

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
ESPECIALIZAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS**

**TELMA APARECIDA MENEGHETTE DOS SANTOS BASSAN**

**ANÁLISE DAS EQUAÇÕES DE EFICIÊNCIA DE INVERSORES  
FOTOVOLTAICOS ATRAVÉS DE COMPARATIVOS TEÓRICOS E  
PRÁTICOS**

**MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO**

**CURITIBA**

**2017**

**TELMA APARECIDA MENEGHETTE DOS SANTOS BASSAN**

**ANÁLISE DAS EQUAÇÕES DE EFICIÊNCIA DE INVERSORES  
FOTOVOLTAICOS ATRAVÉS DE COMPARATIVOS TEÓRICOS E  
PRÁTICOS**

Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em energias renováveis, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Jair Urbanetz Jr

**CURITIBA**

**2017**

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

TELMA APARECIDA MENEGHETTE DOS SANTOS BASSAN

### **ANÁLISE DAS EQUAÇÕES DE EFICIÊNCIA DE INVERSORES FOTOVOLTAICOS ATRAVÉS DE COMPARATIVOS TEÓRICOS E PRÁTICOS**

Esta Monografia de Especialização foi apresentada no dia 05 de julho de 2017, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Energia Renováveis – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. A aluna foi arguida pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Dr. Jair Urbanetz Junior

Coordenador de Curso de Especialização em Energias Renováveis

---

Prof. Romildo Alves dos Prazeres

Chefe do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica

#### **BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Jair Urbanetz Junior  
Orientador - UTFPR

---

Me. Juliana D'Angela Mariano  
Membro Externo

---

Prof. Esp. Carlos Henrique karam Salata  
UTFPR

O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso
---

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a minha família, pelo incentivo constante em meus estudos e por terem participado de minhas conquistas, em especial ao meu esposo por sempre me fortalecer nessa caminhada e ao meu irmão Walter por ter me inserido ao setor fotovoltaico.

Ao meu orientador, pelo apoio e exemplo como pesquisador e Mestre.

A todos, que diretamente ou indiretamente fizeram parte dessa caminhada, o meu muito obrigada.

## RESUMO

BASSAN, Telma Aparecida Meneghette Dos Santos. **Análise das equações de eficiência de inversores fotovoltaicos através de comparativos teóricos e práticos**. 2017. 48 pg. Monografia de Especialização em Energias Renováveis - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

A energia fotovoltaica tem se consolidado como elemento fundamental nas matrizes energéticas renováveis. Nações do primeiro mundo já possuem a energia solar como parte considerável do seu parque energético, porém no Brasil as iniciativas nesse sentido se encontram em estágio inicial, mas com grande perspectiva de crescimento nos próximos anos principalmente pela radiação solar incidente no país. Diante desse cenário, estudar as condições de implantação e principalmente de eficiência de conversão dos inversores, ponderando-se as particularidades da situação brasileira se faz pertinente principalmente no que diz respeito à tensão e radiação solar. Tomando-se por base os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica (SFCR), este estudo aborda três modelagens distintas para a eficiência baseada na radiação solar com referenciais distintos (Europa, Califórnia e Brasil) e a partir de dados coletados experimentalmente, avalia as respectivas fórmulas de cálculo e a aderência do comportamento de inversores comerciais diante dos referenciais acima descritos. Foram avaliados 3 modelos de inversores, aplicando as três equações de eficiência analisadas e verificando que um dos modelos sofre menor variação de eficiência mudando a tensão de entrada, e possui melhor rendimento tanto em baixos carregamentos quanto em altos. Nos resultados é evidenciado que a Europa possui como maior influência os baixos carregamentos e a Califórnia e o Brasil os carregamentos maiores e, confirmando assim que as eficiências dos inversores variam em cada localidade.

Palavras Chaves: Inversor Fotovoltaico; Energia Fotovoltaica; Eficiência de inversores Fotovoltaicos; Eficiência Brasileira de Inversores.

## ABSTRACT

BASSAN, Telma Aparecida Meneghette Dos Santos. **Analysis of the efficiency equations of photovoltaic inverters through theoretical and practical comparisons.** 2017. 48 pg. Renewable Energy Degree Specialization - Federal Technology University - Curitiba, Paraná, 2017.

Photovoltaic Energy is being considered a fundamental element when it comes to sustainable and clean energy. Developed countries already have solar energy as a considerable part of their energy mix. On the other hand, the actions in Brazil towards this topic are at early stage, but with an outstanding upcoming growth perspective in the next years due to proper solar radiation distribution in the country territory. In this scenario, it is relevant to study implementation conditions and photovoltaic inverter conversion efficiency considering both voltage and solar radiation for Brazilian particularities. Considering grid connected photovoltaic systems, this study evaluates three different models for efficiency based on solar radiation with distinct referentials (Europe, Canada and Brazil) and through experimental data, analyses the adherence of commercial photovoltaic inverters to the models described by the above mentioned referentials. In this process, three different inverter models were evaluated under three efficiency equations and it was verified that one of the devices efficiency suffers less from the change in the input voltage in both high and low loads. The results also confirm that inverter efficiency varies in each location (for example, European model is highly influenced by low loads and both Brazilian and American model are more likely to reflect high loads).

Key Words: Photovoltaic Inverter; Photovoltaic Energy; Inverter efficiency; Brazilian inverter efficiency.

## LISTA DE ACRÔNIMOS E SIGLAS

SFI	Sistemas Fotovoltaicos Isolados
SFCR	Sistemas Fotovoltaicos Conectados à rede
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
UV	Ultravioleta
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i>
SPMP	Seguidor do Ponto de Máxima Potência
CEC	<i>California Energy Commission</i>
SoDa	<i>Solar Radiation Project</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Configuração de um SFCR .....	12
Figura 2 – Configuração de um SFI .....	16
Figura 3 – Configuração de um sistema conectado à rede elétrica.....	17
Figura 4 – Esquema de isolamento galvânico em baixa frequência.....	21
Figura 5 – Esquema de isolamento galvânico em alta frequência .....	21
Figura 6 – Esquema sem isolamento galvânico .....	21
Figura 7 – Institutos parceiros do projeto SoDa .....	26
Figura 8– Estações cadastradas no projeto SoDa do Brasil .....	27
Figura 9: Distribuição de frequência da irradiância e participação na irradiância anual para a média nacional por faixas.....	28
Figura 10: Curva de eficiência Modelo 1 .....	32
Figura 11: Curva de eficiência Modelo 2 .....	32
Figura 12: Curva de eficiência Modelo 3 .....	33
Figura 13: Analisador de potência Yokogawa WT332E .....	34
Figura 14: Simulador fotovoltaico TerraSAS ETS 10kW .....	35
Figura 15: Curva de eficiência x carregamento - Modelo 1 .....	37
Figura 16: Curva de eficiência x carregamento - Modelo 2 .....	39
Figura 17: Curva de eficiência x carregamento - Modelo 3 .....	40
Figura 18: Comparativo eficiência tensão média com eficiência Brasileira - Modelo 1 .....	43
Figura 19: Comparativo eficiência tensão média com eficiência Brasileira - Modelo 2 .....	43
Figura 20: Comparativo eficiência tensão média com Eficiência Brasileira - Modelo 3 .....	44

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Vantagens e desvantagens de diferentes tipos de inversores .....	22
Tabela 2: Eficiência apresentada na folha de dados do Inversor Galvo 1,5.....	30
Tabela 3: Resultados de eficiência: carregamento x tensão Modelo 1 .....	36
Tabela 4: Eficiência média por carregamento Modelo 1 .....	37
Tabela 5: Resultados de eficiência: carregamento x tensão Modelo 2 .....	38
Tabela 6: Eficiência média por carregamento Modelo 2 .....	38
Tabela 7: Resultados de eficiência: carregamento x tensão Modelo 3 .....	39
Tabela 8: Eficiência média por carregamento Modelo 3 .....	40
Tabela 9: Comparativo dos coeficientes por carregamento .....	41
Tabela 10: Comparativo das eficiências entre os modelos .....	42

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
1.1 TEMA .....	11
1.1.1 Delimitação do Tema .....	12
1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS .....	13
1.3 OBJETIVOS .....	14
1.3.1 Objetivo Geral .....	14
1.3.2 Objetivos Específicos .....	14
1.4 JUSTIFICATIVA .....	14
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>15</b>
2.1 SISTEMA FOTOVOLTAICO .....	15
2.1.1 Componentes .....	17
2.2 EFICIÊNCIA DOS INVERSORES FOTOVOLTAICOS .....	23
2.2.1 Eficiência Brasileira .....	25
<b>3 APLICAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>30</b>
3.1 CALCULOS DA EFICIÊNCIA EUROPEIA E EFICIÊNCIA CALIFORNIANA: ...	31
3.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS: .....	34
3.3 RESULTADOS PRÁTICOS: .....	35
3.4 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS: .....	41
<b>4 CONCLUSÕES</b> .....	<b>45</b>
<b>5 REFERÊNCIAS</b> .....	<b>47</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A energia fotovoltaica vem tomando um papel muito importante na sociedade atual. Visto a grande necessidade de implementação de sustentabilidade e energia limpa nas cidades os estudos na área vem se aprofundando no Brasil.

O Brasil possui uma grande participação de fontes renováveis em sua matriz energética, tendo como principal fonte as usinas hidráulicas. Desde o ano de 2014 o Brasil tem sofrido um grande impacto energético devido à redução de reservatórios nas hidrelétricas no país. Essa situação fez com que a população percebesse que a energia hidrelétrica pode também entrar em escassez, trazendo a necessidade de pesquisas e implementações de geração em novas áreas.

Como alternativa da crise hídrica a geração distribuída ganhou um grande destaque. Segundo Zilles (2012), a geração distribuída é entendida pelos setores energéticos mundiais como produção energética próxima ao consumo. Embora seja um conceito que ganhou destaque recentemente, trata-se de uma forma de geração energética que foi bastante comum e que chegou a ser regra desde o início da industrialização até a primeira metade do século XX. Essa forma de geração é uma contraposição à geração centralizada de energia.

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (2016), desde 2013 a participação de renováveis na matriz energética nacional vem aumentando mesmo tendo diminuído a participação da geração hidráulica. Em 2015, a geração distribuída atingiu 34,9GWh com uma potência instalada de 16,5MW, com destaque para a fonte solar fotovoltaica com 13,3MW de potência instalada. Até o mês de maio de 2017, esse número já havia crescido para aproximadamente 82MW em geração distribuída e 23,7MW em Central geradora fotovoltaica, totalizando 105,7MW de geração energética proveniente da energia fotovoltaica. Um crescimento de 694% de 2015 para maio de 2017, um número expressivo e que aponta a aderência nacional para essa fonte renovável.

Segundo o Ministério de Minas e Energia (2013), a energia solar no território brasileiro tem elevado potencial para sua conversão em energia elétrica, com irradiação global média anual entre 1.200 e 2.400 kWh/m<sup>2</sup>/ano. Para efeito de comparação, nos países europeus que mais exploram esta fonte, como Alemanha e

Espanha, os valores variam, respectivamente, nas faixas 900-1.250 e 1.200-1.850 kWh/m<sup>2</sup>/ano.

A energia solar pode ser aproveitada tanto em tecnologias térmicas quanto em tecnologias fotovoltaicas, sendo que ambos são sistemas de baixo impacto ambiental. Este trabalho terá um aprofundamento em energia fotovoltaica, a qual é obtida através da conversão direta da luz em eletricidade, realizado por meio do efeito fotovoltaico.

