

Sobrecarregamento “Oversizing” de Inversores Fotovoltaicos: estudo de caso da empresa Reus Engenharia

Fernando Reus Mosena

Resumo – Este artigo tem como base principal o comparativo de cálculos teóricos com casos reais e que estão em pleno funcionamento, trazendo como problema o caso de distribuidores e integradores sobre dimensionar inversores fotovoltaicos sem a devida análise de perdas por clipping, prometendo gerações maiores do que o real. Esta análise foi realizada com auxílio das normativas vigentes, visando desmitificar que não apenas a redução de custo do sistema está em jogo, mas também uma melhor eficiência de geração de energia elétrica. Por se tratar de um sistema que tem uma vida útil muito elevada, esta análise mostra que um equipamento eficiente pode trazer resultados positivos ao longo dos anos.

Palavras-chave – Eficiência, Energia Solar, Fronius, Inversor Fotovoltaico e Sobrecarregamento.

I. INTRODUÇÃO

Em um cenário atual de plena expansão do sistema de geração distribuída, especificamente o Sistema de Energia Solar Fotovoltaica, se faz necessário o conhecimento da área, pois envolve milhares de empregos e clientes diretamente e indiretamente. O tema tem como base orientar e demonstrar os resultados obtidos ao longo dos últimos 6 anos de “no-hall” em instalação de sistemas.

O setor tem passado por algumas turbulências como a pandemia COVID-19 e a alteração da resolução normativa da ANEEL nº 482 de 2012, provocando o setor a se estabelecer melhor no mercado.

Este projeto objetiva mostrar que um sistema que tem a vida útil muito elevada, deve ser calculado para ter a melhor eficiência trazendo assim resultados positivos aos consumidores. Mostrando o comparativo de provocar ou não um sobrecarregamento no inversor de acordo com os parâmetros do fabricante. Todos os dados foram fornecidos pelo gerenciador dos sistemas fotovoltaicos da empresa Reus Engenharia.

II. ENERGIA E ELETRICIDADE

Para se ter uma base do desenvolvimento deste artigo de-

Este trabalho foi desenvolvido como requisito para a conclusão do curso de Especialização em Sistemas de Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica da Universidade do Sul de Santa Catarina – UNISUL, 2021.

Fernando Reus Mosena com graduação em Engenharia Elétrica e Eletrônica – Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina – UNISATC e trabalha na Reus Engenharia LTDA (e-mail: fernando-reusmosena@hotmail.com).

vemos relembrar os princípios básicos do sistema de geração de energia elétrica. A geração de energia está diretamente relacionada com o consumo de energia elétrica, por se tratar de uma fonte intermitente que é acionada sob demanda e provisionamento de carga em cada momento durante o dia.

No momento atual que a população mundial vive é imprescindível o uso da energia elétrica, e com o avanço da tecnologia cada vez mais os equipamentos possuem maior potência por desenvolver mais funções, mas também maior eficiência na relação função/potência.

Conforme mostrado na Figura 1 o consumo do Brasil é de aproximadamente 587.928GWh/ano ou 48.994GWh/mês obtido com os dados mais atualizados. Isso demonstra que mesmo no período de pandemia o consumo no Brasil só aumentou. [1]

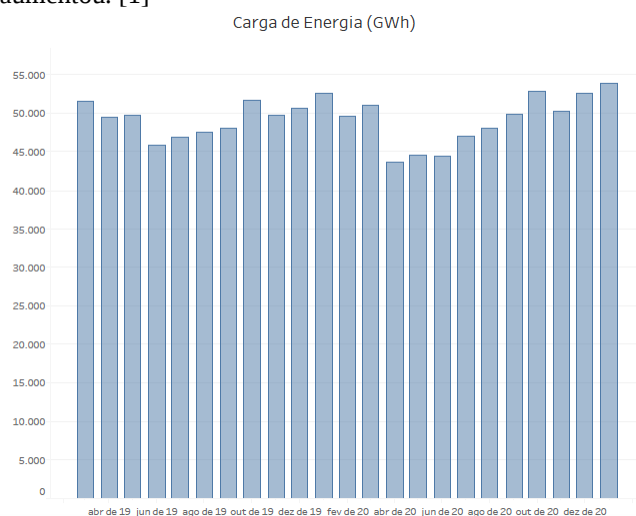


Figura 1. Gráfico da Carga em GWh no Brasil, 2021. [1]

