flutuação de tensão: é a modificação do valor eficaz da tensão, podendo ocorrer aleatoriamente, esporadicamente ou repetitivamente. Matos e Catalão (2013) explicam que se ocorrerem alterações, mesmo que pequenas, durante a saída de unidades distribuídas de uma linha, a tensão é susceptível a sofrer flutuações, tanto de sobretensões como de subtensões, que influenciam a tensão no ponto de consumo. Uma das principais causas desta situação são os sistemas de geração que dependem de condições naturais, como o eólico e o fotovoltaico, que são fontes intermitentes de energia.
- d) Harmônicos: são sinais de frequência diferentes da fundamental adicionados à rede elétrica, ou seja, ruídos de alta frequência que conflitam com o padrão de 60 Hz estabelecido para nossa região. Temos em Schneider (2003) que as harmônicas têm um impacto econômico considerável nas instalações, como o aumento das despesas com energia e perdas de produtividade. A Figura 5 representa a distorção de sinal causada pelos harmônicos.

Figura 5 – Sinal de frequência fundamental na presença da 3ª e 5ª harmônica e o resultante



Fonte: adaptado de MEDEIROS, 2014.

- e) Desequilíbrio de tensão: ocorre quando há desbalanceamento de tensão nominal entre fases em um circuito trifásico. Conforme Medeiros (2014), o valor de referência nos barramentos de distribuição (exceto baixa tensão) é de 2%, ou seja, esse é o desequilíbrio máximo aceito no alimentador.
- f) Variação de tensão de curta duração: são alterações de curto período de tempo no valor eficaz da tensão. Segundo ITI (2000) existe uma grande vulnerabilidade dos equipamentos eletrônicos a estas variações, com isso foi criada a Curva ITIC (IEEE466, 1995) que passou a ser uma referência para verificação do nível de vulnerabilidade de equipamentos comparando-se a curva de sensibilidade dos equipamentos eletrônicos.
- g) Variação de frequência: são alterações nas frequências das ondas senoidais no sistema elétrico de distribuição, não podendo essas alterações ser inferiores a 50,9 Hz ou ultrapassar 60,1 Hz, lembrando que no Brasil a frequência adotada é de 60 Hz.

Através das simulações realizadas será possível quantificar o comportamento da linha de distribuição de baixa tensão com geração distribuída fotovoltaica em relação a alguns dos parâmetros de qualidade da energia, como a taxa de distorção harmônica (TDH), tanto de corrente como de tensão, e o valor do fator de potência. E avaliar também fenômenos como perdas joule e observar o comportamento da injeção de potência pela rede.

## 2.7 Sistemas de distribuição e redes de baixa tensão

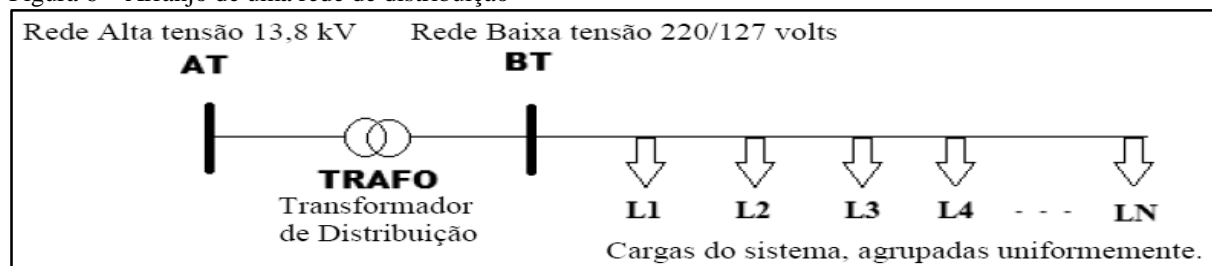
O objetivo dos sistemas de distribuição, conforme Frigo (2013) consiste em transportar a energia elétrica de um barramento, geralmente abrigado por uma subestação primária, até as unidades consumidoras.

E compõe sua estrutura básica as redes de subtransmissão, subestações de distribuição, alimentadores primários, transformadores de distribuição, e redes de baixa tensão (tensão secundária de distribuição).

As redes de distribuição de modo geral apresentam um novo perfil, carregado de cargas não lineares que cada vez estão mais presentes no sistema elétrico. Além das novas tecnologias de geração de energia, principalmente a microgeração, que utiliza equipamentos eletrônicos de potência também de características não lineares para introdução da eletricidade na rede de distribuição (FRIGO, 2013). Com isso, de modo resumido é definido um novo cenário elétrico, com presença de cargas não lineares e geração distribuída junto às cargas também não lineares.

O arranjo estrutural das redes de baixa tensão é descrito por Frigo (2013) a partir do alimentador primário, que é representado por uma fonte trifásica de 13,8 kV em 60 Hz. Na sequência há o transformador de distribuição que converte os níveis de alta tensão para 220 V de tensão entre fases e 127 V entre fase e neutro (Figura 6).

Figura 6 – Arranjo de uma rede de distribuição



Fonte: adaptado de FRIGO, 2013.

A rede de baixa tensão é constituída de quatro condutores, três fases e um neutro. Que fazem a alimentação dos consumidores finais, ou seja, as cargas que são os receptores finais da energia elétrica, elementos que transformam a eletricidade através do trabalho em formas de energia úteis ao homem, como energia térmica, luminosa, sonora e mecânica.

As linhas de distribuição de baixa tensão podem ser aéreas ou subterrâneas, com condutores de liga de alumínio ou cobre. Silva (2009) comenta que atualmente os cabos mais utilizados são de alumínio, embora o cobre apresente maior condutividade. Porém o alumínio tem a vantagem de possuir menor preço e é mais leve, o que deve se considerar em linhas aéreas. Outro aspecto que difere tais condutores é o diâmetro, que no caso do alumínio é superior ao do cabo de cobre equivalente, o que causa uma redução do campo elétrico na superfície.

Os condutores elétricos na configuração de linhas, de acordo com Frigo (2013), apresentam uma resistência e uma indutância que formam uma impedância em série, e uma



condutância e capacitância *shunt* (em derivação). Onde em ramos de pequeno comprimento, menores que 60 metros, as grandezas em derivação não somam valores consideráveis.

O capítulo 4, que diz respeito sobre a modelagem da rede de baixa tensão, trata com mais detalhes os componentes envolvidos na estrutura básica da rede de baixa tensão: o alimentador primário, o transformador de distribuição, os cabos condutores e as cargas.

## **2.8 O software: MATLAB/SIMULINK**

O MATLAB é uma poderosa ferramenta matemática sendo vastamente aplicada em diversas áreas da engenharia. Souza (2012) comenta que a estrutura do programa pode ser dividida em duas grandes plataformas: o ambiente de programação propriamente dito e o ambiente de simulação, o *Simulink*. Enquanto que na área de programação são efetuados códigos e subfunções, no *Simulink* são realizados experimentos a partir de diagramas de blocos.

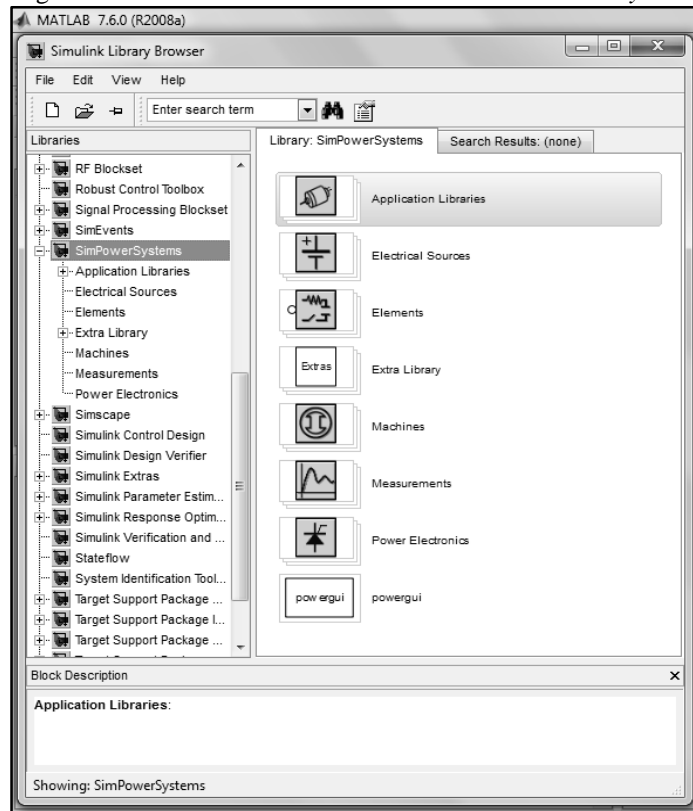
A linguagem de programação do *software* tem caráter dedutivo e muito semelhante à linguagem C, entretanto possui uma gama de facilidades e simplificações, contando com inúmeras funções disponíveis.

O *Simulink* é reservado para simulações por meio de comando de blocos, e possui diversas ferramentas voltadas para aplicações nos mais diferentes campos de estudo. Onde os blocos existentes para desenvolvimento de ensaios são divididos conforme a área relacionada, por exemplo: lógica de controle, circuitos de potência, animação 3D, etc (SOUZA, 2012).

Geralmente os blocos de comando têm entradas e saídas bem definidas, e devem ser conectados de forma a seguir uma sequência lógica desejada, conforme a variável a ser trabalhada. Cada bloco possui uma janela de parâmetros que facilita a sua configuração e faz uma breve explicação da sua finalidade.

Com relação aos estudos pretendidos neste trabalho, os blocos de interesse se encontram na biblioteca *SimPowerSystems* (blocos de sistema de potência). Conforme Souza (2012), esta sessão, ilustrada na Figura 7, guarda os objetos utilizados na construção de circuitos elétricos de potência, circuitos eletrônicos, sistemas de máquinas, medições, dentre outros. E será essencial para desenvolver as simulações pertinentes para o estudo dos efeitos do acoplamento de microgeradores fotovoltaicos em redes de distribuição de baixa tensão.

Figura 7 – Interface MATLAB/SIMULINK “SimPowerSystems”



Fonte: o autor.

## 2.9 Regulamentação da geração distribuída de pequeno porte no Brasil

No Brasil, a regulamentação ou qualquer outra medida que envolva o setor elétrico compete à Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, que tem o compromisso de buscar harmonizar os interesses do Estado, dos agentes e dos consumidores quanto à energia elétrica.

No exercício das suas competências legais, portanto, a Agência promoveu a Consulta Pública nº 15/2010 (de 10 de setembro a 9 de novembro de 2010) e a Audiência Pública nº 42/2011 (de 11 de agosto a 14 de outubro de 2011), as quais foram instauradas com o objetivo de debater os dispositivos legais que tratam da conexão de geração distribuída de pequeno porte na rede de distribuição.

Como resultado desse processo de consulta e participação pública na regulamentação do setor elétrico, a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, estabeleceu as condições gerais para o acesso de micro e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, e criou o sistema de compensação de energia elétrica correspondente. (ANEEL, 2014, p. 10).

A conexão de pequenos geradores distribuídos na rede de distribuição é regida de acordo com a Resolução Normativa nº 482/2012. E de modo complementar, o Módulo 3 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST estabelece as condições de acesso, compreendendo a conexão e o uso, ao sistema de distribuição

(MEDEIROS, 2014). Onde na seção 3.7 do PRODIST são estabelecidos os procedimentos da geração distribuída de pequeno porte, e então são apresentados os níveis de tensão para as centrais geradoras que são consideradas micro e minigeração, recentemente revisados, e definidos como microgeração fontes com potência de até 75 kW e minigeração fontes com potência entre 75 kW e 3 MW para recursos hídricos, ou 75 kW e 5 MW para outras fontes renováveis (ANEEL, 2012).

A Resolução 482/2012 possibilita que o fluxo de energia passe a ser bidirecional, o que faz com que o consumidor, além de receber a eletricidade da concessionária, tenha a opção de gerar energia para consumo próprio ou para exportar para a rede elétrica e gerar créditos de energia (ANEEL, 2012).

O primeiro passo para implementar unidades geradoras de pequeno porte consiste na viabilização de acesso à rede de distribuição, onde o consumidor requer uma solicitação de acesso à distribuidora de energia. De acordo com a ANEEL (2014), nessa solicitação deve haver o projeto das instalações de conexão (memorial descritivo, localização, arranjo físico, diagramas), e outros documentos e informações que sejam pedidos pela distribuidora.

Na sequência, a distribuidora emite um parecer de acesso que informa ao requerente, entre outras disposições, as condições e requisitos técnicos necessários para liberar a conexão do pequeno sistema gerador e os respectivos prazos. Ressaltado que cabe a distribuidora a responsabilidade pela coleta de dados referentes às unidades geradoras para fins de registro na ANEEL.

Quanto ao sistema de medição, as especificações são as mesmas exigidas às demais unidades consumidoras que estejam conectadas no mesmo nível de tensão, somente adicionando a funcionalidade que permita a medição bidirecional de energia. Que para instalações em baixa tensão, pode ser feita com uso de dois medidores, um para aferir consumo e outro a geração. Após a validação do sistema de medição, a distribuidora será responsável pela sua operação e manutenção, incluindo os custos de eventual substituição ou adequação.