Os sistemas fotovoltaicos podem ser aplicados desde micro geração distribuída até usinas de grande porte, fazendo com que possa ser utilizado em meios urbanos, atendendo diretamente ao consumidor final da energia elétrica. Essa característica faz com que o interesse pela energia fotovoltaica pela sociedade aumente, visto que com essa tecnologia o próprio consumidor pode controlar sua redução de gastos com energia elétrica.

O Brasil é um país com um grande potencial fotovoltaico, com características gerais que favorecem a tecnologia e principalmente com um crescimento visível de interesse no setor. Com isso, vê-se a necessidade do aprofundamento de estudos, fazendo com que cada vez mais surjam adaptações de pesquisas à realidade nacional, promovendo dessa forma o melhor aproveitamento dos sistemas.

## 1.1 TEMA

A utilização da conversão fotovoltaica na sua forma atual iniciou-se em 1954. Após sua descoberta, ela foi utilizada como principal fonte de energia elétrica em aplicações espaciais até chegar às aplicações terrestres em meados da década de 60. Apenas a partir da década de 90 que um sistema fotovoltaico começou a se tornar viável economicamente e ser utilizado em cidades.

Podem-se dividir os sistemas fotovoltaicos em dois grupos: os isolados (SFI) e os conectados à rede (SFCR). Os primeiros são normalmente instalados em locais sem acesso à rede elétrica, e necessitam de um elemento armazenador de energia, como baterias. Já os SFCR são vistos como uma forma de geração distribuída ao longo dos alimentadores da rede elétrica de distribuição, em baixa ou média tensão, e contribuem para disponibilizar a energia próxima ao ponto de consumo.

A partir de 01 de março de 2016 entrou em vigor novas regras para a geração de energia elétrica distribuída (ANEEL, 2017). A Agência Nacional de Energia Elétrica

– ANEEL aprovou revisões de resoluções antigas que agora incentivam a geração distribuída auxiliando dessa forma a utilização de energia fotovoltaica em residências, comércios e indústrias. O uso de painéis fotovoltaicos é bastante comum em outros países e já está regulamentado no Brasil desde 2012.

As alterações estabelecidas oferecem facilidades e incentivos ao consumidor para que ele possa ter o controle de sua fatura de energia, podendo possuir sua própria geração.

### 1.1.1 Delimitação do Tema

Vários são os equipamentos responsáveis pelo funcionamento de um sistema fotovoltaico, entre eles módulos fotovoltaicos, inversor fotovoltaico, cabos, conectores e proteções conforme é ilustrado na Figura 1. Todos os elementos devem ser dimensionados de forma correta para melhor eficiência do sistema.



*Figura 1 – Elementos de um SFCR  
Fonte: Elaboração própria*

Para avaliar o rendimento de cada elemento são necessários conhecimentos técnicos dos equipamentos e também de características do local de instalação do sistema, isso é necessário visto que cada instalação possui características particulares.

O inversor fotovoltaico, que será o elemento que terá maior aprofundamento nesse trabalho, é um equipamento que converte a corrente contínua proveniente do arranjo fotovoltaico em corrente alternada que será injetada na rede elétrica da unidade consumidora. Desde o surgimento desse equipamento o desenvolvimento da tecnologia eletrônica de potência vem permitindo um aumento na eficiência notável na conversão CC-CA, conjuntamente com o aumento de confiabilidade e redução de custos.

Esse trabalho tem o intuito de apresentar as características específicas dos inversores fotovoltaicos, trazendo um levantamento das diferenças que o inversor sofre de acordo com a localidade de instalação, comparando estudos teóricos já apresentados em outros trabalhos, fazendo junto um levantamento prático de equipamentos utilizados no Brasil.

## 1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

A eficiência de conversão CC-CA de inversores não possui um valor constante, pois apresenta uma dependência em relação ao nível de carregamento. O nível de carregamento varia de acordo com a variação de irradiância solar e temperatura as quais o gerador fotovoltaico está submetido.

Segundo a norma brasileira ABNT NBR 10899 de 2013, irradiância solar é a taxa na qual a radiação solar incide em uma superfície, por unidade de área desta superfície, normalmente medida em watt por metro quadrado ( $W/m^2$ ).

O termo radiação solar é utilizado de forma genérica e pode ser referenciado em termos de fluxo de potência, quando é especificamente denominado de irradiância solar, ou em termos de energia por unidade de área, denominado então de irradiação solar (PINHO; GALDINO, 2012).

Como a irradiância é um fator com grande peso para definir a eficiência de um inversor e cada localidade no globo possui uma característica específica, caracterizar uma única equação de eficiência de inversores para o mundo todo seria aceitar erros notáveis aos resultados.

Atualmente foram adotadas uma equação de eficiência Europeia e uma equação Californiana, definida pela Comissão Californiana de Energia (CEC). Essas equações normalmente são utilizadas para avaliar os inversores do mercado.

Em 2011, pesquisadores da Universidade de São Paulo, fizeram uma análise do perfil de radiação solar no Brasil (ALMEIDA, 2011) e com isso apresentaram uma sugestão de equação para a eficiência Brasileira, levando em consideração as características específicas da região.

Essa equação ainda não está comprovada e necessita de mais estudos e experimentos para se tornar uma equação oficial da eficiência brasileira.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo Geral

Fazer comparativos teóricos e práticos das equações de análise da eficiência de inversores já existentes, apresentando as características da eficiência europeia, da eficiência Californiana e comparando com a equação sugerida para a eficiência Brasileira.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Apresentar um referencial teórico sobre os elementos pertencentes a um sistema fotovoltaico, exemplificando os pontos de maior influência na eficiência do sistema e levantando uma base teórica para avaliar a eficiência do mesmo.
- Levantar as informações da equação Europeia, da equação Californiana e da equação sugerida como Brasileira, apresentando as diferenças entre elas.
- Aplicar as três equações a modelos de inversores de mercado, analisando os resultados e levantando quais as melhores características de inversores para cada localidade.

## 1.4 JUSTIFICATIVA

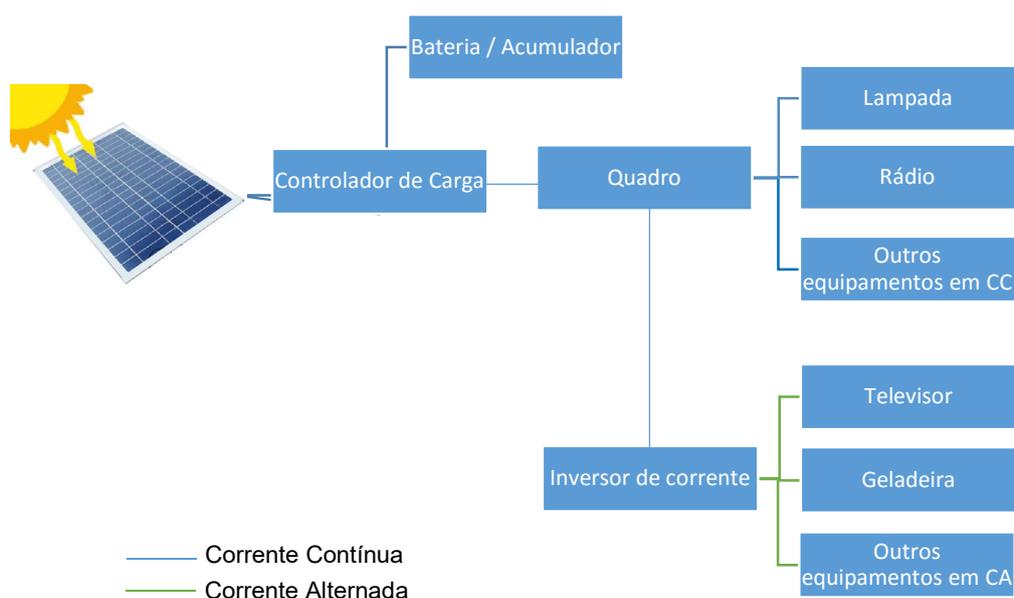
O Mercado nacional de energia fotovoltaica vem crescendo de forma significativa nos últimos anos e para poder garantir sistemas de qualidade e eficientes é necessário que todos os elementos do sistema sejam avaliados com as características locais. Para que isso ocorra, será necessária comprovação da equação de eficiência brasileira de inversores, pois os rendimentos dos equipamentos conversores dos sistemas dependem diretamente dessa equação. O trabalho servirá como um processo comparativo para apontar se a equação sugerida está se encaixando com a realidade dos inversores existentes em mercado.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 SISTEMA FOTOVOLTAICO

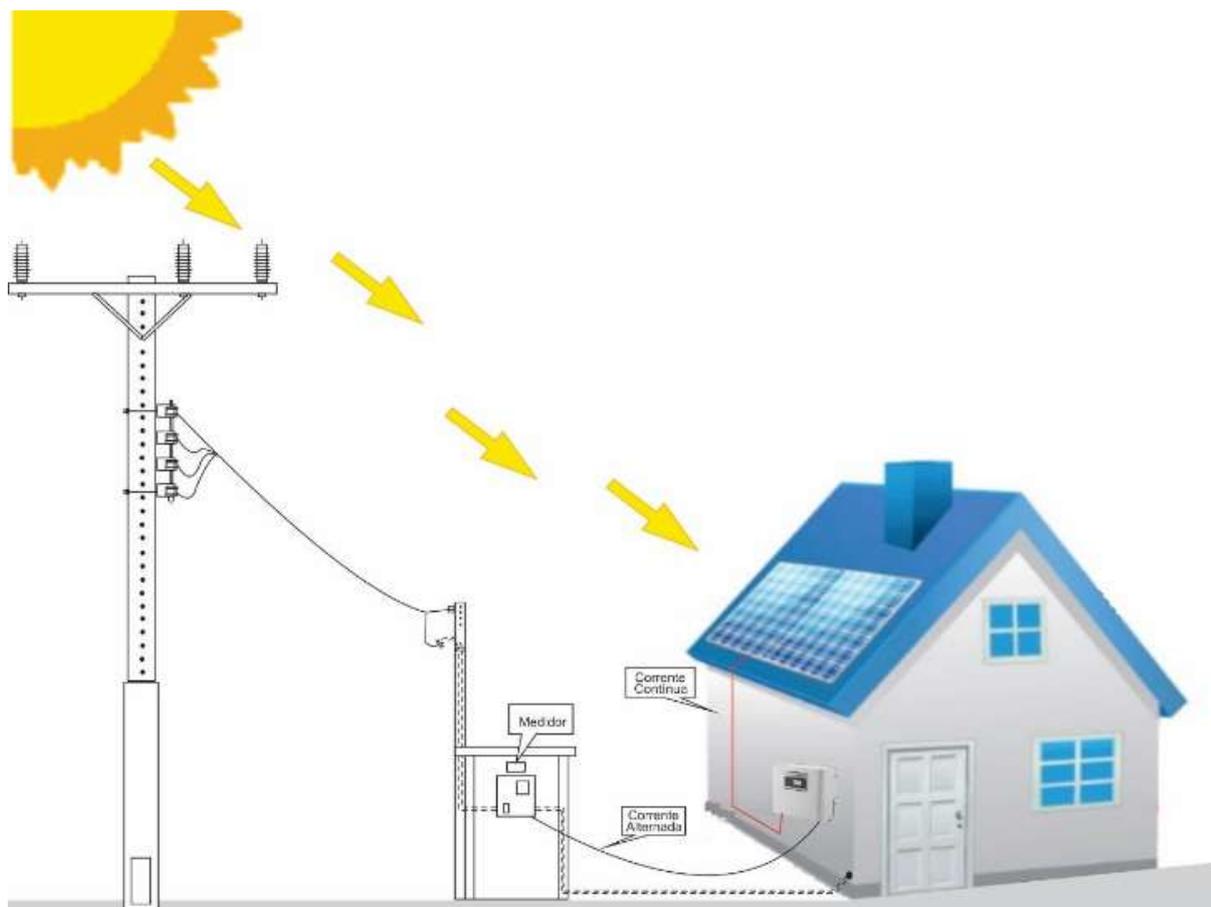
A superfície da terra recebe diariamente uma energia vinda do sol que poderia satisfazer a demanda de todos os habitantes do planeta durante um ano (RUTHER, 2004). Uma das formas de aproveitar esse grande potencial energético é através da energia fotovoltaica. O aproveitamento da energia fotovoltaica pode ser feito através de dois diferentes sistemas, o SFI ou o SFCR.