Para o demonstrativo de como foi a geração de energia elétrica no Brasil e mostrando que é sobre demanda. A Figura 2 mostra os que todos os tipos de geração no país geraram em média 584.559GWh/ano ou 48.713,25GWh/mês.[2]

O Brasil tem uma capacidade instalada muito grande, sendo a maior parte da matriz energética fonte renovável e com capacidade instalada de 175.300MW, dividido entre algumas como Hidrelétrica com 103.026MW, Eólica 17.905MW e Solar 3.291MW.[3]

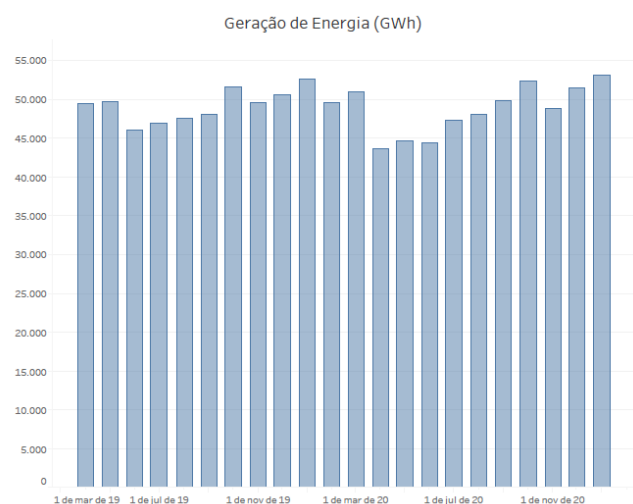


Figura 2. Gráfico de Geração de Energia Elétrica no Brasil, 2021. [1]

Com o crescimento da energia solar fotovoltaica no Brasil nos últimos anos, a estimativa é que tenhamos conectado ao Sistema Interligado Nacional (SIN) uma potência instalada de 5.865MW até final de 2025, para mostrar a representatividade desse tipo de geração segue Figura 3 que demonstra que em determinadas horas do dia o sistema já supera a Energia Nuclear.



Figura 3. Cargas de cada geração momentaneamente realizada no dia 18 de abril de 2021. [8]

Outro fator muito representativo para a popularização dos sistemas de energia solar no Brasil são os custos com energia elétrica, que variam de estado para estado e de permissionária para concessionária, sendo muito ampla a sua regulamentação, mas um item tem em comum, eles acompanham a inflação e os custos derivado da manutenção dos serviços disponibilizados pela permissionária/concessionária, fazendo com que os preços tendem a ser mais alto a cada ano.

III. SISTEMAS DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Sistema de mini e microgeração distribuída tem crescido muito desde a atualização da resolução normativa da ANEEL nº 482/2012, por ser um sistema que provoca poucas manutenções ao cliente e com retorno financeiro viável, tem sido aceito por muitos consumidores que procuram uma alternativa para eliminar um custo fixo em sua renda mensal.

Nesta seção será descrito os equipamentos que constituem o sistema de energia solar, mostrando cada equipamento

para posteriori desenvolvimento do artigo.

A. Módulos Fotovoltaicos

Uma das partes principais do sistema de energia solar, e dentre os vários tipos de tecnologias os mais convencionais e de maior uso no mundo são constituídos de silício, podendo variar de Monocristalino ou Policristalino, possuem quadro em alumínio anodizado para maior resistência mecânica e protegido por um vidro fino de mais ou menos 2mm variando conforme fabricante.

A principal função deste equipamento é realizar a captação da radiação solar e através da radiação eletromagnética incidente sobre o material de silício chamado de efeito eletromagnético, convertendo eletricamente para uma corrente contínua com tensão elevada por causa da composição das células fotovoltaicas.