A ANEEL (2012) esclarece que é dispensada assinatura de contratos de uso e conexão para micro e minigeração distribuída que faça parte do sistema de compensação de energia elétrica. Apenas basta haver por parte da distribuidora, a emissão de uma formalização do Relacionamento Operacional para microgeradores ou uma celebração de Acordo Operativo para minigeradores.

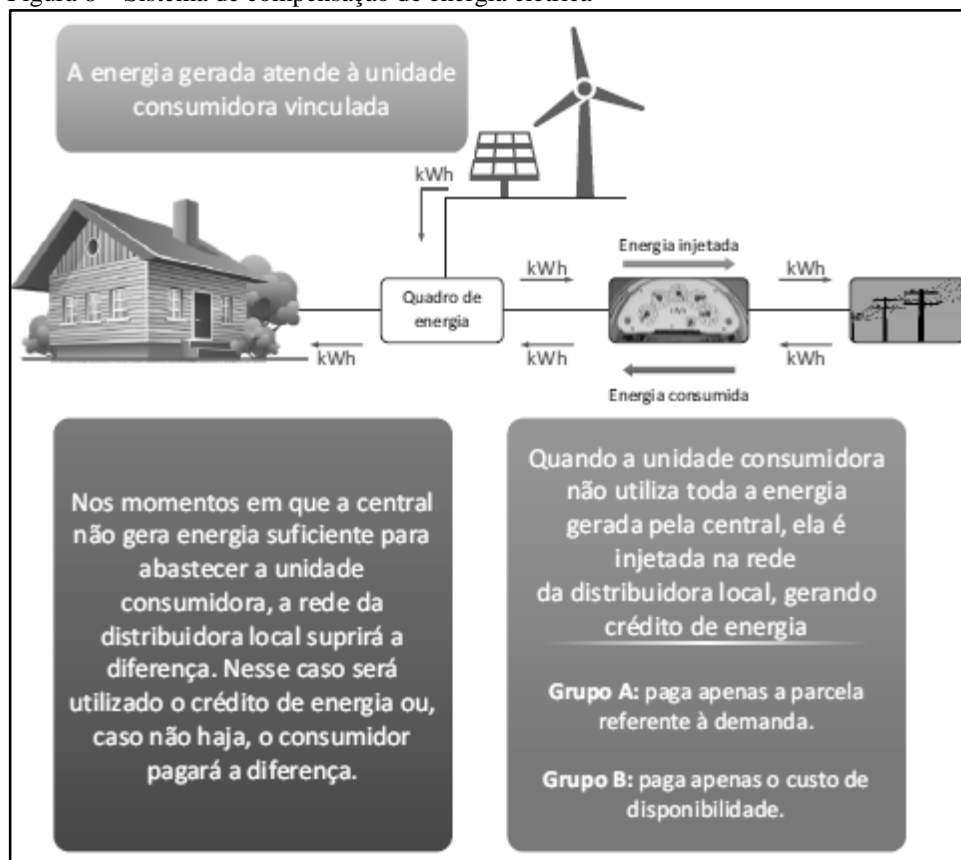
Já sobre a incidência de impostos federais e estaduais, como ICMS e PIS/COFINS, é explicado em ANEEL (2014) que a cobrança foge das competências da Agência Nacional de Energia Elétrica, e que cabe à Receita Federal do Brasil e às Secretarias de Fazenda Estaduais

tratar dessa questão. Porém, apesar do assunto não ser de sua responsabilidade, a visão da ANEEL é que a tributação deveria incidir apenas na diferença, se positiva, entre os valores finais de consumo e energia excedente de geração injetada na rede, o que não acontece em algumas distribuidoras, onde o cálculo do montante de impostos é aplicado para todo o consumo.

Como comentado, o excedente de energia gerada que é disponibilizado para a rede, é tido como crédito ao consumidor, através de um sistema de compensação de energia elétrica. Sistema no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa, crédito esse que pode ser utilizado em até 60 meses, caso contrário é expirado (ANEEL, 2012).

A Figura 8 descreve a dinâmica de funcionamento do sistema de compensação de energia elétrica.

Figura 8 – Sistema de compensação de energia elétrica



Fonte: adaptado de ANEEL, 2014.

No estado de Minas Gerais, a concessionária local Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG, embasada nas normativas da ANEEL dita as regras para geração distribuída

de pequeno porte em sua área de abrangência por meio da Norma de Distribuição ND 5.30 (CEMIG, 2012).

### 3 METODOLOGIA

Para alcançar o objetivo proposto de estudar o perfil da rede BT com acoplamento de microgeração fotovoltaica, foram considerados trabalhos de inúmeros autores relacionados ao tema de geração distribuída, para solidificar o entendimento dos conceitos sobre o assunto e auxiliar na idealização da metodologia empregada na modelagem, simulação e análise dos resultados deste trabalho.

#### 3.1 Metodologia da modelagem

A modelagem utilizada para este trabalho é embasada em cálculos matemáticos que propiciam determinar valores para o modelo dos componentes que integram a rede de baixa tensão adotada nos estudos. Tais valores são considerados convenientes para um caso de rede real, visto a preocupação em determiná-los através de métodos matemáticos.

Já para o modelo do microgerador optou-se por adaptar um sistema fotovoltaico utilizado por Saini (2013). Tal sistema é trifásico e composto além do painel fotovoltaico, por um conversor e um inversor.

A fim de detalhar toda a modelagem presente no estudo, é dedicado o capítulo seguinte (cap. 4), exclusivamente para este propósito.

#### 3.2 Metodologia da simulação

Servindo-se da modelagem elaborada, o próximo passo foi simular a rede e coletar os dados de interesse para a análise.

A rede de baixa tensão foi simulada com apoio da plataforma *Simulink* do programa MATLAB, onde para o específico estudo, com intuito de investigar o comportamento do sistema, foram definidas três situações de operação, são elas:

- a) Situação I – Rede sem microgeração: este cenário é destinado a traçar a atuação da rede sem geração distribuída de pequeno porte, colhendo informações da rede com geração centralizada para que se possam confrontar os dados com os casos onde a rede apresenta microgerador conectado.
- b) Situação II – Rede com microgeração 2,3 kW: é injetada na rede da situação anterior uma fonte microgeradora fotovoltaica que nas condições daquele momento está produzindo em torno de 2300 W de energia. E então é mensurado o desempenho do sistema.

- c) Situação III – Rede com microgeração 6,3 kW: na mesma rede da Situação I é acoplada uma microgeração mais presente, que no instante está gerando cerca de 6300 W (por meio da ligação de três modelos do sistema fotovoltaico utilizado, em paralelo). Cenário este, com intenção de juntar dados sobre a performance da rede de baixa tensão com uma geração de pequeno porte mais expressiva.

A coleta de dados ocorreu por meio de blocos disponíveis na plataforma computacional *Simulink* direcionados a colher sobre tudo as informações de interesse, sejam elas o próprio valor do parâmetro ou dados que permitam encontrá-los facilmente.

Os dados coletados em cada situação de estudo consistem em:

- a) Potência ativa fornecida pelo trafo (W);
- b) Potência reativa fornecida pelo trafo (VAr);
- c) Potência aparente no trafo (VA);
- d) Fator de potência;
- e) Perdas nos condutores da rede (W);
- f) Corrente no neutro (A);
- g) Taxa de distorção harmônica total de corrente – TDHi (%);
- h) Taxa de distorção harmônica total de tensão – TDHv (%);
- i) Taxa de distorção harmônica total de corrente no neutro – TDHin (%).

### 3.3 Metodologia da análise

Depois da coleta, os dados foram organizados e foi feita a análise, os resultados alcançados foram discutidos e foi apontada solução caso necessário.

Primeiro as informações de cada situação foram tabeladas e expostas separadamente, e em seguida faz-se uma comparação dos valores encontrados em cada situação. Deste modo discutem-se os resultados do comportamento da rede.

Para aqueles parâmetros em que os valores devem obedecer a uma margem limite de acordo com normas (para este trabalho àqueles relativos à qualidade de energia), caso extrapolem foi indicado uma possível solução para o problema.

## 4 MODELAGEM DA REDE DE BAIXA TENSÃO (BT) E DO MICROGERADOR

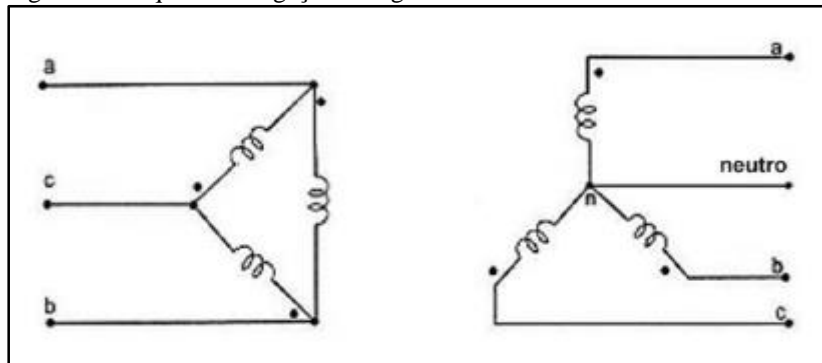
Para analisar o impacto na rede de BT advindo da microgeração fotovoltaica, é imprescindível modelar uma rede de modo a representar fielmente por meio computacional o seu comportamento real. Isto é possível através da construção em *Simulink* de modelos dos componentes que constituem a rede elétrica BT: transformador, cabos e cargas elétricas.

Além disso, faz-se necessário um modelo para o microgerador fotovoltaico, que neste caso foi adaptado um sistema já configurado por Saii (2013), como será visto posteriormente.

### 4.1 Modelo do transformador de distribuição

As características do transformador, conforme descrito por Macedo (2012), variam de acordo com a potência desejada, o nível de tensão do lado de primário ou até mesmo com a localização em que o trafo será instalado. De modo geral os transformadores de distribuição têm seus enrolamentos configurados em triângulo-estrela com neutro aterrado (Figura 9), onde se recebem as três fases de 13,8 kV no lado primário ligadas em triângulo, e no secundário que é ligado em estrela saem às três fases de baixa tensão e o condutor neutro.

Figura 9 – Esquema de ligação triângulo-estrela com neutro aterrado

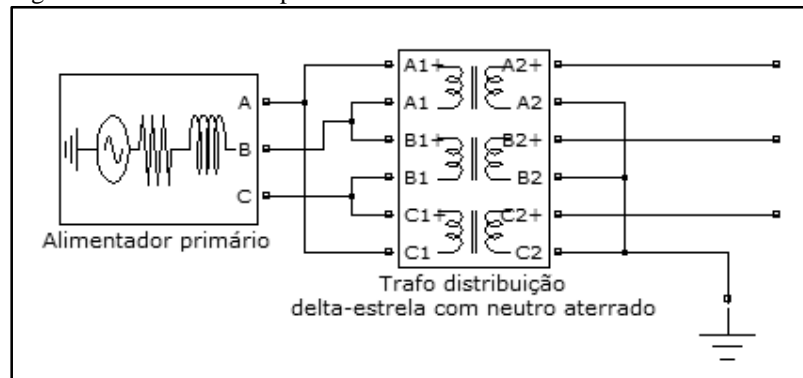


Fonte: MACEDO, 2012.

Frigo (2013) explica que a configuração triângulo-estrela com neutro aterrado que permite o surgimento do condutor neutro possibilita o trabalho com duas tensões nos circuitos secundários de distribuição: 220 V entre fases e 127 V fase-neutro.

Para as simulações propostas em *Simulink* foi utilizada uma fonte senoidal trifásica de 13,8 kV e frequência de 60 Hz para representar o alimentador primário, que consiste no sistema de alta tensão que é conectado no primário do bloco que opera como o trafo de distribuição, o que é ilustrado na Figura 10.



Figura 10 – Alimentador primário e trafo modelados em *Simulink*

Fonte: o autor.

O transformador usado na modelagem da rede é de 45 kVA, 13800/220 V. Cujos dados utilizados para cálculo dos parâmetros do trafo foram extraídos do catálogo de um fabricante de transformadores com característica adotado para tal modelagem (Figura 11). Silva (2009) enfatiza que de um fabricante para outro não existem grandes alterações entre as características (valores de catálogo) dos transformadores.