A principal característica dos sistemas isolados é o armazenamento de energia. Segundo Pinho e Galdino (2014), o uso de dispositivos de armazenamento de energia faz-se necessário para atender a demanda em períodos nos quais a geração é nula ou insuficiente. Assim, parte da energia solar convertida em energia elétrica pelos módulos fotovoltaicos durante o dia é armazenada para ser utilizada em outros momentos para atender a demanda. Esse sistema capta a radiação solar, transforma em corrente contínua e armazena essa energia para utilizar em equipamentos ou até uma rede específica. Na Figura 2 é ilustrado um SFI que abastece equipamentos específicos. Nela pode-se observar que o módulo fotovoltaico capta a radiação solar e através do efeito fotovoltaico transforma essa radiação em energia elétrica, fazendo a transferência dessa energia elétrica para um controlador de carga. Esse controlador de carga recebe a corrente contínua vinda do módulo e a armazena em baterias pré-dimensionadas. A corrente contínua armazenada nas baterias pode ser utilizada tanto em equipamentos que suportam corrente contínua quanto em equipamentos em corrente alternada, desde que essa energia passe por um inversor antes de ser entregue.



*Figura 2 – Configuração de um SFI  
Fonte: Elaboração própria*

Outra forma de utilização da energia fotovoltaica seria através de um SFCR. Esse tipo de sistema possui o mesmo princípio de funcionamento do SFI, mas ele não possui armazenamento, isto é, toda a geração é imediatamente injetada na rede elétrica da unidade consumidora. Nesse formato há apenas a utilização da energia na forma de corrente alternada. Na Figura 3 é ilustrado o SFCR.



*Figura 3 – Configuração de um SFCR  
Fonte: Elaboração própria*

### 2.1.1 Componentes

Um gerador fotovoltaico pode ser representado pela junção de elementos chave para seu funcionamento. Para melhor entendimento é favorável dividir esses elementos em três grupos diferentes: gerador, cabeamento e conversão/controle.

Serão apresentados agora os principais elementos com suas características básicas, para em seguida ter um estudo mais aprofundado do elemento principal para este trabalho, o Inversor Fotovoltaico.

### 2.1.1.1 Gerador

O grupo gerador é formado pelos módulos fotovoltaicos, suas caixas de conexão e suas proteções.

Segundo Pinho e Galdino (2014), o módulo fotovoltaico é a unidade básica do gerador fotovoltaico e é formado por um conjunto de células solares, interligadas eletricamente e encapsuladas, com objetivo de gerar energia elétrica.

Edmond Becquerel relatou o efeito fotovoltaico em 1839, quando nos extremos de uma estrutura de matéria semicondutora surge o aparecimento de uma diferença de potencial elétrico, devido à incidência de luz. No processo de conversão da energia radiante em energia elétrica a célula é a unidade fundamental (NASCIMENTO, 2004).

Ainda segundo Nascimento (2004), o silício é o segundo elemento mais abundante no globo terrestre. Em 1993 a produção de células fotovoltaicas atingiu a marca de 60 MWp, já em 2016, esta produção chegou a cerca de 70 GWp. O silício é explorado sob diversas formas: monocristalino, policristalino e amorfo. Outros materiais alternativos estão sendo testados para essa aplicação, como exemplo as células de filmes finos, em que seu processo de fabricação requer menor custo, porém sua eficiência energética é baixa se comparada com as de silício convencional. Mas sua aplicação é melhor em equipamentos de baixo consumo.

A eficiência de uma célula fotovoltaica comum no mercado pode variar de 2% a 17%, mas existem atualmente células em estudo que podem ultrapassar os 27% de eficiência, essas possuem ainda um elevado custo para produção.

### 2.1.1.2 Cabeamento:

O grupo de cabeamento é composto basicamente pelos condutores elétricos da instalação. A importância desse bloco está no seu correto dimensionamento, visto que pode apresentar uma redução importante das perdas de energia do sistema, assim como se sobre dimensionados podem apresentar uma elevação no custo do sistema.

Um gerador fotovoltaico recebe diariamente a variação de temperatura e intemperes. Os cabos indicados para a instalação de um sistema fotovoltaico precisam ter a proteção a esses fatores, evitando sua degradação antes dos outros

elementos. Atualmente no mercado utilizam tanto canaletas para proteger esses cabos quanto cabos que já vem com proteção ultravioleta - UV.

### 2.1.1.3 Conversão / Controle:

O módulo fotovoltaico gera energia em corrente contínua, visto que a energia elétrica da rede elétrica é em corrente alternada precisa-se de um equipamento que faça essa conversão, e essa é a função principal de um inversor fotovoltaico. Logo o inversor é um conversor CC-CA que deve sincronizar a corrente alternada gerada com a rede elétrica em que ele está conectado.

As partes fundamentais de um inversor são:

- Controle principal: Nesse processo encontram-se os elementos de controle geral, os sistemas de geração de onda baseados em sistemas de modulação de largura de pulsos (PWM) e parte do sistema de proteções;
- Etapa de Potência: A escolha da forma utilizada na etapa de potência é muito importante para definir a confiabilidade e custos do equipamento. Ela pode ser única modular, baixa ou alta frequência.
- Controle de rede: é a interface entre a rede elétrica e o controle principal. É onde se proporciona o correto funcionamento do sistema ao sincronizar a forma de onda gerada com a forma de onda da rede elétrica, ajustando tensão, fase, sincronismo entre outras proteções exigidas para uma boa qualidade de energia entregue.
- Seguidor do ponto de máxima potência (SPMP): é um dos fatores mais importantes em um inversor. Sua função é ajustar a entrada do inversor aos valores de potência variáveis que o gerador produz, obtendo em todo momento a maior quantidade de energia disponível, a máxima potência. Segundo Urbanetz (2010) o valor da máxima potência varia continuamente em função da irradiância e da temperatura. Portanto, sistemas que também de modo contínuo busquem colocar os módulos FV para operar em MPP melhoram o desempenho do sistema FV. Nos SFCR, o inversor normalmente já possui essa função incorporada
- Proteções: De maneira geral, os inversores precisam estar protegidos de sobre/sub tensão, sobre/sub frequência, temperaturas baixas ou elevadas,

tensão baixa do gerador, anti-ilhamento, entre outras proteções exigidas por lei para que a energia injetada na rede não interfira na qualidade de energia da mesma e nem que a energia vinda da concessionária danifique o equipamento.

Os principais parâmetros a serem analisados de um inversor são:

- a) **Tensão nominal (V):** Tensão nominal da rede elétrica em que o inversor deve ser conectado. Esse parâmetro deve ser respeitado visto que no Brasil as concessionárias podem ter uma variação de entrega dessa tensão e o inversor deve suportar essa variação. Caso seja instalado em uma tensão fora da nominal pode gerar desligamentos desnecessários do sistema reduzindo o rendimento total.
- b) **Potência nominal (VA):** Potência que o inversor fornece de forma continuada;
- c) **Potência ativa (W):** Potência real que o inversor fornece tendo em conta a entrega de tensão e corrente.
- d) **Capacidade de sobrecarga:** Capacidade do inversor de fornecer uma potência superior a nominal e tempo que pode manter essa situação;
- e) **Fator de Potência:** Coeficiente entre potência ativa e potência aparente da saída do inversor. No Brasil, Inversores de até 3kWp devem ter fator de potência fixados em 1, acima dessa potência pode variar entre 0,95 capacitivo e 0,95 indutivo.
- f) **Eficiência:** Relação entre as potências de saída e entrada do inversor;
- g) **Autoconsumo:** É a potência consumida pelo inversor comparada com a potência nominal de saída;
- h) **Distorção Harmônica:** a distorção harmônica total, o THD (*Total Harmonic Distortion*) é o parâmetro que indica a porcentagem de conteúdo harmônico da onda de tensão da saída do inversor. Esse parâmetro influencia diretamente na qualidade de energia entregue para a rede elétrica;
- i) **Número de fases:** O inversor pode ser monofásico (fase/fase ou fase/neutro) ou trifásico. Esse parâmetro está muito ligado à potência nominal do inversor, visto que dificilmente serão encontrados no mercado inversores abaixo de 5kW trifásicos, nem acima dessa potência monofásicos;

j) **Topologia interna:** Segundo Ballesteros (2012), a topologia interna de um inversor pode adotar três distintos sistemas de isolamento entre a parte contínua e a alternada. São estes:

- Isolamento galvânico em baixa frequência;

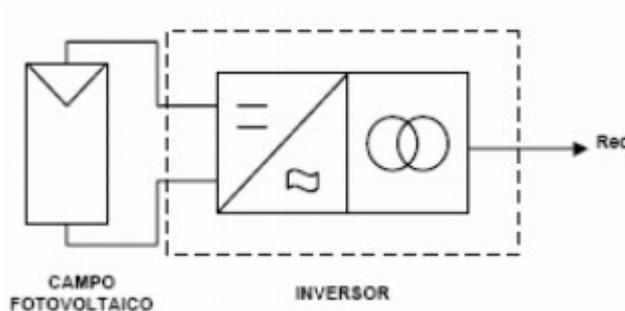


Figura 4 – Esquema de isolamento galvânico em baixa frequência  
Fonte: Adaptado de Ballesteros (2012)

- Isolamento galvânico em alta frequência;

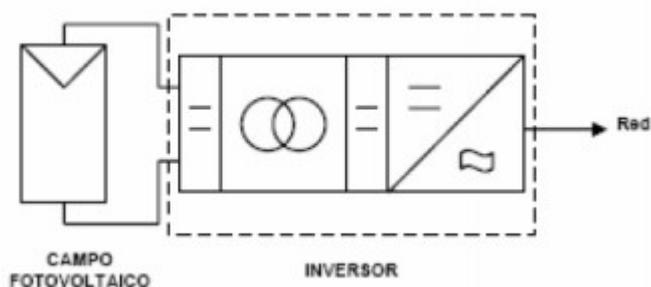


Figura 5 – Esquema de isolamento galvânico em alta frequência  
Fonte: Adaptado de Ballesteros (2012)

- Sem isolamento galvânico:

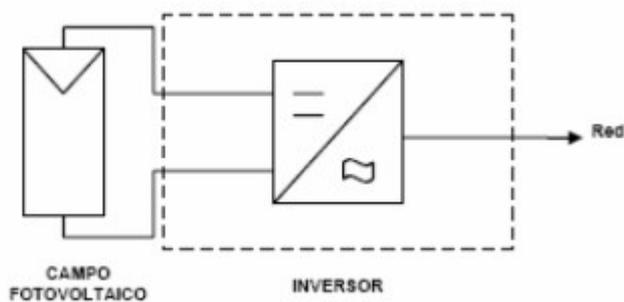


Figura 6 – Esquema sem isolamento galvânico  
Fonte: Adaptado de Ballesteros (2012)

Cada topologia possui características específicas, apresentando vantagens e desvantagens quando comparadas entre si. Segundo Rampinelli (2010),

no princípio eram utilizados transformadores na saída dos inversores, pois as saídas possuíam baixa tensão por questões de segurança. No entanto, os transformadores além de pesados e caros, sempre foram obstáculos para os fabricantes conseguirem aumentar a eficiência de seus equipamentos (RAMPINELLI, 2010). Visto essa barreira houve o desenvolvimento da tecnologia para que os inversores trabalhassem em tensões maiores não necessitando mais dos transformadores, aumentando notavelmente a eficiência do sistema. Porém a utilização de inversores sem transformador depende da regulamentação do local de instalação da planta, existem países que exigem o isolamento galvânico entre o lado de corrente contínua e o de corrente alternada. É necessário também utilizar o isolamento galvânico em certos tipos de módulos fotovoltaicos, filmes finos, por exemplo, caso não possua o isolamento galvânico surge um potencial capaz de provocar uma corrosão e desgaste precoce das células.