B. Inversores Fotovoltaicos

Equipamento chave no sistema de energia solar fotovoltaica, considerado o “coração” do sistema, atualmente existem diversos fabricantes ao redor do mundo que seguem rigorosas normas e regulamentações impostas, para que a conversão seja a mais eficiente possível e que traga segurança ao realizar a conexão com o sistema de distribuição da concessionária/permissionária.

Os inversores eles fazem a conversão de corrente contínua que vem dos módulos fotovoltaicos para corrente alternada estabilizando a conexão com a rede de distribuição podendo variar frequência, quantidade de fases e tensão de operação. Toda essa conversão é acompanhada por um software de programação com algoritmo próprio incluído em seu processamento interno para que ative as proteções quando for necessário e faça a melhor relação da curva corrente/tensão - I/V.

Possuem proteção anti-ilhamento protegendo a rede elétrica, caso ocorra um surto e haja interrupção do sistema, o mesmo se desliga e faz a varredura na rede do cliente para verificação de possíveis causas, e nesse meio tempo ele não aciona até que a rede esteja nas condições pré-programadas.

Todo inversor possui um limitador de potência, para que não haja excedente de energia ativa transmitida para a rede elétrica em consonância com a potência nominal do inversor segue abaixo Figura 4 que mostra um equipamento instalado.



Figura 4. Inversor instalado em cliente da Reus Engenharia, 2020. [Autor]

C. StringBox

Proteção utilizada com limite de potência instalada para proteção da parte contínua do sistema fotovoltaico, contendo fusíveis, Dispositivo de Proteção contra Surto (DPS), Chave Seccionadora, todos em corrente contínua e aterramento.

Para potências maiores é utilizado quadros de proteções especiais dimensionado de acordo com cada projeto, mas contendo todas as proteções mencionadas anteriormente.

D. Radiação Solar

O Brasil tem grande potencial de expansão do sistema de energia solar, com utilização em todo o território nacional, para ter um comparativo na Alemanha, que no ano de 2020 registrou uma potência instalada de 53.781MW, possui uma insolação máxima de 3500Wh/m², se comparar o Brasil que tem 3.958MW de potência instalada e a insolação mínima de 4500Wh/m² até 6000Wh/m² em algumas regiões. [4] – [5].

Isso demonstra que o estudo sobre carregamento nos inversores é parte fundamental do processo de expansão da tecnologia, para ter um avanço consistente e possuir as menores perdas possíveis.

E. Sobre-carregamento nos Inversores

A pesquisa visa mostrar os diferentes tipos de sobre-carregamento “oversizing” sobre cada inversor com potência instalada diferente e em localidades diferentes, para isso vamos tomar como base 4 sistemas distintos conforme tabela I, que foram instalados pela empresa e que será descrito ao longo deste artigo, neles serão comparados a eficiência de conversão em sistemas sobre-carregados e os que estão com espaço para ampliação futura.

O sobre-carregamento é quando ultrapassamos a potência nominal do inversor, e dependendo do fabricante pode chegar até 60% acima da potência nominal do inversor. Os inversores representados nesse estudo serão da marca Fronius, para ter uma análise melhor do comportamento.

IV. DADOS DOS SISTEMAS

Os dados dos sistemas foram adquiridos em tempo real através da Interface de gerenciamento *Solar.Web* da empresa Fronius, onde podemos consultar todas as curvas características do sistema, como corrente alternada por fase, corrente contínua de entrada, tensão alternada de saída e tensão contínua de entrada. O banco de dados armazenado pela empresa Reus Engenharia foi primordial para realizar o estudo comparativo. [6]

Tabela I. Dados dos Sistemas Fotovoltaicos analisados.

Número da Instalação	Cidade	Potência Inversor	Potência Módulos	Potência Instalada Sistema
1	Criciúma - SC	20kW	330Wp	21,12kWp
2	Sombrio - SC	15kW	365Wp	20,44kWp
3	Meleiro - SC	6kW	330Wp	7,92kWp
4	Criciúma - SC	20kW	400Wp	16kWp

V. FORMULÁRIO

Na análise será utilizado a performance *ratio* de cada sistema, que o resultado dessa equação sendo o mais próximo do valor unitário mais eficiente é o sistema. Conforme fórmula (1).

$$Pr = \frac{Eg}{Ep} \quad (1)$$

Sendo:

Pr – *Performance Ratio* (admissional);

Eg – Energia Gerada (kWh);

Ep – Energia Projetada (kWh).