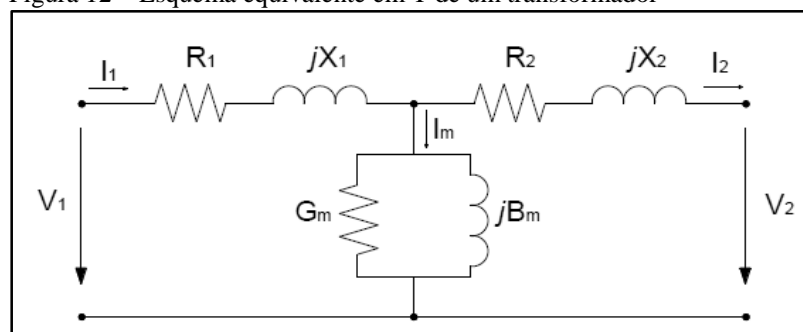
Figura 11 – Dados de um trafo convencional 45 kVA

kVA	Dimensões (mm)					Corrente de excitação (%)	Perdas em vazio (W)	Perdas Totais (W)	Tensão de curto-circuito 75° C (%)	Volume óleo (L)	Massa Total (kg)
	A	C	L	B	D						
5	770	740	575			4,8	100	440		45	155
20	810	760	575	300	120	4,1	170	740		50	207
45	845	795	585			3,7	220	1000	3,5	60	270
75	855	855	655			3,1	300	1170		70	305
112,5	955	1150	730			2,8	440	1990		89	475
150	985	1280	835	400	150	2,6	540	2450		95	550
225	1045	1610	990			2,3	765	3465		135	790
300	1110	1600	1000			2,2	950	4310	4,5	190	900

Fonte: adaptado de ELETRAFO TRANSFORMADORES, 2016.

O cálculo dos parâmetros do transformador de distribuição utilizado nas simulações foi realizado com base no esquema equivalente em T de um transformador (Figura 12).

Figura 12 – Esquema equivalente em T de um transformador



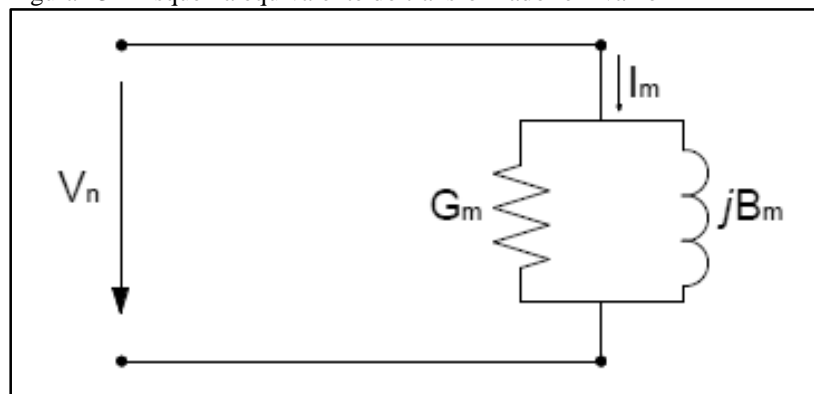
Fonte: LOPES, 2011.

Onde os valores de interesse obtidos consistem nas resistências e reatâncias dos enrolamentos primário e secundário ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $X_1$ ,  $X_2$ ), além da resistência e reatância de magnetização ( $R_m$ ,  $X_m$ ), todos em p.u. (por unidade). Estes são definidos através do ensaio em vazio e do ensaio de curto-circuito atribuídos ao equivalente em T do trafo.

#### 4.1.1 Ensaio em vazio

O ensaio em vazio (Figura 13) possibilita encontrar a resistência e a reatância de magnetização ( $R_m$ ,  $X_m$ ). Silva (2009) explica que neste ensaio é aplicada a tensão nominal no secundário (lado de baixa tensão), no caso  $V_n=220$  V, e o primário é colocado em circuito aberto. E assim a corrente que percorre o circuito é então a corrente de excitação ou magnetização, que conforme o catálogo  $I_m=3,7\%$ . Outro dado fornecido são as perdas em vazio  $P_o=220$  W, que representam a potência perdida no ramo de magnetização já que a impedância do enrolamento série é muito menor e então é desconsiderada.

Figura 13 – Esquema equivalente do transformador em vazio



Fonte: LOPES, 2011.

Para obterem-se os resultados em p.u. é necessário utilizar os valores de base, onde: tensão base  $V_b=220$  V e potência base  $S_b=45$  kVA.

Valores em p.u.:

$$V_n=1 \text{ p.u.}$$

$$I_m=0,037 \text{ p.u.}$$

$$P_o=220/45000 = 0,0049 \text{ p.u.}$$

Por fim, com estes dados e recorrendo as fórmulas seguintes se calcula a condutância e a susceptância de magnetização ( $G_m=0,0049$  p.u.,  $B_m=0,0367$  p.u.), e conseqüentemente os parâmetros de interesse, a resistência e a reatância de magnetização ( $R_m=204,08$  p.u.,  $X_m=27,25$  p.u.).

$$Gm = \frac{Po}{Vn^2} \quad (01)$$

$$Bm = \sqrt{\left(\frac{Im}{Vn}\right)^2 - Gm^2} \quad (02)$$

$$Rm = \frac{1}{Gm} \quad (03)$$

$$Xm = \frac{1}{Bm} \quad (04)$$

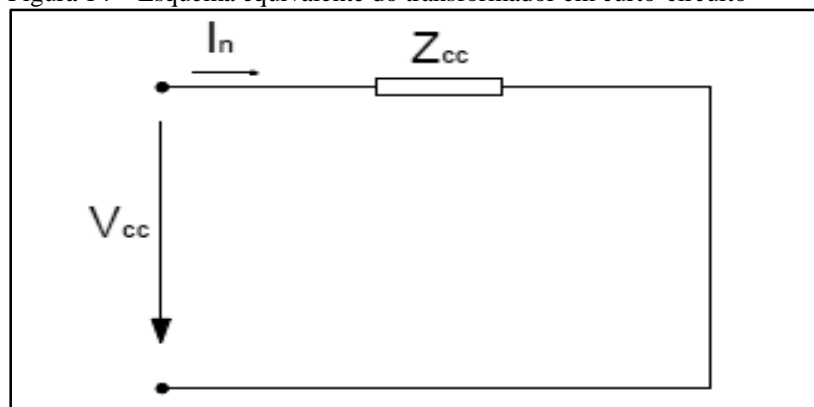
#### 4.1.2 Ensaio de curto-circuito

O ensaio de curto-circuito (Figura 14) possibilita encontrar a resistência e a reatância dos enrolamentos primário e secundário ( $R1$ ,  $R2$ ,  $X1$ ,  $X2$ ). Silva (2009) descreve que neste ensaio o secundário (lado de baixa tensão) é colocado em curto, enquanto aplica-se no primário a tensão de curto-circuito ( $V_{cc}=3,5\%$  conforme o fabricante) e então percorre o secundário a corrente nominal  $I_n=1,88$  A do trafo em plena carga, obtida pela equação abaixo.

$$I_n = \frac{S_b}{\sqrt{3} \cdot V_n} \quad (05)$$

Neste ensaio a impedância do ramo de magnetização é desprezada, por ser muito superior às impedâncias dos enrolamentos e o circuito estar em curto. Ainda é fornecida no catálogo as perdas em curto-circuito  $P_{cc}=1000$  W.

Figura 14 – Esquema equivalente do transformador em curto-circuito



Fonte: LOPES, 2011.

Para obterem-se os resultados em p.u. é necessário utilizar os valores de base, onde: corrente base  $I_b=1,88$  A e potência base  $S_b=45$  kVA.

Valores em p.u.:

$$I_n=1 \text{ p.u.} \quad V_{cc}=0,035 \text{ p.u.} \quad P_{cc}=1000/45000 = 0,0222 \text{ p.u.}$$

Então, com estes dados e recorrendo as fórmulas abaixo se calcula a impedância de curto-circuito ( $Z_{cc}=0,035$  p.u.), a resistência e a reatância total dos enrolamentos ( $R_t=0,0222$  p.u.,  $X_t=0,0271$  p.u.).

$$Z_{cc} = \frac{V_{cc}}{I_n} \quad (06)$$

$$R_t = \frac{P_{cc}}{I_n^2} \quad (07)$$

$$X_t = \sqrt{Z_{cc}^2 - R_t^2} \quad (08)$$

E ao considerar que os enrolamentos do primário e do secundário possuem a mesma resistência e reatância, encontram-se os parâmetros de interesse  $R_1=R_2=0,0111$  p.u.,  $X_1=X_2=0,0136$  p.u. por meio das fórmulas:

$$R_1 = R_2 = \frac{R_t}{2} \quad (09)$$

$$X_1 = X_2 = \frac{X_t}{2} \quad (10)$$

Em resumo, o transformador de 45 kVA, 13800/220 V dimensionado para as simulações possui os seguintes parâmetros:

Enrolamento primário:  $R_1=0,0111$  p.u. e  $X_1=0,0136$  p.u.

Ramo de magnetização:  $R_m=204,08$  p.u. e  $X_m=27,25$  p.u.

Enrolamento secundário:  $R_2=0,0111$  p.u. e  $X_2=0,0136$  p.u.

## 4.2 Modelo dos cabos condutores BT

Os parâmetros de interesse dos cabos de distribuição, de acordo com Vieira (2008), são resistência, indutância, capacitância transversal e a ampacidade. Fatores como a distância entre as fases, altura da linha em relação ao solo e tipo do cabo utilizado, podem influenciar nos parâmetros da linha.

A resistência é definida como a capacidade do condutor de se opor à passagem de corrente, e ela representa as perdas por efeito Joule (relação entre o calor gerado e a corrente elétrica que percorre um condutor em determinado tempo) dos condutores de uma linha. Vieira (2008) cita que a resistência de um cabo pode sofrer alterações quando existe variação de corrente no condutor ao longo do tempo. Essa mudança de resistência ocorre devido a três fatores: efeito pelicular, efeito de proximidade e a temperatura de operação. Porém os dois primeiros fenômenos são desprezados ao se tratar de redes de baixa tensão.

Já a indutância é um parâmetro que relaciona a tensão induzida por variação de fluxo magnético com a taxa de variação da corrente. O fluxo magnético produzido por correntes alternadas produz indutâncias série e mútua. E tem influência na capacidade de transporte e na queda de tensão da linha, entretanto não causa perda de potência ativa.

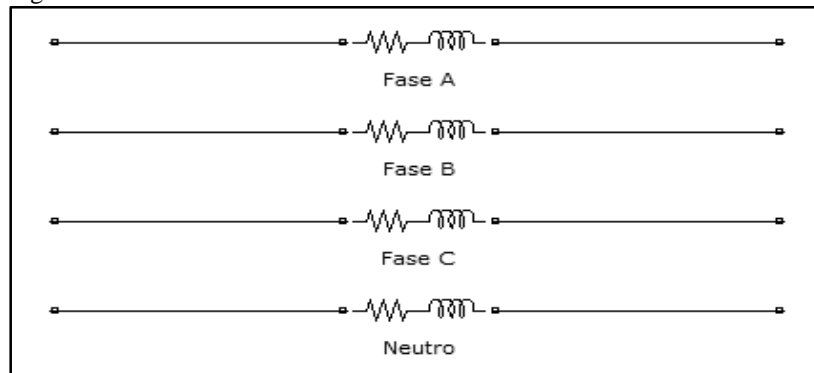
A combinação destes dois parâmetros resulta numa impedância em série, ou impedância longitudinal da linha.

Enquanto isso, a capacitância da linha de distribuição é dita como a carga elétrica nos condutores por unidade de diferença de potencial entre estes condutores. Vieira (2008) explica que o fato de existirem cargas elétricas circulando ao longo da linha (corrente elétrica) produz um campo elétrico radial ao eixo principal da linha de distribuição.

Juntamente com a condutância, fator desprezível em linhas de baixa tensão, a capacitância forma uma admitância em derivação ou shunt, também denominada de capacitância transversal.

Por último, tem-se a ampacidade que é um parâmetro da linha de distribuição que determina o limite de carregamento de cada cabo. Fator que no caso específico de linhas aéreas depende apenas de questões climáticas (temperatura ambiente, densidade do ar, velocidade do vento, condutividade térmica), ou seja, deve-se obedecer a um limite térmico.

Para a modelagem dos cabos da linha de baixa tensão simulada, ao levar em consideração o seu curto comprimento, os parâmetros a serem considerados são somente a resistência e a indutância, que em conjunto formam a impedância série. Deste modo a configuração do modelo em *Simulink* dos cabos condutores fica como ilustrado na Figura 15.

Figura 15 – Modelo em *Simulink* do cabeamento BT

Fonte: o autor.

Os parâmetros de interesse dos cabos condutores para a simulação, resistência e indutância, foram adquiridos com base no guia técnico da Solidal Condutores Elétricos S.A. (2007), que para um condutor de alumínio de seção de 70 mm atribui uma resistência  $R=0,443 \Omega/\text{km}$  e uma indutância  $L=0,273 \text{ mH}/\text{km}$ .

Ao definir uma linha de 60 metros de extensão, têm-se os seguintes valores para os parâmetros dos condutores:

Resistência:  $R= 0,0266 \Omega$ ;

Indutância:  $L= 0,0164 \text{ mH}$ .

### 4.3 Modelo das cargas elétricas

As cargas, receptores finais da energia elétrica, são classificadas conforme sua linearidade, divididas em cargas lineares e cargas não lineares (FRIGO, 2013).

#### 4.3.1 Cargas lineares

As cargas lineares são as resistências, capacitores e indutores, desde que não saturados. A princípio, antes do advento da eletrônica e da eletrônica de potência, o sistema elétrico era predominantemente composto de cargas de característica linear.

Os circuitos puramente resistivos não apresentam impactos na qualidade da energia, pois não são fontes de harmônicas nem de fluxo de energia reativa. Toda energia drenada por essas cargas é convertida em outras formas de energia como calor e luz. Circuitos resistivos são encontrados em chuveiros, aquecedores, lâmpadas incandescentes.