Na Tabela 1 são apresentadas algumas diferenças entre as topologias citadas, pode-se observar que o Inversor sem transformador além de aumentar a eficiência reduz o tamanho e peso.

*Tabela 1: Vantagens e desvantagens de diferentes tipos de inversores*

	Inversor com transformador de baixa frequência	Inversor com transformador de alta frequência	Inversor sem transformador
Isolação galvânica	Sim	Sim	Não
Necessidade de controle corrente residual	Não	Não	Sim
Tamanho e peso	Grande	Médio	Pequeno
Tensão de entrada Vdc < 150V	Facilmente	Possível	Dificilmente
Eficiência	Baixa	Média	Alta

Fonte: Adaptado de Mertens (2013)

- k) **Eficiência de conversão CC-CA:** Segundo a IEC/TS 61836, a eficiência de conversão CC-CA do inversor é definida como a razão entre a energia elétrica na saída do inversor e a energia na entrada do inversor, isto é, a razão entre a energia entregue à rede elétrica e a energia vinda dos módulos fotovoltaicos para o inversor, conforme apresentado na Equação 01.

$$\eta_{inv} = \frac{E_{CA}}{E_{CC}} = \frac{\int P_{CA}.dt}{\int P_{CC}.dt} = \frac{\int P_{CA}.dt}{\int P_{CA}.dt + \int P_P.dt} \quad (01)$$

Em que:

$E_{CA}$  = energia elétrica em corrente alternada na saída do inversor;

$E_{CC}$  = energia elétrica em corrente contínua na entrada do inversor;

$P_{CA}$  = Potência elétrica na saída do inversor;

$P_{CC}$  = Potência elétrica na entrada do inversor;

$P_p$  = Perda no processo de conversão.

## 2.2 EFICIÊNCIA DOS INVERSORES FOTOVOLTAICOS

A eficiência do inversor é uma das características mais importantes a ser analisada, visto que através dela pode haver a comparação de equipamentos com mesmas características elétricas definindo assim qual é o melhor equipamento para seu local de instalação. Tem influência na eficiência a topologia do inversor, a temperatura e a radiação do local, assim como seu método de busca do ponto de máxima potência. Segundo Urbanetz (2010) dependendo da topologia adotada na concepção do inversor do SFCR, tem-se um comportamento diferente em relação ao seu rendimento, dependendo do nível de tensão aplicado pelo arranjo FV.

Segundo Ruther (2004), um diferencial de 1% na eficiência do inversor pode resultar em 10% a mais em energia gerada ao longo de um ano. Além da eficiência de operação, devem ser consideradas também as perdas quando em *standby*. Visto isso, a curva de eficiência de conversão CC-CA do inversor é um dos fatores mais importantes a serem observados, pois ela permite visualizar onde se encontra a faixa de operação do inversor na qual ele trabalha no melhor desempenho (ZILLES, 2012).

Assim como a utilização de transformadores isoladores influenciam na eficiência do inversor, a tensão de operação também tem uma grande participação nesse fator, pois a eficiência de um inversor não é igual em toda a faixa de operação de tensão de entrada. O nível de tensão de entrada influencia o rendimento do inversor, pois é necessária uma adaptação de tensão entre a sua entrada e a sua saída. Segundo Rampinelli (2012), as perdas em inversores podem ser divididas em duas categorias principais: perdas por chaveamento e perdas por condução. Ambas são dependentes das características dos dispositivos semicondutores utilizados pelos

inversores como elementos de chaveamento e, também, da topologia do conversor, da frequência de operação e do tipo de carga. A diminuição de perdas e o aumento da eficiência dos inversores estão diretamente ligadas ao desenvolvimento de dispositivos semicondutores com novos materiais e novas tecnologias de fabricação.

Atualmente tem-se como padrão para análise da eficiência de inversores fotovoltaicos três opções, a máxima eficiência, a eficiência europeia e a eficiência Californiana. Para efetuar essa comparação os inversores apresentam curvas de eficiência x carregamento para três tensões de entrada diferentes, uma é utilizada para a eficiência máxima e as outras duas nas tensões limites de operação do seguidor do ponto de máxima potência (SPMP) (ALMEIDA, 2011).

Inicialmente era utilizado apenas o ponto de máxima eficiência para análise dos inversores, mas como o inversor não funciona o tempo todo em suas características nominais, foi necessário fazer a comparação da eficiência em outros pontos para comprovar a boa eficiência do equipamento em diversas situações e não apenas na nominal. Com isso, na década de 90 foi introduzido o conceito de eficiência Europeia, a qual apresenta a eficiência do inversor em carregamentos diferentes e um perfil de radiação solar específico de uma região da Alemanha, na cidade de Trier (ALMEIDA, 2011). Essa forma de análise da eficiência independe da tensão de entrada, leva em consideração a eficiência em seis carregamentos diferentes, representados por:  $\eta_{5\%}$  (carregamento de 5%);  $\eta_{10\%}$  (carregamento de 10%);  $\eta_{20\%}$  (carregamento de 20%);  $\eta_{30\%}$  (carregamento de 30%);  $\eta_{50\%}$  (carregamento de 50%) e  $\eta_{100\%}$  (carregamento de 100%). Os coeficientes europeus obtidos são apresentados na Equação 02.

$$\eta_{EURO} = 0,03\eta_{5\%} + 0,06\eta_{10\%} + 0,13\eta_{20\%} + 0,10\eta_{30\%} + 0,48\eta_{50\%} + 0,20\eta_{100\%} \quad (02)$$

Segundo Bletterie (2008), na obtenção do coeficiente de cada carregamento levam-se em consideração os seguintes fatores: irradiância no plano, temperatura do módulo, temperatura ambiente mínima, temperatura ambiente máxima, a temperatura normalizada de teste e o coeficiente modular de temperatura.

A curva de eficiência de um inversor possui uma inclinação muito maior em seu início, com carregamentos maiores a inclinação tende a obter menores variações, fazendo com que sejam necessárias maiores análises no início do carregamento do que no final, esse é o motivo de ter mais carregamentos levados em consideração até 50% do que entre 50% e 100% do carregamento na eficiência Europeia.

Devido todos esses fatores que formam os coeficientes de carregamento, Bletterie (2008) demonstra em seu estudo que a temperatura tem uma grande influência no coeficiente de carregamento, e apresentando análises computacionais com dados de diferentes localidades na Europa encontrou-se um erro de até 2% de um sistema fotovoltaico para outro levando em conta o conceito de eficiência Europeia.

Visto que o conceito é totalmente confiável apenas na localidade em que foi obtido, a Comissão de Energia da Califórnia (CEC – *California Energy Commission*) verificou a necessidade de levantar um conceito que tivessem as características de alta irradiância e temperatura da Califórnia, com isso criaram a eficiência Californiana. Esse conceito também é uma média ponderada das eficiências do inversor em alguns carregamentos, ela leva em consideração carregamento um pouco diferentes do conceito europeu conforme é apresentado na Equação 03.

$$\eta_{CEC} = 0,04_{\eta_{10\%}} + 0,05_{\eta_{20\%}} + 0,12_{\eta_{30\%}} + 0,21_{\eta_{50\%}} + 0,53_{\eta_{75\%}} + 0,05_{\eta_{100\%}} \quad (03)$$

Na eficiência Californiana, pode-se observar que o carregamento que tem o maior peso na análise é o de 75%, seguido do de 50%, destacando assim que essa é a faixa de irradiância que mais tem influência nessa região, as faixas predominantes.

Tem-se que nenhum dos dois conceitos, nem o europeu nem o CEC, consideram a dependência da tensão de entrada e a eficiência de seguimento do ponto de máxima potência (SPMP).

### 2.2.1 Eficiência Brasileira

Existe um projeto a nível mundial criado para integrar e explorar o banco de dados de radiação solar pelo mundo, chamado de projeto SoDa – *Solar Radiation Project*. Esse projeto é um consórcio que, em 2017, une informações de 68 institutos, conforme ilustrado na Figura 7. Esses institutos são privados e públicos e unem informações sobre irradiância solar pelo mundo. Todas as estações do projeto passam por uma validação de dados, pois devem atender a características de precisão e confiabilidade exigidas pelas regras do projeto. No Brasil tem-se como contribuintes

dados obtidos através de uma parceria com estações do INPE e do INMET, sendo 11 estações do INPE e 31 estações do INMET, conforme ilustrado na Figura 8.



Figura 7 – Institutos parceiros do projeto SoDa  
Fonte: SoDa (2017)



Figura 8– Estações cadastradas no projeto SoDa do Brasil  
 Fonte: SoDa (2017)

Para fazer uma análise da eficiência brasileira foi necessário adquirir dados de radiação solar, com resolução de minutos, para que através deles fossem obtidos os coeficientes referentes ao índice de irradiação brasileiro. Para isso foram utilizados dados fornecidos pelo Projeto SoDa. Foram obtidos dados referentes ao ano de 2005 para todas as capitais brasileiras. Segundo Neto (2012), com esses dados foram calculadas as irradiâncias média regional e nacional para cada minuto do ano. A partir disso foi avaliada a importância de cada carregamento e escolhidos como principais a serem utilizados os seguintes: 10%, 20%, 30%, 50%, 75% e 100%.

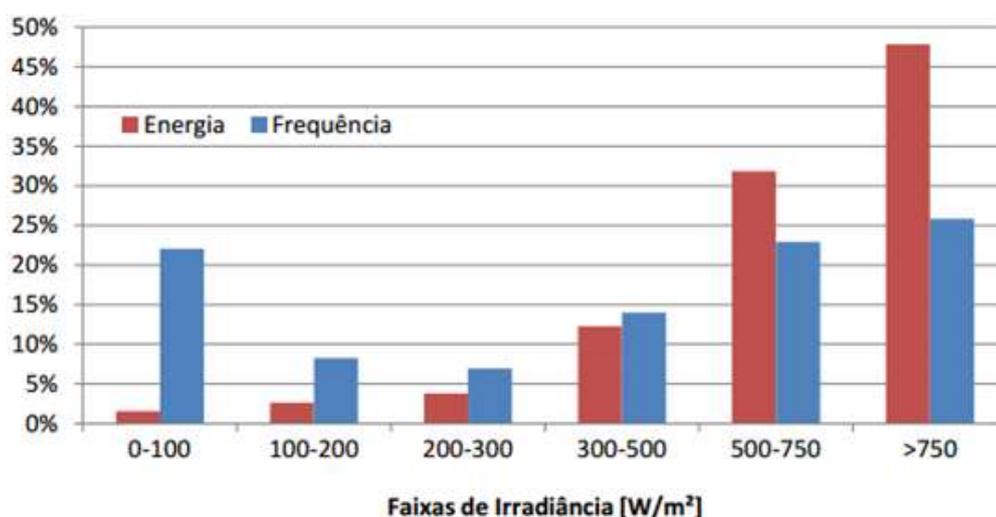


Figura 9: Distribuição de frequência da irradiação e participação na irradiação anual para a média nacional por faixas.  
Fonte: Neto (2012)

Fazendo uma análise da Figura 9 pode-se observar que mais de 40% da irradiação anual é proveniente de irradiações maiores que 750 W/m<sup>2</sup> e mais de 70% da irradiação provêm de irradiações superiores a 500 W/m<sup>2</sup> (NETO, 2012). Com isso chega-se a conclusão de que as fórmulas de eficiência Europeia e Californiana não se enquadram ao perfil brasileiro de irradiação, visto que eles levam mais em consideração as faixas de baixa irradiação. A partir dessa distribuição de irradiação que são obtidos os coeficientes utilizados na equação de eficiência do local em questão.