Também será utilizado o cálculo para geração teórica feito através do banco de dados da NASA que possui um banco de dados de no mínimo 20 anos atrás, nesse cálculo teórico foi levado em consideração a eficiência dos módulos, largura e altura dos módulos e a insolação média diária, a equação será representada pela fórmula (2). [7]

$$Ep = Es \times Am \times \eta M \quad (2)$$

Sendo:

Es – Insolação Diária (Wh/m²/dia);

Am – Área da superfície do Módulo (m²);

ηM – Eficiência do Módulo.

Índice de sobre-carregamento do inversor em porcentagem que será realizado pela potência instalada de módulos fotovoltaicos pela potência ativa do inversor. Esse dado é utilizado como referência para análise do resultado final, conforme fórmula (3).

$$Is = \frac{P_{inst}}{P_{inv}} - 1 \quad (3)$$

Sendo:

Is – Índice de Sobre-carregamento (%);

P_{inst} – Potência Instalada de Módulo (kWp);

P_{inv} – Potência Nominal do Inversor (kW).

VI. GERAÇÃO PROJETADA

A geração projetada é a geração média mensal estimada para cada sistema feito por software ou formulário de livros específicos para geração de energia solar fotovoltaica, esta parte se torna fundamental para a análise criteriosa, analisando níveis de tensão médio, nível de corrente, e geração anual dos sistemas. A seguir será descrito os dados técnicos de cada módulo e inversor fotovoltaico, todos os dados foram retirados de datasheets dos fabricantes.

A. Dados dos Módulos

Todos os dados mais relevantes ao processo de planejamento da geração serão demonstrados logo a seguir pela tabela II, todos os módulos utilizados nas edificações pas-

sam pelo mais alto processo de fiscalização e seguem todas as normas e regulamentos vigentes.

Os módulos têm por sua característica e da tecnologia aplicada uma garantia de energia linear de 25 anos, significando que todos módulos vão produzir no mínimo, daqui 25 anos, 80% da capacidade instalada inicial, esse valor não é exato e pode mudar de acordo com o fabricante.

Tabela II. Dados dos módulos fotovoltaicos.

Sistema	1	2	3	4
Marca	Canadian Solar	Q Cells	BYD	Trina
Modelo	CS6U-330P	Q.PEAK L-G5.0.G	330P6K-36	TSM-DE15M
Potência Módulo	330Wp	365Wp	330Wp	400Wp
Tensão de Circuito aberto (Voc)	45,6V	48,16V	46,98V	49,0V
Corrente de Curto Circuito (Isc)	9,45A	9,75A	9,31A	10,45A
Eficiência dos Módulos	16,97%	18,8%	17,0%	19,7%
Tipo de Célula	Policristalino	Monocristalino	Policristalino	Monocristalino
Altura	1960mm	1960mm	1960mm	2024mm
Largura	992mm	991mm	991mm	1004mm
Peso	22kg	22,5kg	22,2kg	23kg
Coefficiente de Temperatura Voc	-0,31%/°C	-0,28%/°C	-0,31%/°C	-0,29%/°C

B. Dados dos Inversores Fotovoltaicos

Todos os inversores utilizados nos sistemas não utilizam transformadores interno, a conversão é feita por placa de potência eletrônica, e a marca utilizada em todas as instalações, pesquisadas, é uma empresa Austríaca – Fronius. Com essa marca você consegue ter um gerenciamento completo da instalação, e que foi peça chave para a realização deste artigo, os dados ficam salvo em servidor próprio e além dos dados técnicos, também tem-se a análise gráfica que ajuda muito a esclarecer alguns dados computados.

Os Inversores são constituídos por ventilação forçada contribuindo na eficiência dos equipamentos, e todos os modelos apresentados na tabela III tem capacidade de ter um sobrecarregamento de até 50% sem sobrecarregar o equipamento e sem gerar aquecimento. Os componentes internos são robustos e suportam tranquilamente o carregamento.

Tabela III. Dados dos Inversores Fotovoltaicos.