Circuitos indutivos são representados por motores, compressores, transformadores. Tem por característica a presença de uma indutância e uma resistência, cuja representação é um indutor em série com um resistor. As cargas indutivas consomem fluxo de potência reativa, que alimenta os campos eletromagnéticos e garante o funcionamento dos equipamentos.

Já os circuitos capacitivos são encontrados principalmente na presença de bancos de capacitores e equipamentos com filtro capacitivo.

Cargas indutivas e capacitivas apesar de não provocarem distorções harmônicas demandam de reativos e, portanto podem causar distúrbios na qualidade da energia, como baixo fator de potência e perda de eficiência energética.

A potência total de sistemas com indutores e capacitores é representada pela soma vetorial entre as potências ativas e reativas, que é denominada potência aparente. A relação entre a potência aparente e a potência ativa é expressa pelo fator de potência.

#### 4.3.2 Cargas não lineares

A presença de semicondutores no circuito dos equipamentos tem se tornado cada vez mais constante, basicamente todo equipamento que faça conversão da energia alternada em contínua e/ou contínua em alternada possuem materiais semicondutores. Aparelhos como televisores, microcomputadores, lâmpadas fluorescentes compactas e inversores para sistemas solares e eólicos de energia são exemplos de equipamentos com tais características.

Este tipo de carga tem aumentado muito com a popularização dos dispositivos eletrônicos. Aproximadamente 50% da energia elétrica passa por um dispositivo de eletrônica de potência antes que seja finalmente utilizada. Essa eletrônica faz o uso de componentes semicondutores, principalmente os diodos, transistores e tiristores, que atuam controlando a passagem de corrente, muito presente em conversores.

Com a incorporação de cargas não lineares na rede elétrica, como os retificadores, há ocorrência de distúrbios de qualidade como as distorções harmônicas, que segundo Frigo (2013), podem causar cintilação luminosa, aquecimento indevido de condutores e equipamentos, acionamento indevido da proteção, vibrações e acoplamentos, perda de eficiência, redução do fator de potência, ressonâncias, tensões elevadas entre neutro e terra e aumento da corrente no condutor neutro.

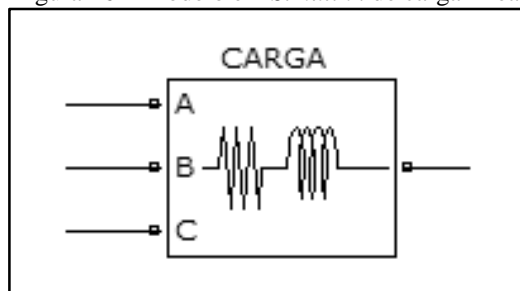
### 4.3.3 Modelagem

A modelagem das cargas elétricas lineares, com finalidade de simplificar o sistema modelado e facilitar o processamento dos dados, foi feita através de um agrupamento de cargas para representar determinado conjunto de cargas como uma só carga equivalente, de potência igual ao total que ela representa.

Não dispondo de dados de redes reais que permitem conhecer as cargas ligadas em determinados pontos da rede, é então dimensionada e simulada uma rede genérica que corresponde às configurações e condições típicas de operação de uma rede de baixa tensão.

Foi utilizado o bloco trifásico de carga RLC do *Simulink* (Figura 16) para representar uma carga linear acoplada à rede de distribuição. Os parâmetros de interesse neste bloco são basicamente a potência ativa e reativa consumida pela carga.

Figura 16 – Modelo em *Simulink* de carga linear



Fonte: o autor.

É possível obter as potências ativa e reativa através da potência complexa da carga ( $\mathbf{S}$ ), que em sua forma polar tem como módulo a potência aparente ( $S$ ) e o ângulo do fator de potência ( $\cos^{-1}fp$ ), e já em retangular a parcela real representa a potência ativa ( $P$ ) e a imaginária a potência reativa ( $Q$ ), conforme descreve a fórmula abaixo.

$$\mathbf{S} = S \angle (\cos^{-1} fp) = P + jQ \quad (11)$$

Para este trabalho é considerada uma situação em que o trafo de 45 kVA opera alimentando uma carga linear de potência aparente  $S=40$  kVA com fator de potência  $fp=0,94$  atrasado, tem-se uma potência ativa  $P=37600$  W e uma potência reativa  $Q=13650$  VAR.

O fator de potência ( $fp$ ) expressa à relação entre a potência aparente e a potência ativa, conforme descreve a equação seguinte.

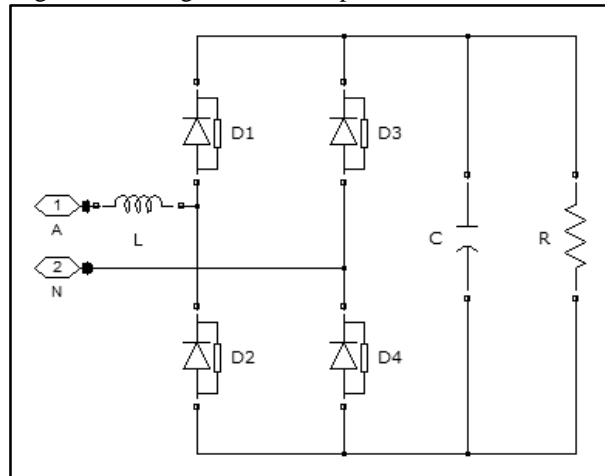


$$fp = \frac{P}{S} \quad (12)$$

Já para representar as cargas não lineares tipicamente presentes numa rede de baixa tensão, adotou-se o modelo de Silva (2009), que diz que cargas não lineares como receptores de televisão, leitores de DVD ou computadores, por exemplo, possuem na sua entrada um retificador monofásico e assim apresentam semelhança na forma de onda da corrente consumida, o que permite modelar tais cargas seguindo um mesmo modelo de circuito.

Então para esta simulação as cargas não lineares conectadas à rede foram do tipo retificador (Figura 17), onde os valores dos elementos R, L e C são dimensionados mediante a potência do aparelho.

Figura 17 – Carga não linear tipo retificador monofásico



Fonte: o autor.

Ao considerar uma potência média  $P_m=200$  W para este tipo de carga, e conhecendo a tensão nominal simples da rede ( $V_n=127$  V) encontra-se o resistor equivalente do retificador.

$$R = \frac{2 \cdot V_n^2}{P_m} \quad (13)$$

Silva (2009) diz que  $\Delta V/\Delta t$  é a taxa de variação máxima da tensão nos terminais da carga, onde é adotado um  $\Delta t=10^{-3}$  s e um  $\Delta V=0,17\sqrt{2} \cdot V_n$  para este tipo de carga. O que possibilita dimensionar o capacitor.

$$C = \frac{(\sqrt{2} \cdot V_n / R) \cdot \Delta t}{\Delta V} \quad (14)$$

No cálculo do indutor de entrada, Silva (2009) esclarece que para tal tipo de carga é habitual considerar-se que o valor da bobina indutora vale 3% do valor do resistor equivalente do circuito retificador.

$$L = \frac{0,03.R}{2.\pi.f} \quad (15)$$

As cargas não lineares do tipo retificador monofásico, utilizadas na simulação proposta, têm então os seguintes valores para os componentes do circuito:

Resistor:  $R= 161,30 \Omega$ ;

Capacitor:  $C= 36,47 \mu\text{F}$ ;

Indutor:  $L= 12,83 \text{ mH}$ .

Para este trabalho considerou-se uma situação em que um total de 2400 W de carga não linear está acoplada na rede, no instante da simulação, de forma balanceada.

#### 4.4 Modelo do microgerador fotovoltaico

Para o modelo do microgerador fotovoltaico utilizado nas simulações propostas por este trabalho, adaptou-se o painel criado por Saii (2013), onde em seu projeto original, o sistema de energia solar é utilizado para acionar uma máquina assíncrona alternada, com ajuda de um conversor e um inversor.

Como o funcionamento do painel fotovoltaico está intimamente ligado às variações de irradiação e temperatura (FRIGO, 2013), o sistema possui um conversor de tensão CC-CC do tipo *boost converter*, com finalidade de manter um nível de tensão adequado para a correta performance do inversor que transformará a corrente contínua em alternada 60 Hz.

O inversor CC-CA utilizado por Saii (2013) é do tipo PWM (*Pulse Width Modulation*) para modulação senoidal por largura de pulso, e neste caso tem uma frequência de chaveamento de 500 Hz. Na saída do inversor há um filtro de conexão indutivo de 16,66 mH para amenizar os efeitos da inversão.

Na sequência, o sistema de microgeração fotovoltaico (Figura 18) é conectado à rede de distribuição para as devidas simulações. E é observado em condições onde se tem um melhor desempenho de sua operação (nível de irradiação de  $1000 \text{ W/m}^2$  e temperatura de  $25^\circ\text{C}$ ) uma potência de pico em torno de 2,3 kW.



## 5 SIMULAÇÕES, RESULTADOS E DISCUSSÃO

Depois de apresentada a modelagem no capítulo anterior, neste capítulo são expostos os dados coletados das três situações consideradas, os resultados são comparados graficamente e então é feita uma discussão sobre o comportamento do sistema ao acoplar microgeração fotovoltaica.

### 5.1 Dados coletados nas simulações

#### 5.1.1 Situação I – Rede sem microgeração

Os dados coletados na Situação I, em que a rede opera sem acoplamento de microgeração fotovoltaica, são apresentados na Tabela 1 abaixo.

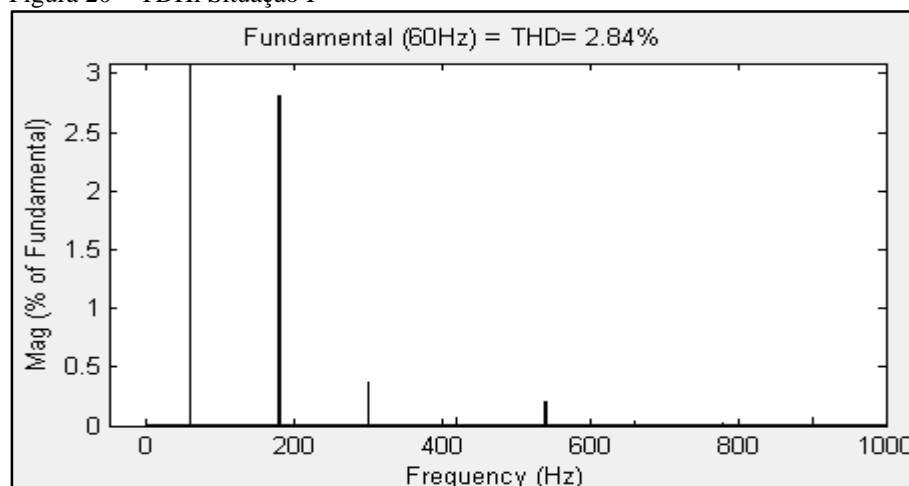
Tabela 1 – Dados coletados na Situação I

Potência ativa fornecida pelo trafo (W)	Potência reativa fornecida pelo trafo (VAr)	Potência aparente no trafo (VA)	Fator de potência (fp)	Perdas nos condutores da rede (W)	Corrent e neutro (A)
23081	25401	34321	0,6725	594	8,63

Fonte: o autor.

A taxa de distorção harmônica total de corrente (TDHi) para esta situação é de 2,84%, e está ilustrada na Figura 20, onde é possível notar uma predominância das harmônicas de 3ª e 5ª ordem.

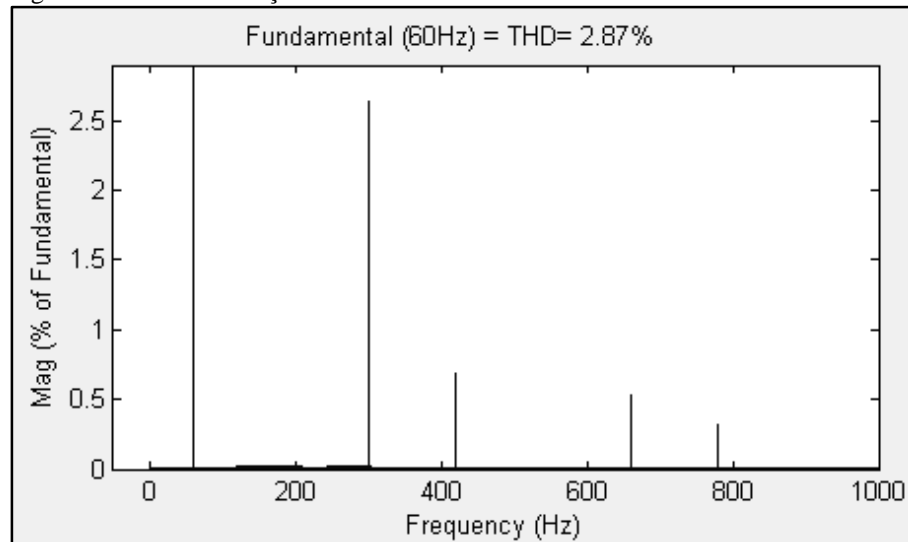
Figura 20 – TDHi Situação I



Fonte: o autor.