Um estudo realizado por ALMEIDA (2011), mostrou uma eficiência brasileira de inversores para SFCR. A proposta do trabalho era apresentar uma nova maneira de calcular a eficiência ponderada considerando características ignoradas nos conceitos Europeu e Californiano e adaptando às características brasileiras de incidência solar.

Cada carregamento necessita de 10 medidas em diferentes tensões, isto é, o inversor é ensaiado com 10 tensões entre seu limite de tensão em cada um dos 6 carregamentos, obtendo 60 medidas diferentes. Para calcular a eficiência total deve-se calcular a eficiência total média de cada carregamento, conforme é apresentado na Equação 04.

$$\eta_{TMEDk\%} = \frac{\sum_{i=V_{PMPmin}}^{V_{PMPmax}} \eta_{k\%i}}{10} \quad (04)$$

Sendo:

$\eta_{TMEDk\%}$  = eficiência total média

$k\%$  = carregamento

$\eta_{k\%i}$  = eficiência total a  $k\%$  de carregamento e a uma dada tensão de entrada  $i$ .

Com isso, Almeida (2011) obteve como cálculo da Eficiência Brasileira a Equação 05:

$$\eta_{BR} = 0,02\eta_{TMED10\%} + 0,02\eta_{TMED20\%} + 0,04\eta_{TMED30\%} + 0,12\eta_{TMED50\%} + 0,32\eta_{TMED75\%} + 0,48\eta_{TMED100\%} \quad (05)$$

No próximo capítulo serão apresentadas as aplicações teóricas e práticas das Equações 02, 03 e 05, comparando resultados e destacando as diferenças.

### 3 APLICAÇÃO TEÓRICA

Os catálogos de inversores produzidos pelo mundo apresentam uma folha de dados com as características técnicas do equipamento, apresentando entre essas informações a eficiência máxima do equipamento, e mostrando também a eficiência do inversor em diferentes carregamentos. Verifica-se em uma breve pesquisa que normalmente os fabricantes trazem três diferentes eficiências para cada carregamento, uma na tensão mínima de SPMP, outra na tensão média e a última na tensão máxima de SPMP, visto que a eficiência varia de acordo com a tensão CC utilizada. Observa-se também que é comum que as eficiências apresentadas pelos fabricantes sejam em carregamentos que atendam as equações de eficiência Europeia e Californiana, conforme demonstrada na Tabela 2

*Tabela 2: Eficiência apresentada na folha de dados do Inversor Galvo 1,5*

<b>Eficiência</b>	
Eficiência máxima	95,5%
Eficiência Europeia ( $\eta_{EU}$ )	94,5%
$\eta$ em 5% Pac, r*)	84,5 / 86,0 / 86,0 %
$\eta$ em 10% Pac, r*)	87,5 / 89,7 / 89,6 %
$\eta$ em 20% Pac, r*)	91,3 / 93,3 / 93,1 %
$\eta$ em 25% Pac, r*)	92,4 / 94,1 / 93,9 %
$\eta$ em 30% Pac, r*)	93,0 / 94,6 / 94,3 %
$\eta$ em 50% Pac, r*)	93,9 / 95,5 / 95,2 %
$\eta$ em 75% Pac, r*)	94,2 / 95,9 / 95,4 %
$\eta$ em 100% Pac, r*)	94,0 / 95,9 / 95,6 %

\*)  $U_{mpp\ min} / U_{dc,r} / U_{mpp\ max}$

Fonte: Adaptado de Fronius (2017)

Este trabalho utilizará três diferentes inversores fotovoltaicos, os quais serão apresentadas as características retiradas das informações dos fabricantes, e a partir dessas informações, serão calculadas as eficiências Europeia e Californiana.

Como a eficiência brasileira depende diretamente da eficiência do inversor no carregamento em 10 diferentes tensões, será necessário obter essas informações através de ensaios em laboratório com equipamentos específicos, visto que as folhas de dados dos fabricantes não apresentam a eficiência nesse nível de detalhamento.

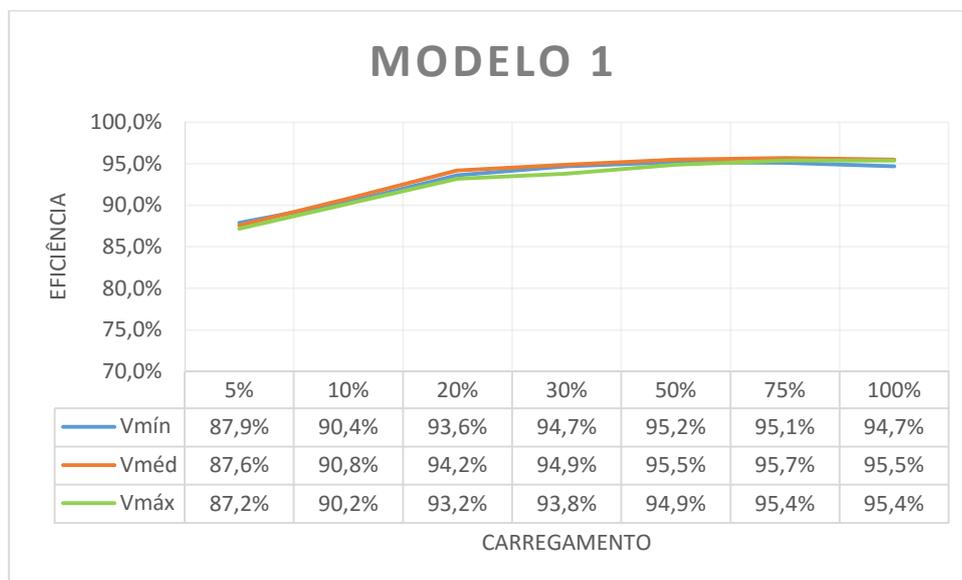
A proposta da pesquisa é averiguar a diferença das três equações de eficiência apresentadas no capítulo anterior, a eficiência Europeia, a eficiência Californiana e a proposta para a eficiência brasileira, destacando as vantagens e desvantagens na utilização delas no Brasil.

### 3.1 CÁLCULOS DA EFICIÊNCIA EUROPEIA E EFICIÊNCIA CALIFORNIANA:

Conforme citado anteriormente, para os cálculos da eficiência Europeia e da eficiência Californiana foram utilizados os dados fornecidos pelos fabricantes dos inversores escolhidos. Como o trabalho se baseia em apresentar uma análise comparativa das equações, não serão expostos os fabricantes dos inversores, mas sim as características necessárias para o projeto, de forma a não apresentar nenhuma avaliação dos equipamentos escolhidos.

Foram escolhidos três modelos diferentes de inversores, os quais as características serão apresentadas a seguir. Utilizando as eficiências fornecidas nos catálogos dos fabricantes de inversores, e utilizando a Equação 02 e a Equação 03, calculou-se a eficiência Europeia e Californiana de cada modelo respectivamente. Apresenta-se nas Figura 10, Figura 11 e Figura 12, as curvas de eficiência de cada modelo escolhido para o estudo.

- **MODELO 1**



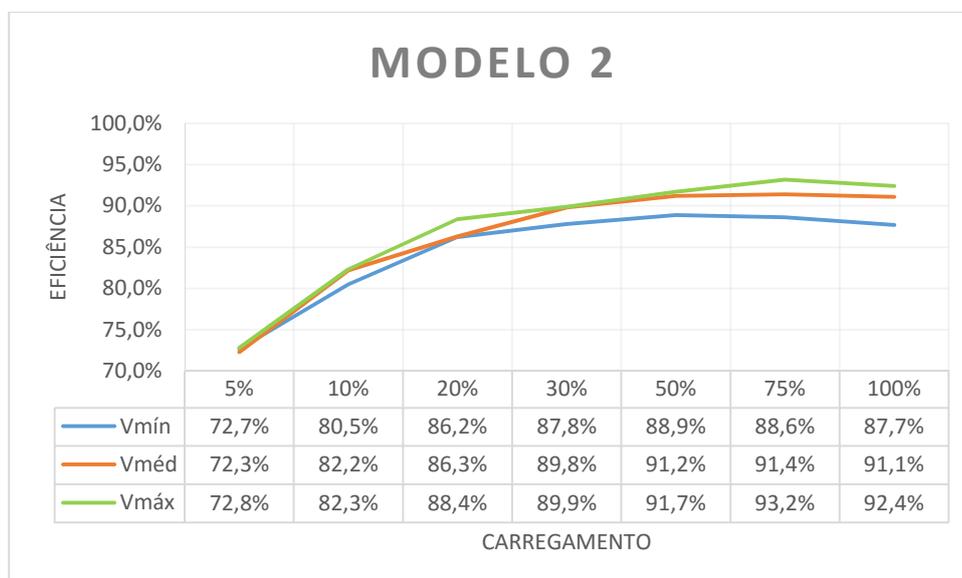
*Figura 10: Curva de eficiência Modelo 1*

Eficiência máxima: 95,7%

Eficiência Europeia: 94,7%

Eficiência Californiana: 95,2%

- **MODELO 2**



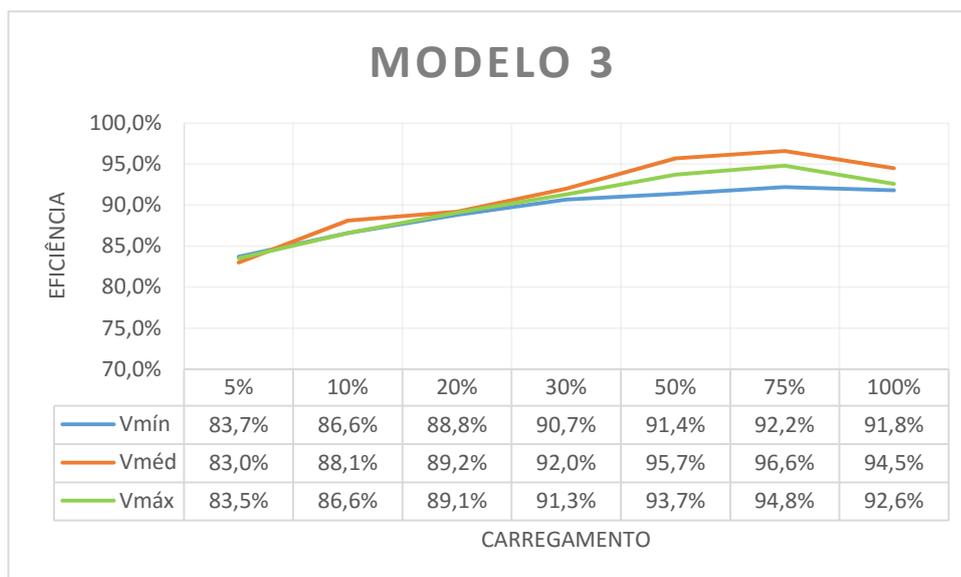
*Figura 11: Curva de eficiência Modelo 2*

Eficiência máxima: 93,2%

Eficiência Europeia: 89,2%

Eficiência Californiana: 90,5%

- MODELO 3



*Figura 12: Curva de eficiência Modelo 3*

Eficiência máxima: 96,6%

Eficiência Europeia: 92,6%

Eficiência Californiana: 94,7%

Cabe-se ressaltar que a eficiência máxima das figuras anteriores são as obtidas nos catálogos dos fabricantes.