Sistema	1	2	3	4
Marca	Fronius	Fronius	Fronius	Fronius
Modelo	Symo 20.0-3	Symo 15.0-3	Primo 6.0-1	Symo 20.0-3
Potência Inversor	20kW	15kW	6kW	20kW
Máxima Tensão de Entrada CC	1000Vcc	1000Vcc	1000Vcc	1000Vcc
Tensão Nominal de Entrada CC	600Vcc	600Vcc	710Vcc	600Vcc

MPPT Faixa de Tensão CC	420 – 800Vcc	320 – 800Vcc	240 – 800Vcc	420 – 800Vcc
Máxima Corrente de Entrada CC	33A/27A	33A/27A	18A	33A/27A
Número de Rastreadores MPPT	2	2	2	2
Mínimo Tensão de Entrada CC	200Vcc	200Vcc	80Vcc	200Vcc
Máxima Corrente de Saída	32A	32A	26A	32A
Faixa de Tensão CA	150 – 275V	150 – 275V	180 – 270V	150 – 275V
Faixa de Temperatura	-25 a +60°C	-25 a +60°C	-40 a +55°C	-25 a +60°C
Frequência	50/60Hz	50/60Hz	50/60Hz	50/60Hz

C. Cálculo Teórico dos sistemas

Para a geração foi utilizado planilhas que tem como base a fórmula (2) e o banco de dados de cada região adquirida pelo site da NASA que tem registrado as incidências médias e diretas, temperatura média no ambiente instalado. Com os dados técnicos de cada módulo fotovoltaico foi possível verificar a geração diária e posteriormente a geração mensal. Essa base será mostrada através da tabela IV.

Tabela IV. Geração Estimada de Cada Sistema - Teórico.

Número da Instalação	Cidade	Incidência Solar kWh/m²/dia	Geração Mensal Projetada
1	Criciúma - SC	4,31	2.550,00
2	Sombrio - SC	4,26	2.450,00
3	Meleiro - SC	4,31	960,00
4	Criciúma - SC	4,31	2.080,00

VII. ESTUDOS DE CASOS

Nesta seção será descrito todos os quatros sistemas e dados obtidos através do gerenciador *Solar.Web*, como pode ser observado na figura 5, a seguir, é mostrado a curva característica de uma geração de energia solar formando uma forma de “onda” com início ao nascer do sol, pico ao meio dia e fim ao pôr do sol.

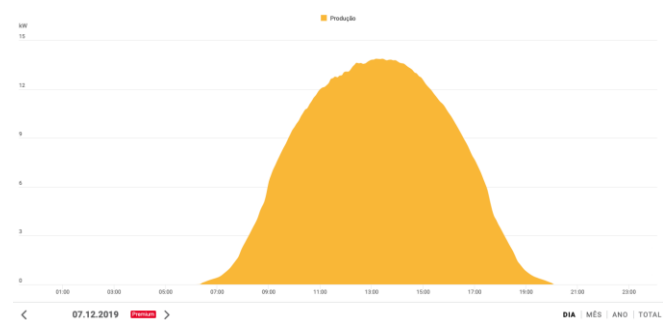


Figura 5. Curva Característica da Energia Solar. [6]

Na figura 6 também é observado alguns aspectos característicos de sobrecarregamento do inversor fotovoltaico, a

linha representada pela cor “vermelha” mostra um sobrecarregamento no inversor e nessa mesma forma de onda é possível observar que a amplitude lateral é visivelmente maior do que a outra geração no período das 6 às 18 hora. No período das 10:30 às 14:30 ocorre a perda de geração do sistema mostrado pelo “corte” no cume da forma de onda. Já na linha representada pela cor “verde” mostra um inversor com capacidade instalada inferior a potência nominal do inversor, fazendo a forma de onda de geração de energia solar por completo, esse sistema gerou menos no dia, mas a potência instalada é 22% menor do que o sistema 2.

Mostra-se também o clipping, que seria uma limitação de potência ativa dos inversores, não deixando que ultrapasse os parâmetros de fábrica e de homologação junto à concessionária.