A taxa de distorção harmônica total de tensão (TDHv) é de 2,87% com predomínio das harmônicas de 5ª, 7ª e 11ª ordem (Figura 21).

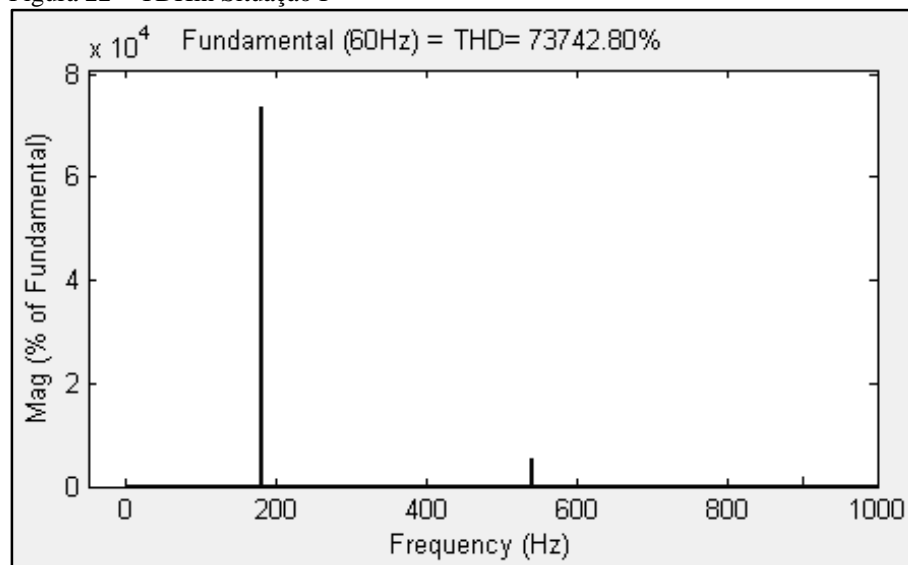
Figura 21 – TDHv Situação I



Fonte: o autor.

Já a corrente no neutro tem uma taxa de distorção (TDH<sub>in</sub>) de 73742,80%, deste modo pode-se considerar a corrente que flui no neutro como uma corrente de ordem harmônica. Há predomínio das harmônicas da 3ª e 9ª ordem (Figura 22).

Figura 22 – TDH<sub>in</sub> Situação I



Fonte: o autor.

### 5.1.2 Situação II – Rede com microgeração 2,3 kW

Na Situação II, onde a rede está operando em conjunto com um microgerador que produz aproximadamente 2,3 kW, foram coletados os dados expostos pela Tabela 2.

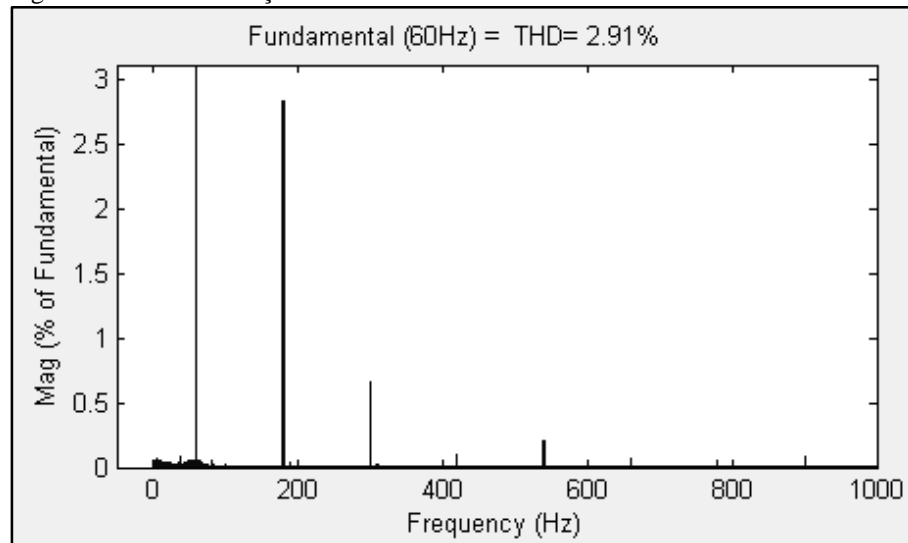
Tabela 2 – Dados coletados na Situação II

Potência ativa fornecida pelo trafo (W)	Potência reativa fornecida pelo trafo (VAr)	Potência aparente no trafo (VA)	Fator de potência (fp)	Perdas nos condutores da rede (W)	Corrent e neutro (A)
19007	26802	32857	0,5785	584	8,30

Fonte: o autor.

A TDHi nessa situação é de 2,91%, e é possível perceber a predominância das harmônicas de 3ª e 5ª ordem, como ilustra a Figura 23.

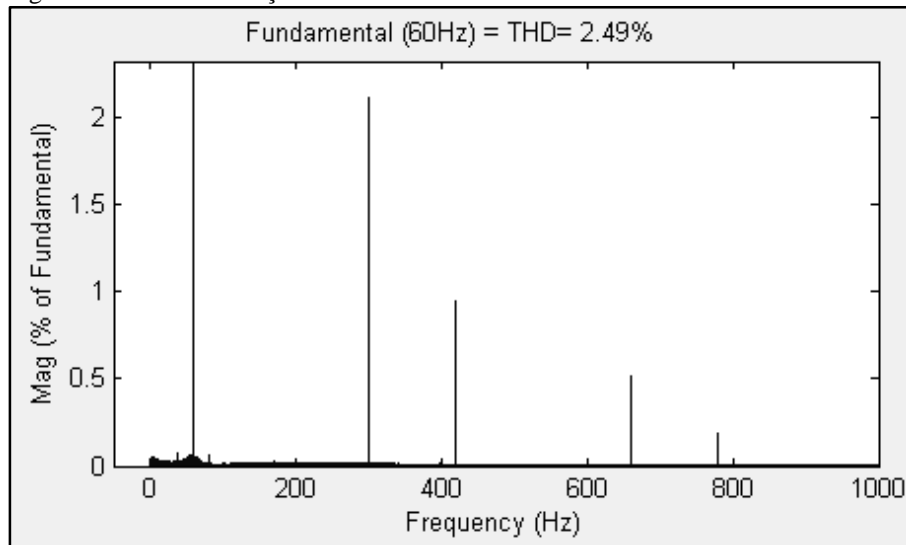
Figura 23 – TDHi Situação II



Fonte: o autor.

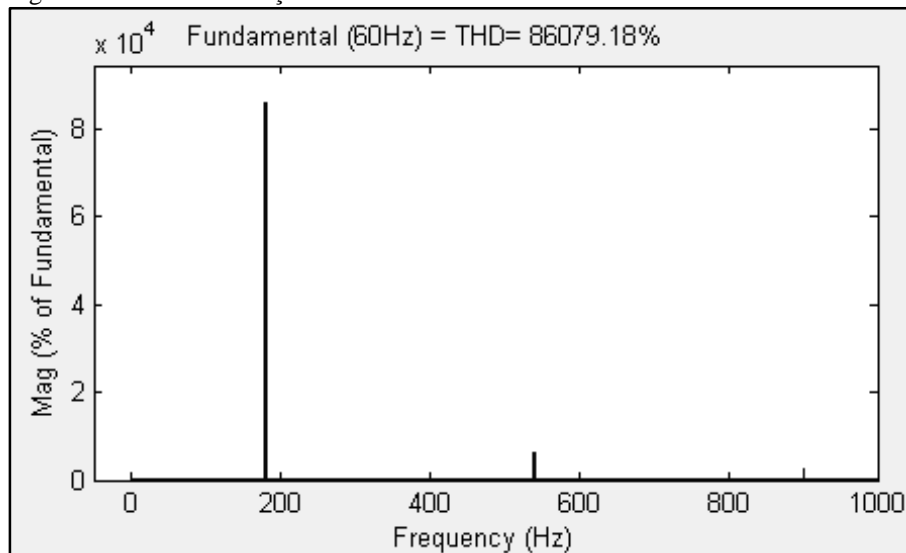
A TDHv é de 2,49% como mostra a Figura 24, e há um predomínio das harmônicas de 5ª, 7ª e 11ª.

Figura 24 – TDHv Situação II



Fonte: o autor.

Já a TDH<sub>in</sub> tem uma distorção de 86079,18%, pode-se considerar a corrente do neutro como uma corrente de ordem harmônica, com predominância das harmônicas da 3ª e 9ª ordem (Figura 25).

Figura 25 – TDH<sub>in</sub> Situação II

Fonte: o autor.

### 5.1.3 Situação III – Rede com microgeração 6,3 kW

Com a microgeração produzindo aproximados 6,3 kW, na referida Situação III, foram coletados as informações reproduzidas na Tabela 3.

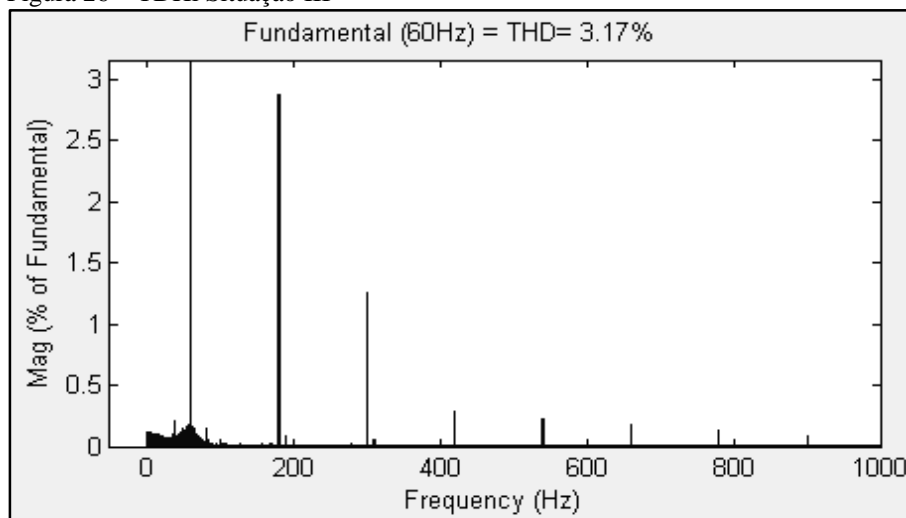
Tabela 3 – Dados coletados na Situação III

Potência ativa fornecida pelo trafo (W)	Potência reativa fornecida pelo trafo (VAr)	Potência aparente no trafo (VA)	Fator de potência (fp)	Perdas nos condutores da rede (W)	Corrent e neutro (A)
12940	28435	31241	0,4142	581	7,85

Fonte: o autor.

A TDHi para a Situação III é de 3,17%, e há predominância das harmônicas de 3ª e 5ª ordem (Figura 26).

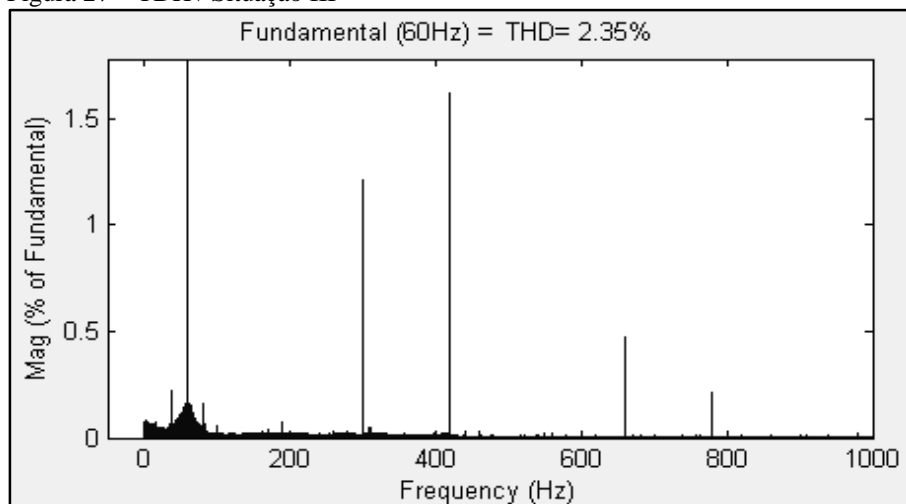
Figura 26 – TDHi Situação III



Fonte: o autor.

Já a TDHv é de 2,35% como mostra a Figura 27, com predomínio das harmônicas de 5ª, 7ª e 11ª.