Pode-se perceber avaliando as eficiências nas 3 tensões que nos Modelos 1 e 3 os inversores possuem melhor eficiência na tensão média e no Modelo 3 possui melhor eficiência na tensão máxima. Vale também destacar que as eficiências Europeia e Californiana foram calculadas nas três tensões apresentadas, mas para facilitar o entendimento foram apresentados apenas a eficiência referente à tensão de melhor resultado, sendo que nos Modelos 1 e 3 foram na tensão média e no Modelo 2 na tensão máxima.

### 3.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS:

- Analisador de Potência: com precisão de potência  $\leq 0,1\%$  da leitura  $+0,1\%$  da escala de potência. Energia melhor ou igual à precisão de potência  $+0,1\%$  da leitura de tempo, apresentado na Figura 13.

Modelo: WT332E

Fabricante: Yokogawa



*Figura 13: Analisador de Potência Yokogawa WT332E  
Fonte: Yokogawa (2015)*

- Simulador de Painel Fotovoltaico:
  - Alimentação CC: foi utilizada uma fonte de alimentação que simula o gerador Fotovoltaico. Uma Fonte CC simples não é o mais indicado visto que um módulo fotovoltaico tem características específicas, como sua curva de máxima potência variando de acordo com a radiação aplicada nele.  
Um simulador fotovoltaico tem baixa capacitância na saída e permite que a tensão e corrente de saída sejam limitadas assim como nos módulos, por exemplo, pode-se configurar um módulo fotovoltaico de tensão de circuito aberto de 36,7V com corrente de curto circuito de 8A e eficiência de 16%. Configurando essas características pode-se aplicar a esse módulo a quantidade de radiação desejada, como por exemplo, 1.000W/m<sup>2</sup> com temperatura de 25°C e assim simular condições reais de funcionamento dos módulos. A saída da fonte não será contínua em um só valor, o inversor fotovoltaico irá buscar o ponto de máxima potência desse módulo na

situação aplicada e poderá simular nuvens baixando a radiação entre outros. O tempo de resposta desse simulador deve ser alto visto que nos módulos a resposta é imediata. O Simulador Fotovoltaico é apresentado na Figura 14.

Modelo: ETS 10KW 600 X 17 C PVF

Fabricante: TerraSAS



*Figura 14: Simulador Fotovoltaico TerraSAS ETS 10kW  
Fonte: Terrasas (2014)*

- Alimentação CA: esta fonte pode ser uma fonte de alimentação CA propriamente dita ou até mesmo a própria rede elétrica da distribuidora. Nesse estudo foi utilizada a rede da distribuidora.

### 3.3 RESULTADOS PRÁTICOS:

O primeiro passo para obter a eficiência brasileira, conforme apresentado na Equação 05, é buscar a eficiência do inversor em dez diferentes tensões e em seis diferentes carregamentos, obtendo um total de 60 medidas. Para obtenção das 60 medidas apresentadas nesse trabalho, foram feitos 3 ensaios com as mesmas características em cada modelo e calculada uma média ponderada dos 3 ensaios. Os valores apresentados nas tabelas de tensões x carregamento são referentes a essa média ponderada em cada modelo. Como é necessária a obtenção das eficiências em 10 diferentes tensões, divide-se a faixa de tensão em que cada inversor trabalha em 10 valores, e, como cada inversor escolhido trabalha em uma faixa de tensão, as tensões utilizadas serão diferentes entre os modelos.

Depois de obtidos os resultados práticos, é necessário aplicar os resultados de cada carregamento à Equação 04, a qual calcula a eficiência média de cada carregamento. Com esse resultado, aplica-se a eficiência média de cada carregamento à Equação 05, obtendo então a eficiência brasileira de cada modelo.

- Resultados Modelo 1:

A Tabela 3 representa as eficiências obtidas através de ensaios do inversor de Modelo 1. Foram obtidas 60 medidas de eficiências. Pode-se observar que a eficiência máxima obtida foi de 95,3% em tensões diferentes dos carregamentos 50% e 75%.

*Tabela 3: Resultados de eficiência: carregamento x tensão Modelo 1*

	10%	20%	30%	50%	75%	100%
V <sub>1</sub> = 230V	89,9%	94,3%	94,5%	95,1%	94,8%	94,5%
V <sub>2</sub> = 260V	91,4%	93,5%	94,4%	94,9%	94,6%	93,8%
V <sub>3</sub> = 290V	91,8%	93,6%	94,4%	94,9%	94,4%	93,9%
V <sub>4</sub> = 320V	90,9%	93,5%	94,1%	94,7%	94,3%	94,7%
V <sub>5</sub> = 350V	91,4%	93,4%	94,0%	94,5%	94,9%	94,6%
V <sub>6</sub> = 380V	91,3%	94,1%	94,7%	95,2%	94,9%	94,5%
V <sub>7</sub> = 410V	91,5%	93,8%	94,5%	95,3%	94,9%	94,8%
V <sub>8</sub> = 440V	91,1%	93,6%	94,3%	95,1%	94,9%	95,0%
V <sub>9</sub> = 470V	91,2%	93,4%	94,4%	94,8%	95,3%	94,9%
V <sub>10</sub> = 500V	91,6%	94,2%	94,6%	95,3%	95,1%	94,7%

Fonte: *Elaboração própria*

Aplicando as informações da Tabela 3 na Equação 4 pode-se obter a média de cada carregamento. Na Tabela 4 são apresentadas as médias de cada carregamento e nela pode-se observar que o Modelo 1 possui maior média no carregamento de 50% (95%), seguido do carregamento de 75% (94,8%).

Tabela 4: Eficiência média por carregamento Modelo 1

10%	20%	30%	50%	75%	100%
91,2%	93,7%	94,4%	95,0%	94,8%	94,5%

Fonte: Elaboração própria

Considerando a eficiência média de cada carregamento, o Inversor de Modelo 1 apresentou uma curva de eficiência conforme demonstrado na Figura 15.

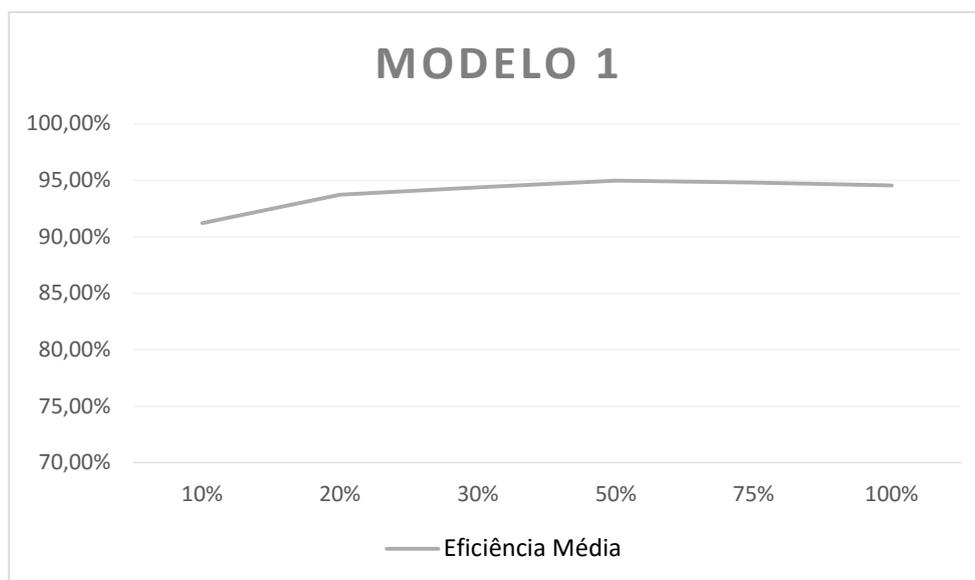


Figura 15: Curva de eficiência x carregamento - Modelo 1

Com as médias de cada carregamento obtidas, aplicam-se esses valores a Equação 5, obtendo então uma Eficiência Brasileira de 94,6% para esse modelo.

- Resultados Modelo 2:

Na Tabela 5 são representadas as eficiências obtidas através de ensaios do inversor de Modelo 2. Foram obtidas 60 medidas de eficiências. Pode-se observar que a eficiência máxima obtida foi de 91,5% no carregamento de 75%.

Tabela 5: Resultados de eficiência: carregamento x tensão Modelo 2

	10%	20%	30%	50%	75%	100%
V <sub>1</sub> = 100V	81,1%	87,0%	88,8%	89,5%	88,6%	88,6%
V <sub>2</sub> = 109V	81,4%	87,3%	89,0%	89,7%	89,2%	88,8%
V <sub>3</sub> = 118V	81,7%	87,3%	89,2%	90,2%	89,8%	89,2%
V <sub>4</sub> = 127V	80,4%	87,0%	89,3%	90,5%	90,8%	89,8%
V <sub>5</sub> = 136V	81,5%	87,6%	89,6%	90,7%	90,5%	90,0%
V <sub>6</sub> = 145V	79,8%	87,1%	89,5%	90,8%	90,3%	90,2%
V <sub>7</sub> = 154V	80,5%	87,7%	89,8%	90,6%	90,7%	90,4%
V <sub>8</sub> = 163V	81,7%	87,8%	89,8%	90,7%	90,9%	90,8%
V <sub>9</sub> = 172V	81,5%	87,7%	89,7%	91,0%	91,2%	91,1%
V <sub>10</sub> = 180V	81,5%	87,5%	89,6%	90,8%	91,5%	91,0%

Fonte: Elaboração própria

Aplicando as informações da Tabela 5 na Equação 4 pode-se obter a média de cada carregamento. Na Tabela 6 são apresentas as médias de cada carregamento e nela pode-se observar que o Modelo 2 possui maior média no carregamento de 50% (90,4%), seguido do carregamento de 75% (90,3%).

Tabela 6: Eficiência média por carregamento Modelo 2

10%	20%	30%	50%	75%	100%
81,1%	87,4%	89,4%	90,4%	90,3%	90,0%

Fonte: Elaboração própria

Considerando a eficiência média de cada carregamento, o Inversor de Modelo 2 apresentou uma curva de eficiência conforme demonstra a Figura 16.

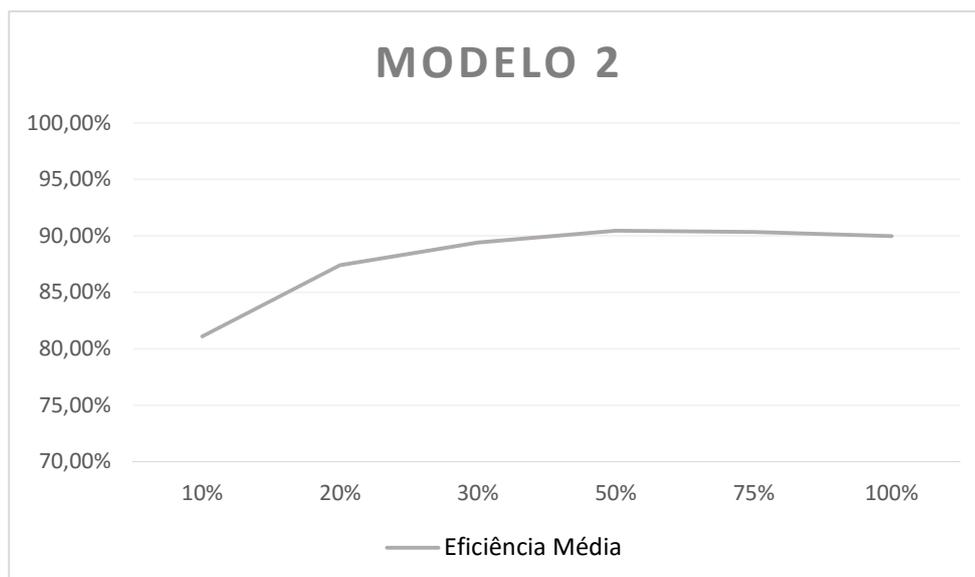


Figura 16: Curva de eficiência x carregamento - Modelo 2

Com as médias de cada carregamento obtidas, aplicam-se esses valores a Equação 5, obtendo então uma Eficiência Brasileira de 89,9% para esse modelo.