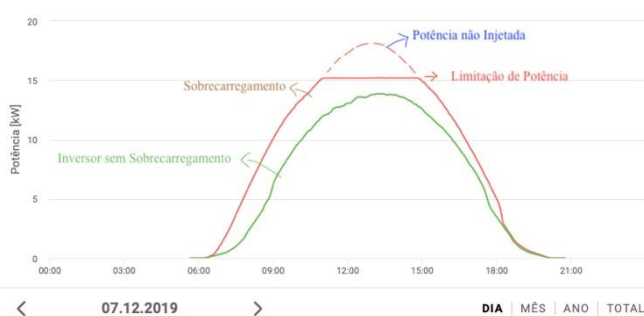


Figura 6. Demonstração em gráfico de Clipping e Sobrecarregamento. [Autor]

Foi de suma importância essa captação dos dados e como veremos na tabela V os dados de geração de energia elétrica anual, *performance ratio* e índice de sobrecarregamento.

Tabela V. Dados reais dos Sistemas de Energia Solar.

Número da Instalação	Geração Anual MWh	Pr	Is
1	21,01	0,686	5,6%
2	26,75	0,909	36,26%
3	10,44	0,906	32%
4	21,99	0,881	-20%

Com esses dados foi possível afirmar que a análise de sobrecarregamento é essencial para qualquer geração, por se estimar a eficiência do sistema.

No sistema 1 a *performance ratio* deu bem abaixo dos outros sistemas por se tratar de uma instalação onde tinha limitações técnicas para a execução da microgeração e um alto consumo da unidade do cliente. Um dos motivos é a orientação do sistema que está orientado a noroeste e com uma inclinação em torno de 7 graus, bem abaixo do requisitado para sistemas instalados em Santa Catarina. Outro ponto bem importante é a limitação de investimento que fez com que o cliente oferecesse apenas um local para a instalação, em um telhado onde proporciona nos equinócios sombreamento a partir das 15:30. Mas o projeto foi projeto para ter a melhor eficiência no cliente, fazendo que por metro quadrado tivesse uma geração razoável.

A influência da temperatura ambiente externa sobre os módulos é parte fundamental dos estudos, porque de forma genérica quanto mais frio, maior a tensão de corrente contí-

nua (CC) e consequentemente quanto mais calor menor a tensão CC, tudo em relação a tensão de circuito aberto (Voc) dos módulos.

Na figura 7 pode se observar um comparativo entre o sistema 2 e 4 no dia de maior geração do ano de 2019.

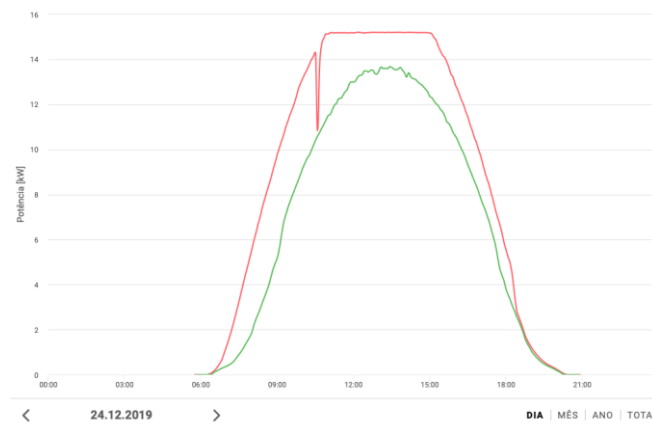


Figura 7. Comparativo de Produção. [6]

No comparativo pode-se observar que a linha vermelha é representada o sistema 2 com inversor de 15kW e com carga instalada de 20,44kWp, que possui uma perda por limitação de potência. Caso tivesse inversor com maior capacidade supriria a perda. A linha verde representa o sistema com inversor de 20kW e com carga instalada de 16kWp, com uma reserva para ampliação futura.

A diferença de preço dos equipamentos, inversor solar fotovoltaico, no mês de abril de 2021 é de apenas R\$ 370,00 (trezentos e setenta reais), custo que com o ganho de produção pode ser diluído.