Figura 27 – TDHv Situação III

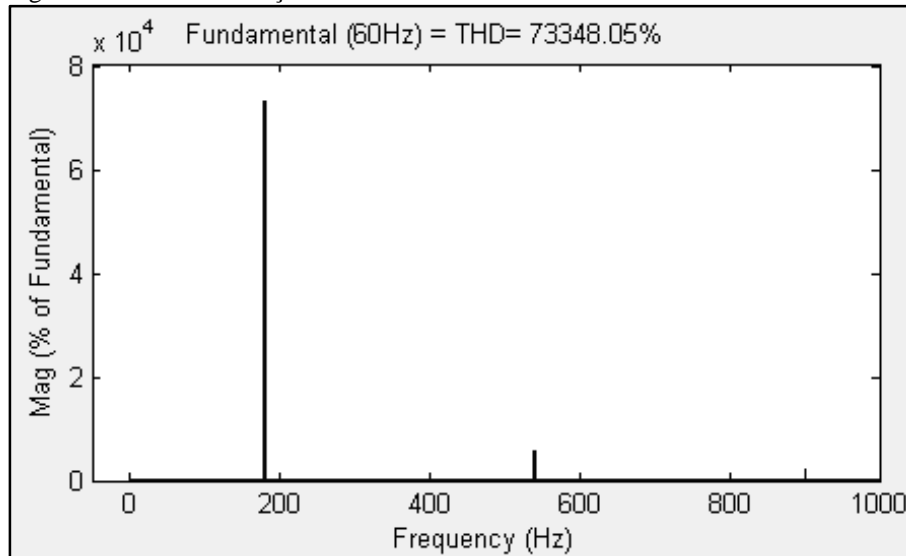


Fonte: o autor.



A Figura 28 ilustra a TDH<sub>in</sub> da Situação III que tem uma distorção de 73348,05%, a corrente do neutro é considerada como uma corrente de ordem harmônica, e há predominância das harmônicas da 3ª e 9ª ordem.

Figura 28 – TDH<sub>in</sub> Situação III



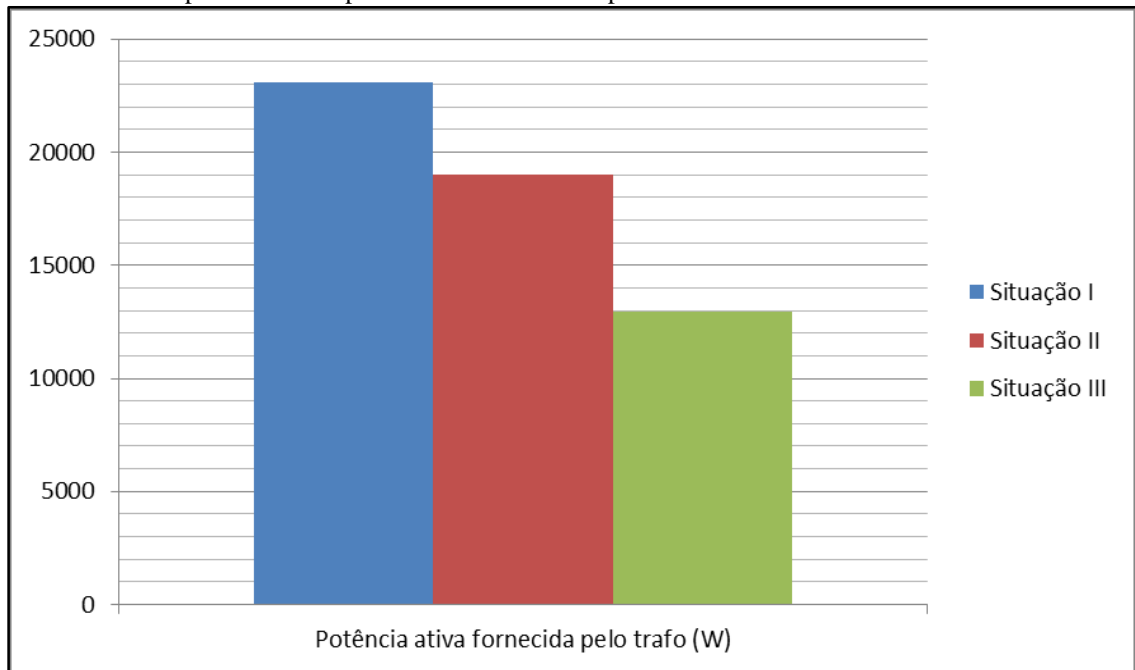
Fonte: o autor.

## 5.2 Resultados e discussão

Agora é feita uma comparação entre os dados coletados de cada situação simulada, através de gráficos. E é discutido o comportamento do sistema conforme os resultados que foram encontrados.

No Gráfico 1, é apresentado um comparativo entre os valores de potência ativa fornecida pelo trafo para cada situação. Onde é possível analisar que com injeção de potência pela microgeração fotovoltaica, a carga passa a ser suprida pela energia da fonte distribuída e então demanda de menos energia ativa provida da rede.

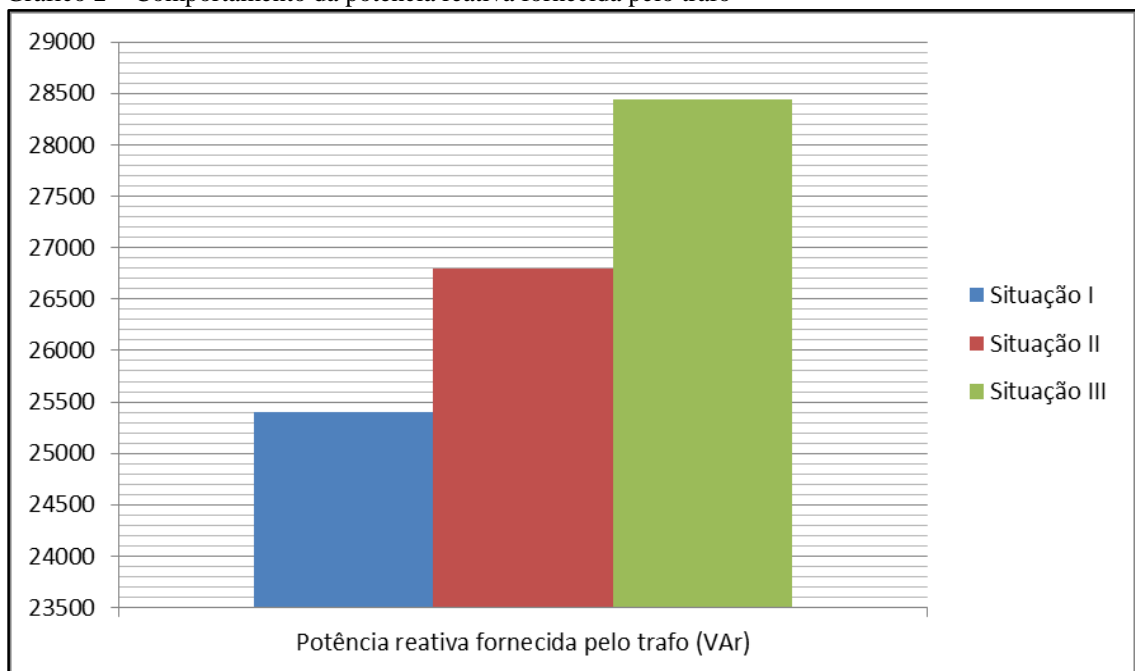
Gráfico 1 – Comportamento da potência ativa fornecida pelo trafo



Fonte: o autor.

Já o comportamento da potência reativa fornecida pelo trafo, com a inserção da geração distribuída, é de um leve aumento (Gráfico 2). Isso ocorre porque além da energia reativa já fornecida pelo trafo, há um pequeno aumento de energia indutiva na rede, por causa das características indutivas do microgerador.

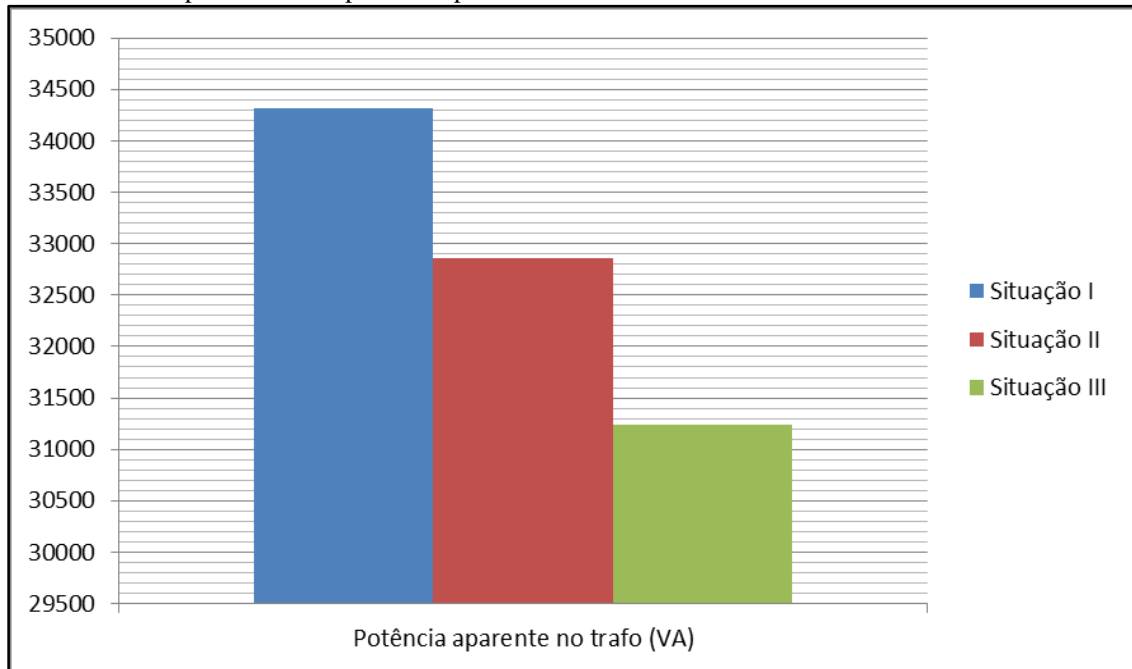
Gráfico 2 – Comportamento da potência reativa fornecida pelo trafo



Fonte: o autor.

No caso da potência aparente no transformador (Gráfico 3) acontece diminuição devido à presença do microgerador, o que é explicado em virtude da grande redução do consumo de potência ativa.

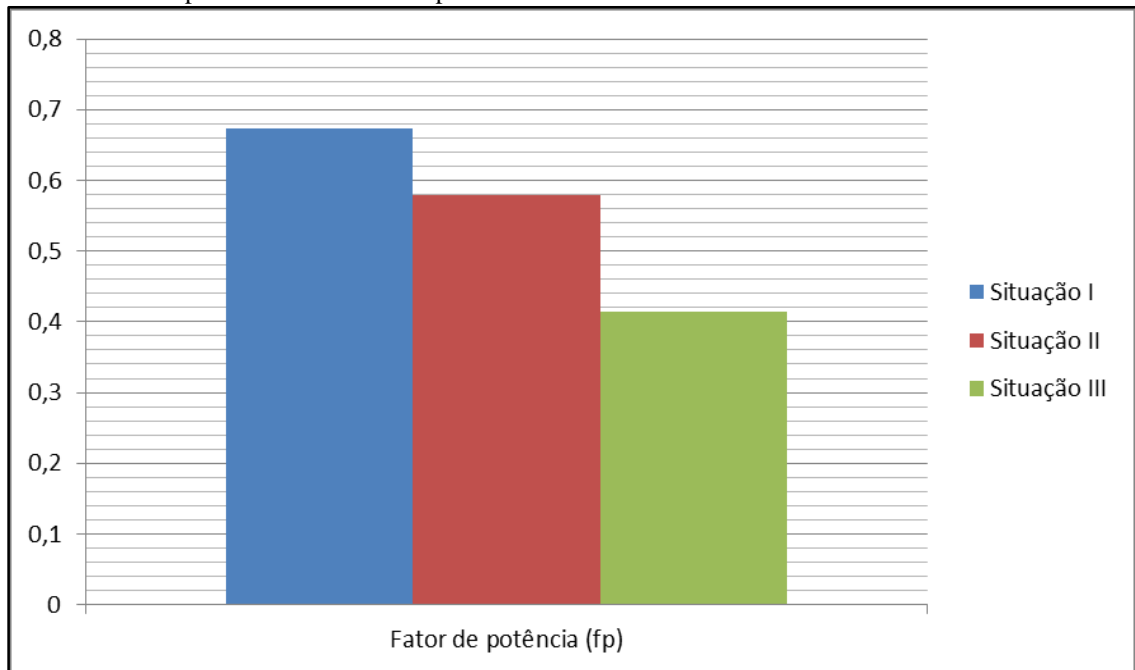
Gráfico 3 – Comportamento da potência aparente no trafo



Fonte: o autor.

Com o aumento da microgeração na rede acontece uma brusca queda do fator de potência, como ilustrado no Gráfico 4. Esse comportamento pode ser justificado pela Equação 12 já descrita anteriormente, pois a potência ativa tem uma queda acentuada enquanto a potência aparente tem uma queda branda. E o fator de potência expressa à relação entre elas. De outro modo pode-se dizer que a diminuição do fator de potência com a introdução da geração distribuída se deve ao aumento da energia reativa na rede e a menor potência ativa fornecida pelo trafo.