- Resultados Modelo 3:

A Tabela 7 representa as eficiências obtidas através de ensaios do inversor de Modelo 3. Foram obtidas 60 medidas de eficiências. Pode-se observar que a eficiência máxima obtida foi de 96,2% no carregamento de 75%.

Tabela 7: Resultados de eficiência: carregamento x tensão Modelo 3

	10%	20%	30%	50%	75%	100%
V <sub>1</sub> = 200V	83,7%	88,6%	90,6%	91,7%	91,8%	92,1%
V <sub>2</sub> = 213V	83,9%	88,4%	90,7%	91,9%	92,0%	91,0%
V <sub>3</sub> = 226V	83,5%	89,3%	90,6%	92,0%	92,2%	91,8%
V <sub>4</sub> = 240V	83,2%	88,0%	90,6%	92,3%	92,3%	92,0%
V <sub>5</sub> = 253V	84,7%	88,4%	90,7%	92,3%	93,5%	92,5%
V <sub>6</sub> = 266V	83,9%	88,9%	90,7%	92,2%	95,1%	93,7%
V <sub>7</sub> = 280V	84,9%	88,8%	90,9%	92,1%	96,2%	94,8%
V <sub>8</sub> = 293V	86,4%	89,0%	90,9%	92,3%	94,4%	93,1%
V <sub>9</sub> = 306V	86,0%	89,0%	90,9%	92,4%	93,8%	92,9%
V <sub>10</sub> = 320V	86,0%	88,5%	90,9%	92,4%	92,7%	92,3%

Fonte: Elaboração própria

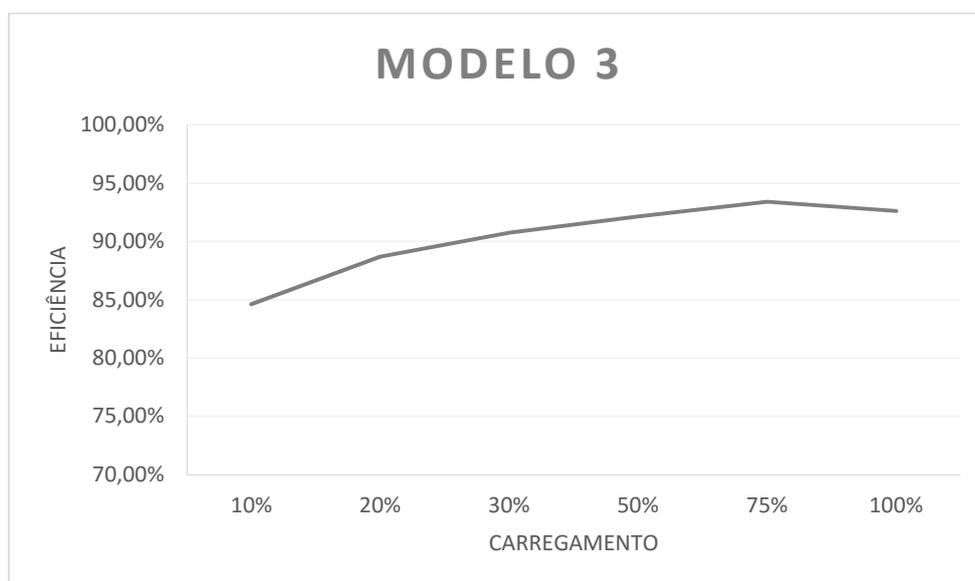
Aplicando as informações da Tabela 7 na Equação 4 pode-se obter a média de cada carregamento. Na Tabela 8 são apresentadas as médias de cada carregamento e nela pode-se observar que o Modelo 3 possui maior média no carregamento de 75% (93,4%), seguido do carregamento de 100% (92,6%).

*Tabela 8: Eficiência média por carregamento Modelo 3*

10%	20%	30%	50%	75%	100%
84,6%	88,7%	90,7%	92,2%	93,4%	92,6%

Fonte: *Elaboração própria*

Considerando a eficiência média de cada carregamento, o Inversor de Modelo 3 apresentou uma curva de eficiência conforme demonstra a Figura 157.



*Figura 17: Curva de eficiência x carregamento - Modelo 3*

Com as médias de cada carregamento obtidas, aplicam-se esses valores a Equação 5, obtendo então uma Eficiência Brasileira de 92,5% para esse modelo.

### 3.4 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS:

A primeira diferença apresentada entre as equações de eficiências avaliadas são os coeficientes considerados em cada carregamento. Pode-se observar através da Tabela 9 que a eficiência Europeia leva em consideração o carregamento de 5% e não considera o carregamento de 75%. Isso ocorre devido a pouca relevância das altas faixas de irradiância na região analisada, o carregamento que mais tem importância nessa situação é o de 50%, pois é o que mais tem predominância na região. Da mesma forma, vê-se que na eficiência Californiana o carregamento de maior relevância é o de 75%, e o de 100% tem mínimo impacto no cálculo.

Diferente das outras equações, a irradiância brasileira é muito mais relevante nos altos carregamentos, fazendo com que os coeficientes de 100% e 75% tenham uma maior influência no cálculo final da eficiência do equipamento. Como pequenos carregamentos são desprezíveis a nível brasileiro, carregamentos de 5% não chegam a ser considerados também, assim como o Californiano.

*Tabela 9: Comparativo dos coeficientes por carregamento*

	5%	10%	20%	30%	50%	75%	100%
Eficiência Europeia	0,03	0,06	0,13	0,10	0,48	-	0,20
Eficiência Californiana	-	0,04	0,05	0,12	0,21	0,53	0,05
Eficiência Brasileira	-	0,02	0,02	0,04	0,12	0,32	0,48

*Fonte: Elaboração própria*

Os coeficientes influenciam na análise do inversor, pois alguns possuem uma maior eficiência em baixos carregamento e outros em altos, fazendo assim com que um inversor de alto rendimento na Europa não necessariamente será um inversor de alto rendimento no Brasil.

Para a Europa, inversores que possuem bom rendimento em carregamento médio são melhores. Para a Califórnia os inversores precisam ter um bom rendimento em 75% do carregamento, não pesando tanto 100% do carregamento. Já no Brasil o inversor precisa ter um bom rendimento em 75% e 100%, tendo pouca influência nos rendimentos menores.

A equação sugerida como eficiência brasileira possui como principal vantagem de análise o fato de levar em consideração a variação de tensão além da variação de

carregamento. Os inversores fotovoltaicos possuem uma diferença considerável de eficiências entre as tensões aplicadas, em altas tensões o equipamento normalmente é mais eficiente. Como não é utilizada a variação de tensão nas outras duas equações, normalmente são utilizadas pelos fabricantes as eficiências por carregamento da tensão de maior eficiência, podendo dessa forma mascarar baixas eficiências em outras tensões. Se for comparar com a equação de eficiência Europeia e a equação de eficiência Californiana, a eficiência Brasileira possui maior confiabilidade.

Na Tabela 10 é apresentado um comparativo das eficiências entre os modelos, destacando as eficiências máximas, Europeia, Californiana e Brasileira. Através dela pode-se observar que a eficiência máxima possui um valor maior que todas as outras eficiências, podendo dessa forma mascarar o real rendimento de um equipamento.

*Tabela 10: Comparativo das eficiências entre os modelos*

	<b>Eficiência Máxima</b>	<b>Eficiência Europeia</b>	<b>Eficiência Californiana</b>	<b>Eficiência Brasileira</b>
MODELO 1	95,7%	94,7%	95,2%	94,6%
MODELO 2	93,2%	89,2%	90,5%	89,9%
MODELO 3	96,6%	92,6%	94,7%	92,5%

*Fonte: Elaboração própria*

Ao fazer uma análise dos gráficos obtidos, pode-se observar primeiramente que nos dados fornecidos pelo fabricante, apresentadas na primeira etapa da elaboração dos resultados, que nem todos os modelos obtiveram eficiência máxima na mesma tensão. Os modelos 1 e 3 tiveram melhor eficiência na tensão média de funcionamento e o modelo 2 na tensão máxima de funcionamento. Isso se deve pela variação das características de controle e topologia de cada inversor escolhido, mostrando que nem todos os equipamentos terão funcionamento similar nas diferentes tensões.

Fazendo um comparativo da curva de melhor eficiência apresentada pelos fabricantes e a curva de eficiência brasileira, obtém-se os gráficos apresentados nas Figuras 18, 19 e 20.

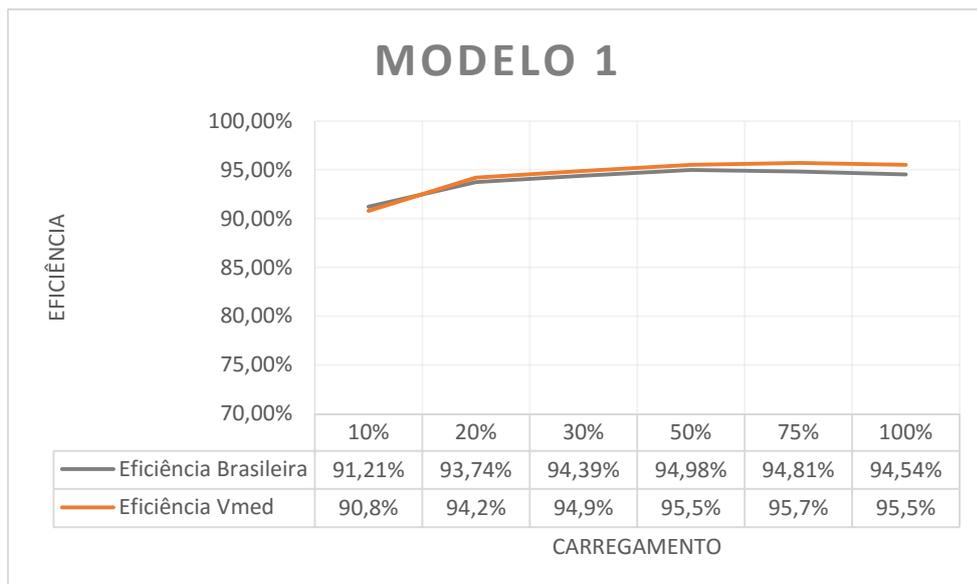


Figura 18: Comparativo Eficiência Tensão média com Eficiência Brasileira - Modelo 1