Em questão de proteção, a temperatura interna do equipamento mesmo com sobrecarregamento não altera, mantendo-se eficiente devido à ventilações forçadas e da robustez dos equipamentos Fronius. A temperatura em equipamentos eletrônicos é o maior vilão de perda de eficácia e queima de componentes, por isso é peça chave na pré análise.

Em comparativo de sistemas que possui um fator de sobrecarregamento planejado e com pouco aumento de potência instalada o sistema sai com uma *performance* elevada, conforme no sistema com Is de -20%, mostra que a geração ficou muito próxima do cálculo teórico e ainda com sobras no inversor fotovoltaico, deixando assim “gap” para aumentar a geração de energia.

VIII. CONCLUSÕES

Tendo em vista os aspectos mencionados no trabalho foi possível ter uma análise sucinta de como funciona a geração de energia solar, a influência que a localização, e posicionamento das placas de captação, tornam-se um fator decisivo no projeto, desde temperatura ambiente média anual até a região instalada no Brasil, que neste projeto foi a região sul.

Este artigo tem o intuito de ajudar a comunidade de energia solar fotovoltaica e outros temas relacionados ao sobrecarregamento do inversor, isso é essencial para ter uma geração eficiente. Com isso ser um fator decisivo na escolha do sistema para que se tenha um inversor robusto que possa

suportar a elevação de potência e que consiga reduzir o custo nivelado da energia da sigla em inglês LCOE. Além disso se tornar uma referência de dados, pois os mesmos são gerados pelo *Software* de gerenciamento *SolarWeb* da Fronius, onde tem um grau de fidelidade e confiabilidade alto e com sistemas instalados em várias localidades.

Como na energia solar tem muita área a ser analisada, sugere-se como alternativa para estudos futuros a ser realizado em larga escala, que seria a verificação do máximo sobre-carregamento por nível de potencia do inversor e região de instalação, assim ajudando a comunidade a ter gerações eficientes daqui 10 a 15 anos e não ter uma perda por mal dimensionamento, outro estudo possível é achar um algoritmo alternativo que faça melhor gerenciamento do clipping e talvez redirecionando essa energia perdida para equipamentos de aquecimento, refrigeração ou afins como também aplicar em série em todos inversores em suas placas para futura aplicações.

IX. AGRADECIMENTOS

Agradecer a todos familiares e amigos que me incentivaram neste período de conclusão de curso de especialização, também agradecer a Fronius sempre pelo ótimo apoio que tem feito a empresa Reus Engenharia e também pela parceria formada aos longos dos últimos anos e sendo um dos selecionados do programa *Fronius Solution Partner – Fronius Brasil*.

X. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico. Histórico do Consumo de Energia Elétrica Brasil, 2021. Disponível em: < http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/carga_energia.aspx>. Acesso em 18 de abril de 2021.
- [2] ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico. Histórico de Geração de Energia Elétrica Brasil, 2021. Disponível em: < http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao_energia.aspx>. Acesso em 18 de abril de 2021.
- [3] ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. Sistema de Informações Geração da ANEEL – SIGA, 2021. Disponível em: < <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjo1Njc4OGYyYjYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NmM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZh-Mi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBlMSIsImMiOiR9>>. Acesso em 18 de abril de 2021.
- [4] Villalva, Marcelo Gradella, Energia Solar Fotovoltaica: conceitos e aplicações, São Paulo: Érica, 2012, pp. 31-56.
- [5] IRENA, International Renewable Energy Agency. Solar Energy, 2021. Disponível em: < <http://www.irena.org/solar>>. Acesso em 18 de abril de 2021.
- [6] SOLARWEB, Sistema de Gerenciamento Fronius, 2021. Disponível em :<solarweb.com/reusengenharia>. Acesso em 18 de abril de 2021.
- [7] Abdelfatah Ali, David Raisz and Karar Mahmoud, "Optimal oversizing of utility-owned renewable DG inverter for voltage rise prevention in MW distribution systems" in *Elsevier. 2018 International Journal of Electrical Power & Energy Systems*.
- [8] ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico. Carga e Geração Brasil, 2021. Disponível em: < <http://www.ons.org.br/paginas/energia-geracao/carga-e-geracao>>. Acesso em 20 de abril de 2021.