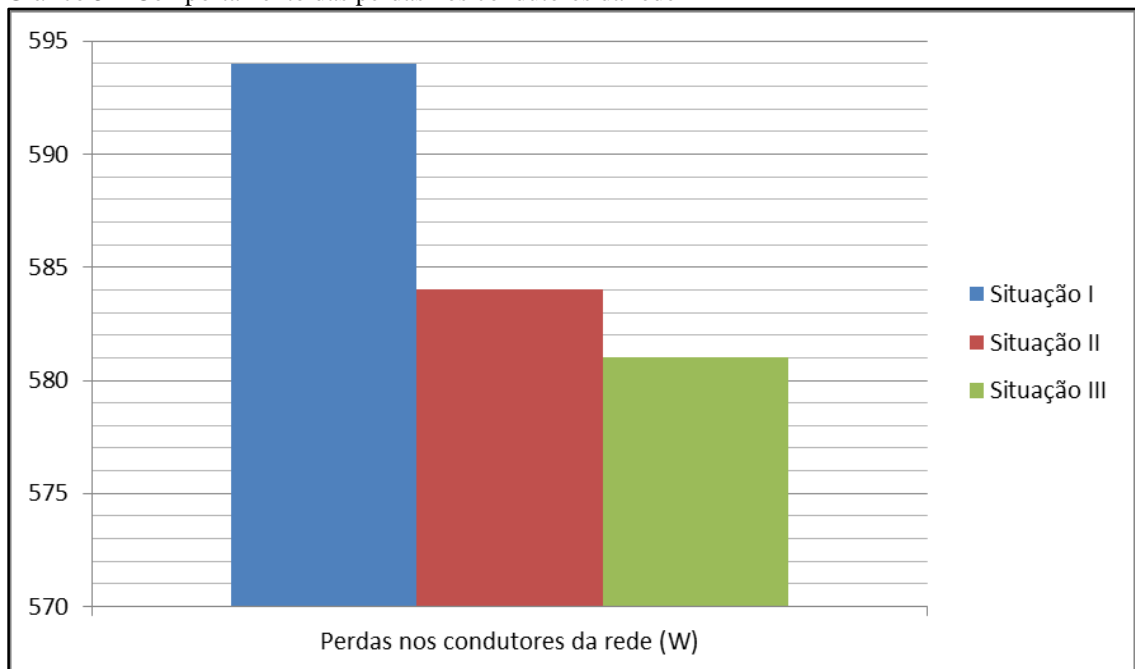
Gráfico 4 – Comportamento do fator de potência



Fonte: o autor.

Sobre as perdas nos condutores é observado um declínio, já que com o atendimento local à carga há menos energia ativa circulando nos cabos da rede, e conseqüentemente verifica-se uma redução de perdas pelo efeito Joule (Gráfico 5).

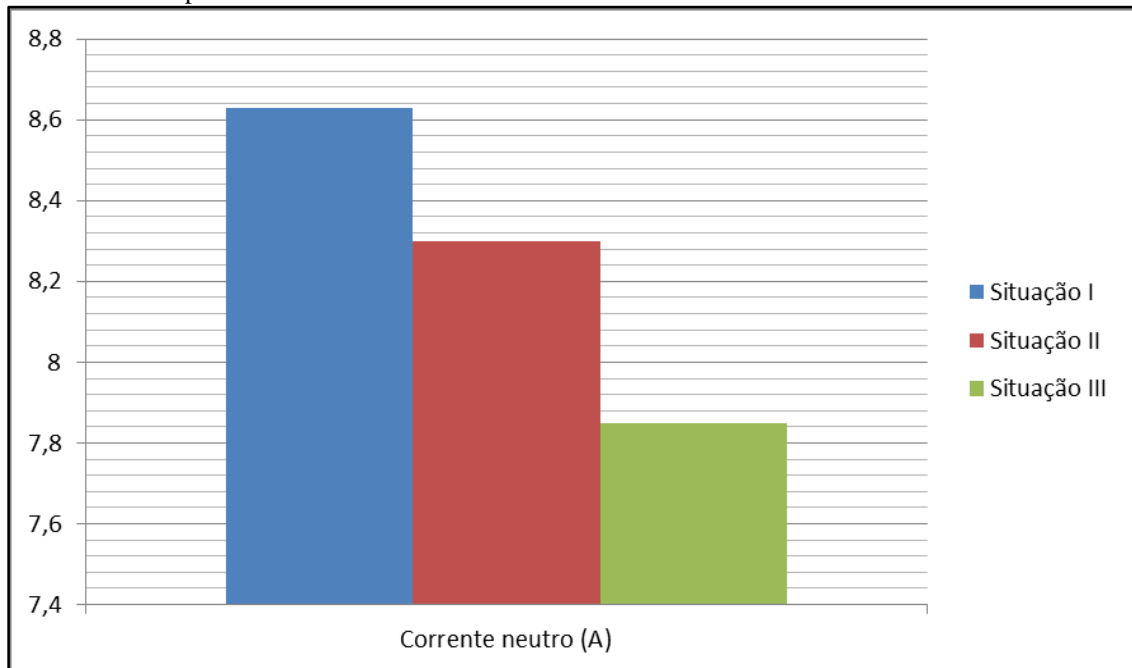
Gráfico 5 – Comportamento das perdas nos condutores da rede



Fonte: o autor.

A corrente no neutro tem um pequeno decréscimo ao injetar microgeração na rede, como mostra o Gráfico 6.

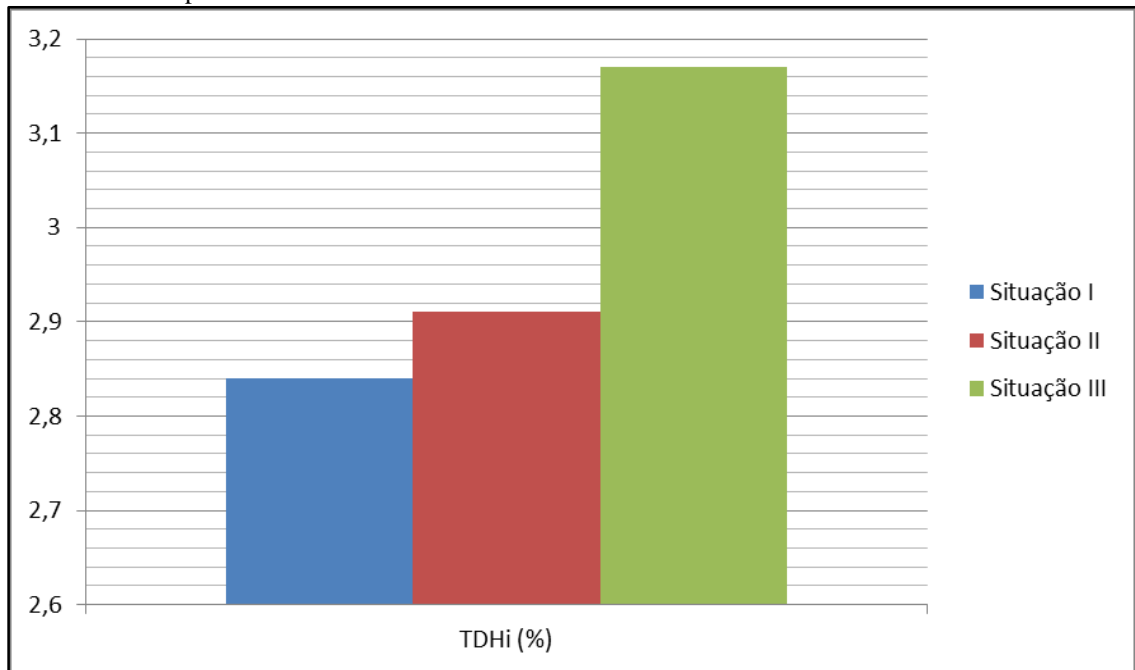
Gráfico 6 – Comportamento da corrente no neutro



Fonte: o autor.

A taxa percentual de distorção harmônica de corrente (TDHi) eleva com a integração do gerador distribuído na rede de baixa tensão (Gráfico 7). O que acontece devido à microgeração utilizar de dispositivos eletrônicos de potência, que possuem características não lineares, para adequar a eletricidade para introdução na rede.

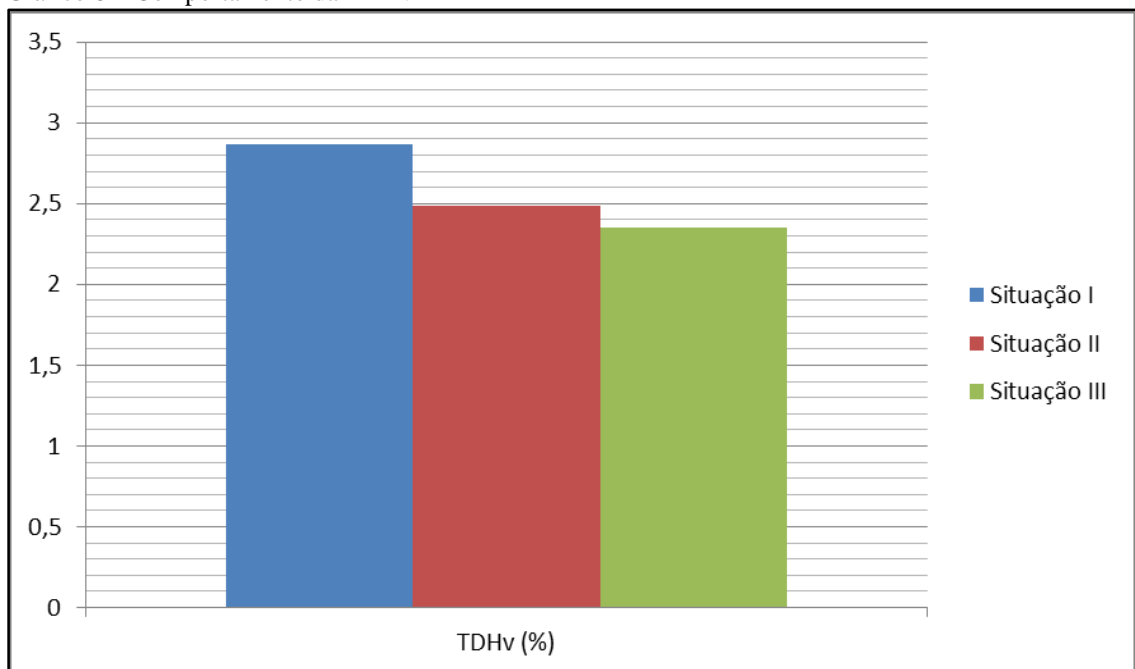
Gráfico 7 – Comportamento da TDHi



Fonte: o autor.

Apesar de o microgerador apresentar tais características não lineares, a taxa de distorção harmônica de tensão (TDHv) tem uma pequena queda com a sua conexão na rede (Gráfico 8).

Gráfico 8 – Comportamento da TDHv

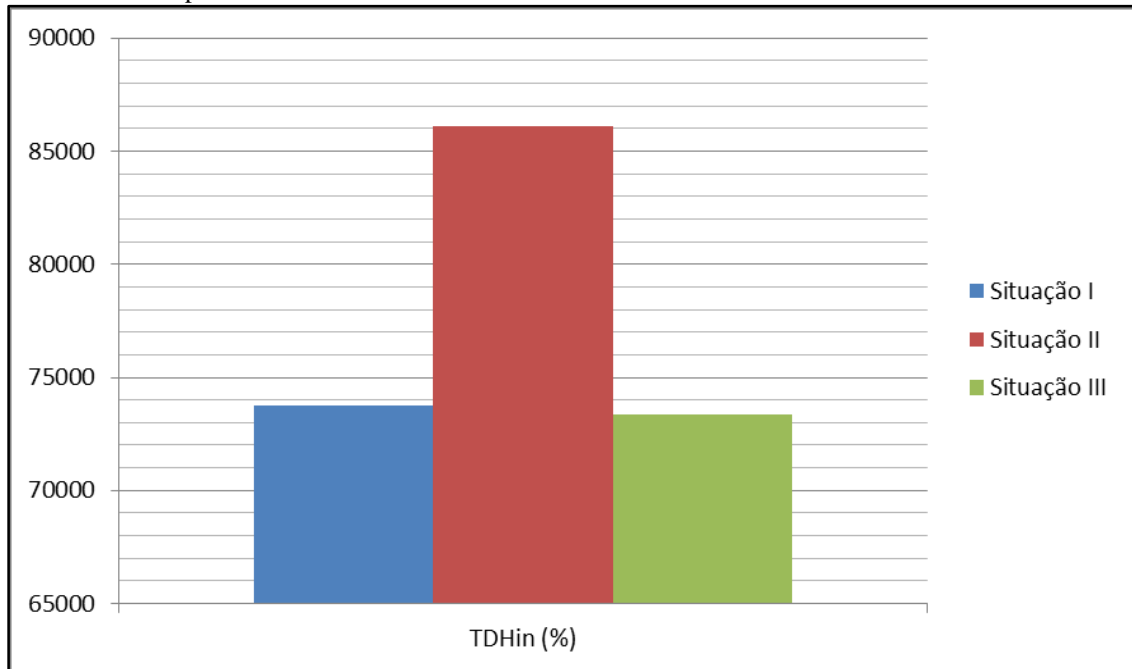


Fonte: o autor.

Por último é discutido o comportamento da taxa de distorção harmônica da corrente no neutro (TDHin), mostrado no Gráfico 9. A taxa eleva com a inserção do gerador distribuído,

porém demonstra uma redução quando há uma maior presença da microgeração. Apesar dessa variação da TDH<sub>in</sub>, a corrente que flui no neutro é considerada uma corrente de ordem harmônica, visto as altas taxas de distorção apresentadas em todas as situações estudadas.