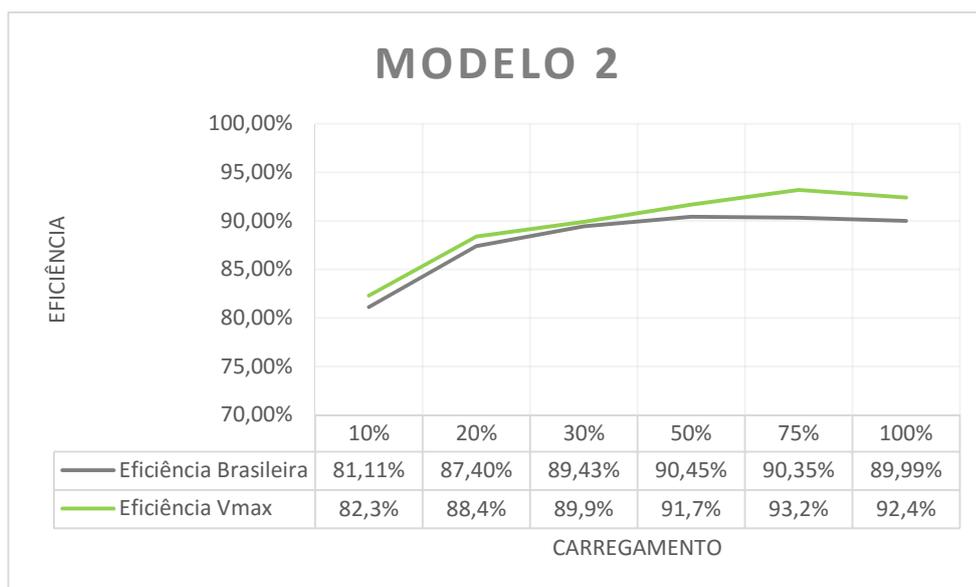
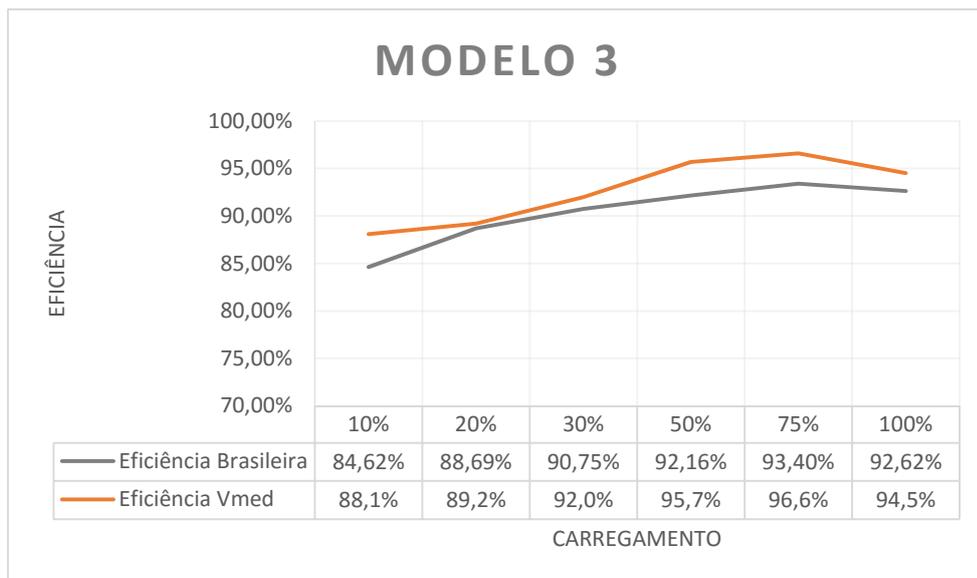


Figura 19: Comparativo Eficiência Tensão média com Eficiência Brasileira - Modelo 2



*Figura 20: Comparativo Eficiência Tensão média com Eficiência Brasileira - Modelo 3*

Observa-se nos três modelos avaliados que a curva de eficiência na tensão de melhor desempenho dos dados do fabricante possui valores maiores do que a curva da eficiência brasileira calculada. Isso se deve principalmente pelo fato da eficiência brasileira fazer uma média de várias tensões, e não apenas na tensão de melhor desempenho.

## 4 CONCLUSÕES

Muitos são os fatores que influenciam no alto rendimento de um sistema fotovoltaico: o material das células utilizadas nos módulos fotovoltaicos, o ângulo de instalação dos módulos, perdas com cabeamento e conectores e também a eficiência de conversão CC-CA dos inversores utilizados.

O total de irradiação diária recebido varia muito entre localidades, isso faz com que cada região possua um comportamento específico de geração de energia elétrica através do Sol. O primeiro local a levar em consideração sua irradiação diária para avaliação de inversores foi a Europa, apresentando uma equação que avalia a eficiência do inversor de acordo com o potencial de geração local. Seguido da Europa, a Califórnia apresentou uma equação específica para sua localidade, destacando bastante as diferenças da equação europeia. No Brasil, existe uma sugestão de equação para avaliação de acordo com o potencial nacional.

O aprofundamento apresentado nesse trabalho, específico na eficiência dos inversores, levanta que cada região avaliada tem características particulares, fazendo com que um inversor com alto rendimento na Europa não necessariamente terá um alto rendimento no Brasil. Como a Europa possui menores índices de incidência de irradiação, um inversor que possua uma alta eficiência nos baixos carregamentos sempre terá um maior rendimento. Já no Brasil é o contrário, é necessário que o equipamento possua alto rendimento nos mais altos carregamentos.

Avaliando folhas de dados fornecidas por fabricantes variados, observa-se que a eficiência Europeia e Californiana sempre é calculada nas tensões de melhores rendimentos. Quando comparado o melhor rendimento dos inversores nas tensões apresentadas pelos fabricantes com o rendimento sugerido como brasileiro, observa-se que a eficiência brasileira tem valor menor. Isso acontece pelo fato da eficiência sugerida como brasileira ser obtida através de uma média da eficiência em várias tensões diferentes.

Considerando os resultados obtidos nos três modelos e analisando a Tabela 10, é válido destacar que a eficiência máxima apresentada em cada um deles é maior do que as eficiências calculadas, sendo que essa pode ocultar o real rendimento do equipamento. Outro ponto pertinente a ser levado em consideração é a tensão aplicada na entrada do inversor, com a variação de tensão de entrada a eficiência

também varia. A única equação analisada que leva em consideração a tensão de entrada é a de eficiência brasileira, fazendo com que ela apresente uma maior confiabilidade comparada às outras.

O Modelo 1 estudado é o que apresenta melhor resultado para ambas as localidades avaliadas, possui eficiência Europeia igual a 94,7%, eficiência Californiana igual a 95,3% e eficiência Brasileira igual a 94,6%. Isso mostra que ele possui maior eficiência tanto nos baixos carregamentos quanto nos altos carregamentos, e possui também uma menor variação quando submetida a diferentes tensões. Mesmo possuindo a melhor eficiência em todos os modelos pode-se verificar que o local que esse modelo teria melhor rendimento é na Califórnia, apontando como o maior resultado entre eles.

Para a obtenção da equação sugerida como brasileira, Almeida (2011) utilizou dados de radiação de apenas um ano, o ano de 2005. Esse fator faz com que os coeficientes utilizados na equação não possuam tanta confiabilidade, visto que não se sabe se o ano utilizado foi um ano típico. Seria interessante utilizar dados de pelo menos 10 anos para ter uma confiabilidade maior na obtenção dos coeficientes brasileiro. Indica-se esse estudo como forma de confirmação dessa equação.

Concluindo, é importante para um sistema fotovoltaico a avaliação das características do inversor a ser utilizado, levantando as características da instalação particular e considerando o local aonde será instalado para que utilize a equação de eficiência de inversores que melhor se enquadre. Esse cuidado pode aumentar o rendimento do sistema, apresentando melhores resultados.

## 5 REFERÊNCIAS

ABNT NBR 10899. **Energia Solar Fotovoltaica Terminologia**. Rio de Janeiro, RJ, 2006.

ABNT NBR 16149. **Sistemas fotovoltaicos (FV) – Características de interface de conexão com a rede elétrica de distribuição**. Rio de Janeiro, RJ, 2013.

ALMEIDA, M.; ZILLES, R.; PINTO, A.. **Eficiência Brasileira de Inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede**. Avances en Energias Renovables y Medio Ambiente Vol 15, Argentina, 2011.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Geração Distribuída**. Disponível em <[http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD\\_Fonte.asp](http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD_Fonte.asp)>. Acesso em 31 de maio de 2017.

BALLESTEROS, Clara Ormaechea. **Análisis Comparativo de inversores fotovoltaicos de conexión a red com potencia igual o superior a 100kW**. Universidad Carlos III de Madrid. Espanha, 2012.

BIG, Banco de Informações de Geração. **Capacidade de Geração do Brasil**. Disponível em <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em 31 de maio de 2017.

BLETTERIE, Benoit; BRUNDLINGER, Roland; HABERLIN, Heinrich; BAUMGARTNER, Franz; SCHMIDT, Heribert; BURGER, Bruno; KLEIN, Gerald; ABELLA, Miguel Alonso. **Redefinition of the European efficiency – finding the compromise between simplicity and accuracy**. EU PVSEC, 2735-2742. Alemanha, 2008.

Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 2016, Brasília. **Balço Energético Nacional 2016**. Disponível em <<https://ben.epe.gov.br/>>. Acesso em 26 de abril de 2017.

FRONIUS. Fabricante de Inversores Fotovoltaicos. **Solar Energy – Fronius Galvo 1.5-1**. Disponível em <<http://www.fronius.com>>. Acesso em 02 de maio de 2017.

IEC 60038. **IEC standard voltages**.

IEC 60364-5-55. **Electrical installations of buildings – Part 5-55: Selection and erection of electrical equipment – Other equipment**.

IEC/TS 61836. **Solar photovoltaic energy systems – Terms, definitions and symbols**.

INMETRO, **Portaria nº. 357**, de 01 de agosto de 2014.

MERTENS, Konrad. **Photovoltaics: fundamentals, technology and practice**. Munich/FRG, 2013.

Ministério de Minas e Energia, 2015, Brasília. **Plano Decenal de Expansão de Energia – 2024.** Disponível em <<http://www.epe.gov.br/PDEE/Relat%C3%B3rio%20Final%20do%20PDE%202024.pdf>>. Acesso em 24 de abril de 2017.

NASCIMENTO, Cássio Araújo do. **Princípio e funcionamento da célula fotovoltaica.** Monografia (Especialização em Fontes Alternativas de Energia). UFJ, Lavras, MG. 2004.

NETO, Aimé F. de Carvalho P. **Qualificação e etiquetagem de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). USP 2012.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos.** CEPEL – CRESESB. Rio de Janeiro, RJ, 2014.

RAMPINELLI, Giuliano Arns. **Estudo de características elétricas e térmicas de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede.** Tese (Doutorado em Engenharia). UFRS, 2010.

RAMPINELLI, Giuliano Arns; KRENZINGER, Arno; ROMERO, Faustino Chenlo. **Descrição e análise de inversores utilizados em sistemas fotovoltaicos.** Revista Ciências Exatas e Naturais, Vol.15. 2013.

RUTHER, Ricardo. **Edifícios Solares Fotovoltaicos.** Editor UFSC / LABSOLAR. Florianópolis, SC, 2004

SoDa. **Solar radiation data.** Disponível em <<http://www.soda-is.com>>. Acesso em 01 de maio de 2017.

TERRASAS. **Operation and Maintenance Manual: Photovoltaic Simulator.** Revisão C. Junho 2014.

URBANETZ JR, Jair. **Sistemas Fotovoltaicos conectados a redes de distribuição urbanas: Sua influência na qualidade da energia elétrica e análise dos parâmetros que possam afetar a conectividade.** Tese (Doutorado em engenharia). UFSC 2010.

YOKOGAWA. **User's Manual: WT310E/WT310EH/WT332E/WT333E.** 1st Edition: September 2015.

ZILLES, Roberto; MACÊDO, Wilson Negrão; GALHARDO, Marcos A. Barros; OLIVEIRA, Sérgio H. Ferreira de. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados à rede elétrica.** Oficina de textos. São Paulo. 2012.