Gráfico 9 – Comportamento da TDH<sub>in</sub>



Fonte: o autor.

Dentre os parâmetros analisados, os que se referem à qualidade da energia (distorção harmônica e fator de potência) devem obedecer a um determinado limite estipulado por regulamentação específica.

No caso do fator de potência, a ANEEL (2015) esclarece que este deve estar compreendido entre 0,92 e 1 indutivo ou 1 e 0,92 capacitivo. Na rede analisada é verificado um fator de potência indutivo fora do intervalo declarado em todas as situações estudadas.

Desse modo, a solução apontada é fazer um estudo para aplicar um meio de correção de fator de potência da rede, porém como o propósito deste trabalho é observar os impactos do acoplamento da microgeração fotovoltaica, o objetivo aqui é apenas demonstrar que com a injeção da geração distribuída de pequeno porte na rede, ocorre queda do fator de potência.

Já quanto à taxa total de distorção harmônica de tensão, a ANEEL (2015) através do Módulo 8 do PRODIST determina um limite máximo de 10% de distorção para barramentos de tensão nominal de até 1kV, conforme constatado no Quadro 1 do Anexo A deste trabalho.

Ao confrontar os valores de TDHv medidos com o limite estabelecido na norma, nota-se que no pior caso há uma taxa ainda inferior a 3%, ou seja, bem abaixo do máximo permitido, não atingindo valores preocupantes.

Quanto a distorção de corrente, o Módulo 8 da PRODIST não cita um nível limite aceitável. Por isso recorreu-se à norma IEEE Std 519 (1992), que de acordo com o Quadro 2 fixado no Anexo A deste trabalho, estabelece uma TDHi máxima através da relação da corrente de curto circuito ( $I_{CC}$ ) pela corrente da carga ( $I_L$ ), que para os níveis de tensão de 120 V a 69 KV, admite-se para o caso mais restrito uma taxa de até 5%, o que comparado aos valores encontrados nas simulações já é superior, independente da relação  $I_{CC}/I_L$  da rede estudada.

Por fim, a corrente no neutro é uma corrente de ordem harmônica, visto as elevadas taxas de distorção que apresenta.



## 6 CONCLUSÃO

Este trabalho investigou o comportamento de uma rede de baixa tensão com o acoplamento de microgeração fotovoltaica de energia, através do estudo de três situações de operação da rede diante da fonte microgeradora. Deste modo, conseguiu-se observar o comportamento da rede perante alguns dos parâmetros de qualidade da energia: taxa de distorção harmônica (TDH), tanto de corrente como de tensão, e fator de potência. Além de avaliar as perdas joule nos condutores, a corrente que flui pelo neutro e a injeção de potência pela rede.

A modelagem utilizada nas simulações buscou representar de maneira consistente uma rede de baixa tensão com características possíveis de serem encontradas em casos reais, e quanto ao modelo do microgerador fotovoltaico que foi adaptado de Saii (2013) pode-se afirmar que este demonstrou com credibilidade o desempenho de um sistema de geração solar.

Os resultados encontrados neste estudo denotam que com a microgeração introduzida na rede o sistema obteve melhoria no consumo de potência aparente, o que contribui para o conceito de eficiência energética. Fica nítido ainda o alívio de injeção de energia pelo transformador de distribuição, e com a conseqüente diminuição do carregamento da rede se reduz os desgastes dos componentes devido à sobrecarga.

Quanto às perdas nos condutores pelo efeito joule, aconteceu um decréscimo, que apesar de pequeno, é visto como outra vantagem do acoplamento da geração distribuída de pequeno porte. Houve também um aumento da distorção harmônica de corrente, porém a taxa não ultrapassa o limite estabelecido em norma, ou seja, apesar disso não ocorreram valores considerados preocupantes de distorção.

O parâmetro fator de potência teve uma grande queda com a introdução do microgerador, o que induz a necessidade de sua correção principalmente em linhas onde a presença da microgeração é fortemente notável.

Visto a significativa presença que a microgeração poderá ganhar principalmente nas redes BT num futuro próximo, durante o planejamento e expansão de redes é fundamental que as distribuidoras de energia considerem a microgeração como uma variável de interesse.

Este trabalho abordou um ponto específico deste tema tão amplo. Contudo o estudo do comportamento de uma rede de baixa tensão com microgerador acoplado, objetivo deste trabalho, contribui para embasar pesquisas mais aprofundadas relacionadas à área.

Para trabalhos futuros sugere-se em cima do mesmo tema, avaliar o comportamento da rede com a variação de outros parâmetros, como temperatura e irradiação do microgerador,

frequência de chaveamento do inversor e variação da carga, além de simular microgeração desbalanceada, observar a atuação do sistema fotovoltaico em conjunto com outras fontes alternativas e aplicar métodos de controle de potência.

Por fim pode-se afirmar que o Brasil tem um grande potencial para geração de energia elétrica de fonte fotovoltaica, porém carece de maiores investimentos e pesquisas na área, para que esta fonte alternativa atinja patamares até mesmo superiores aos encontrados em países europeus que apesar da baixa irradiação atualmente aproveitam melhor este recurso.

## REFERÊNCIAS

ANEEL. **Micro e minigeração distribuída: sistema de compensação de energia elétrica.** Cadernos temáticos ANEEL. Brasília: ANEEL, 2014.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 482/2012, de 17 de abril de 2012.** Estabelece as condições gerais para o acesso a microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Brasília: ANEEL, 2012.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 664/2015.** Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica. Brasília: ANEEL, 2015.

ARAMIZU, Juliana. **Modelagem e análise de desempenho de um sistema fotovoltaico em operação isolada e em paralelo com uma rede de distribuição de energia elétrica.** Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, USP, 2010.

ASSUNÇÃO, Alice Maria Cepeda da. **Integração de microgeração em larga escala nas redes de baixa tensão.** 2008. 94 f. Dissertação de mestrado – Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2008.

BARIN, Alexandre. **Metodologia para a análise dos efeitos da geração distribuída sobre as características operacionais dos sistemas de distribuição utilizando técnicas multicriteriais.** 2007. 112 f. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

BORGES, André. **Energia solar tem levado vantagem sobre eólica, 2015.** Disponível em: <<http://exame.abril.com.br/brasil/noticias/energia-solar-tem-levado-vantagem-sobre-eolica>>. Acesso em: 28 mai. 2016.

CELPE. **O que é eficiência energética.** Companhia Energética de Pernambuco, 2013. Disponível em: <<http://www.celpe.com.br/Pages/Eficiencia%20Energética/o-que-e-ef-energetica.aspx>>. Acesso em: 24 abr. 2016.

CEMIG. Requisitos para a conexão de acessantes ao sistema de distribuição Cemig – Conexão em baixa tensão. **Norma de Distribuição 5.30.** Belo Horizonte: CEMIG, 2012.

CEPEL. **Pesquisa do IEE aponta vantagens na microgeração fotovoltaica de energia.** Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, 2015. Disponível em: <[http://www.cresesb.cepel.br/app/index.php?section=com\\_news&cid=1711](http://www.cresesb.cepel.br/app/index.php?section=com_news&cid=1711)>. Acesso em: 04 jun. 2016.

ELETRAFO TRANSFORMADORES. **Catálogo Eletrafo transformador trifásico.** Disponível em: <[http://www.eletrafotransformadores.com.br/catalogos-pdf/catalogo\\_eletrafo\\_transformador\\_trifasico.pdf](http://www.eletrafotransformadores.com.br/catalogos-pdf/catalogo_eletrafo_transformador_trifasico.pdf)>. Acesso em: 03 ago. 2016.

FRIGO, Murilo Miceno. **Impacto da microgeração de energia elétrica em sistemas de distribuição de baixa tensão.** 2013. 103 f. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2013.

IEEE Std 519. **IEEE Recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems.** Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1992.

ITI. **Curve Application Note:** Technical Committee 3 (TC3) of the Information Technology Industry Council. [S.l.]: 2000. Disponível em: <<http://www.itic.org>>. Acesso em: 29 abr. 2016.

LOPES, Sérgio Alexandre Martins. **Avaliação de parâmetros de qualidade de energia em sistemas de microgeração.** 2011. 78 f. Dissertação de mestrado – Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2011.

MACEDO, Manuel João Gomes. **Análise da viabilidade técnica da ligação de matrizes de sistemas de microgeração FV à rede de distribuição.** 2012. 96 f. Dissertação de mestrado – Universidade da Beira Interior, Covilha, 2012.

MATOS, D. M. B.; CATALÃO, J. P. S. Geração distribuída e os seus impactos no funcionamento da rede elétrica. In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR, 2013, Covilha. **Parte 1.** Covilha: ICEUBI, 2013.

MEDEIROS, Rafael Barreto de. **Impactos da geração distribuída fotovoltaica na qualidade de energia em rede de distribuição de energia elétrica.** Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, UFC, 2014.

PADILHA, Lucas Nery. **Análise comparativa de estratégias para regulação de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica na presença de geradores distribuídos.** 2010. 142 f. Dissertação de mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

SADIKU, M. N. O. **Fundamentos de Circuitos Elétricos.** 5. ed., São Paulo: Bookman, 2013.

SAIL, Karthi. **Pvmotor.mdl:** solar panel connected with motor, 2013. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/42655-pv-motor>>. Acesso em: 23 set. 2016. Matlab 7.10 (R2010a).

SANTOS, Leandro Pereira dos et al. **Geração distribuída:** sistema de cogeração fotovoltaico conectado à rede elétrica de baixa tensão. Centro Universitário de Belo Horizonte. Belo Horizonte: UNIBH, 2013.

SCHNEIDER ELETRIC. **Qualidade de energia:** harmônicas, 2003. Disponível em: <<http://www.schneiderelectric.com.br/documents/cadernos-tecnicos/harmon.pdf>>. Acesso em: 30 abr. 2016.

SCHREIBER, Jonas Fernando. **Modelagem de um sistema de distribuição de energia considerando a aplicação em redes inteligentes (smart grids).** 2013. 127 f. Dissertação de mestrado – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2013.

SILVA, Filipe Miguel Marques da. **Impacto da microgeração na forma de onda da tensão da rede de distribuição.** 2009. 128 f. Dissertação de mestrado – Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2009.

SILVA, Larissa Zeid Marques. **Eletricidade no lar.** Universidade de São Paulo. São Carlos, USP, 2012.

SOUZA, José Renato C. R. de. **Apostila Introdução ao MATLAB aplicado à solução de problemas de engenharia elétrica.** Universidade Federal Fluminense. Niterói: UFF, 2012.

SOUZA, Marcio Eli Moreira de. **Inserção de microgeração distribuída nas redes de baixa tensão: implantação de telhados solares – estudo de caso real.** 2014. 119 f. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

SOLIDAL CONDUTORES ELÉTRICOS S.A. **Guia técnico.** 2007. Disponível em: <<http://www.solidal.pt/var/imagens/gerais/File/guiatecnico/guiatecnico.pdf>>. Acesso em: 05 ago. 2016.

TREVISAN, Aramis Schwanka. **Efeitos da geração distribuída em sistemas de distribuição de baixa tensão.** Departamento acadêmico de engenharia elétrica da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, UFPR, 2011.

VIEIRA, Lucas Terra et al. Programa computacional para a análise de parâmetros de linhas de distribuição. In: XVIII SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008, Olinda. **Distribuição de energia elétrica.** Olinda: SENDI, 2008.

## ANEXO A – Limites de TDHv e TDHi totais em percentual

O Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST trata da qualidade de energia (ANEEL, 2015), e na seção 4 onde é discutido sobre as harmônicas, é encontrado os valores de referência para as distorções totais de tensão. Estes valores de referência para distorções harmônicas totais de tensão são ilustrados no Quadro 1 abaixo.

Quadro 1 – Valores de referência globais das distorções harmônicas totais

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

Fonte: ANEEL, 2015.

O PRODIST não delimita valores para taxa total de distorção harmônica de corrente. Então, ao recorrer à norma IEEE Std 519 (1992), é encontrada a regulamentação para os níveis percentuais de distorção harmônica de corrente através da relação da corrente de curto circuito ( $I_{CC}$ ) pela corrente da carga ( $I_L$ ), que para os níveis de tensão de 120 V a 69 KV, apresentam os valores limites de distorção apontados no Quadro 2.

Quadro 2 – Limites de distorção harmônica de corrente para sistema de distribuição de 120 V a 69 KV

$I_{cc}/I_L$	$n < 11$	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$n > 35$	$TDH_{total}$
$< 20$	4,0%	2,0%	1,5%	0,6%	0,3%	5,0%
20 - 50	7,0%	3,5%	2,5%	1,0%	0,5%	8,0%
50 - 100	10,0%	4,5%	4,0%	1,5%	0,7%	12,0%
100 - 1000	12,0%	5,5%	5,0%	2,0%	1,0%	15,0%
$> 1000$	15,0%	7,0%	6,0%	2,5%	1,4%	20,0%

Fonte: IEEE Std 519, 1992.