



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

CAÍQUE GONÇALVES FERNANDES

**ESTUDO COMPARATIVO DO USO DE INVERSOR STRING
E MICROINVERSORES NA GERAÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA EM INSTALAÇÕES FOTOVOLTAICAS**

Uberlândia

2020

CAÍQUE GONÇALVES FERNANDES

**ESTUDO COMPARATIVO DO USO DE INVERSOR STRING E
MICROINVERSORES NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM
INSTALAÇÕES FOTOVOLTAICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro, Curso de Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia Elétrica (FEELT), Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

Orientador: Prof. Dr. Luciano Coutinho Gomes

Uberlândia

2020

CAÍQUE GONÇALVES FERNANDES

**ESTUDO COMPARATIVO DO USO DE INVERSOR STRING E
MICROINVERSORES NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM
INSTALAÇÕES FOTOVOLTAICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado ao curso de Engenharia Elétrica, da Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, como item obrigatório parcial ao título de bacharel em engenharia elétrica.

Uberlândia, 27 de novembro de 2020.

BANCA EXAMINADORA

Augusto Wohlgemuth Fleury Veloso da Silveira

Carlos Eduardo Tavares

Marcos José de Moraes Filho

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus.

Agradeço o apoio da minha família, a Júlia e todos os meus amigos que me apoiaram nessa trajetória.

Agradeço meu orientador pela paciência, atenção e parceria.

Agradeço a todos aqueles que me apoiaram de alguma forma e me deram forças.

“Que a cada dia se consiga forças para viver o próximo.”

RESUMO

O estudo terá como objetivo fazer a análise e comparação de sistemas fotovoltaicos, um com um inversor string (convencional) e outro com microinversores, em relação ao projeto e o meio comercial, levando em consideração tanto os custos e tempo de retorno quanto a logística, segurança e eficiência dos inversores. A energia solar fotovoltaica é a energia obtida através da conversão direta da luz em eletricidade (Efeito Fotovoltaico), os sistemas fotovoltaicos utilizam painéis solares, compostos por várias células fotovoltaicas, para fazer essa conversão. A energia gerada em corrente contínua pelos painéis precisa ser transformada em corrente alternada, processo que é feito através dos inversores. Hoje no mercado existem dois tipos de inversores principais, os inversores string e os microinversores, ambos possuem a mesma finalidade, mas características diferentes que fazem com que um possa ser mais vantajoso que o outro dependendo do projeto. Uma análise de caso, utilizando um projeto com cada tipo de inversor em Uberlândia, será feita comparando os dois sistemas tendo como foco cada inversor em suas características, diferenças de geração, manutenção, preço, garantia, modelo, segurança, montagem e seus benefícios diante o projeto como um todo.

Palavras chave: Fotovoltaico, inversores, microinversores, painéis fotovoltaicos.

ABSTRACT

The study aims to make an analyze and compare photovoltaic systems, one with string inverter (conventional) and one with microinverters, in relation to the project and the commercial environment, taking into consideration both costs and turnaround time as well as logistics, safety and efficiency of inverter. Photovoltaic solar energy is the energy obtained through the direct conversion of light into electricity (Photovoltaic Effect), photovoltaic systems use solar panels, composed of several photovoltaic cells, to make this conversion. The energy generated in direct current by the panels needs to be transformed into alternating current, which is done through the inverters. In the market today there are two main inverter types, string inverters and microinverters, both have the same purpose, but different characteristics that make one can be more advantageous than the other depending the project. A case analysis, using a project with each type of inverter in Uberlândia, will be made comparing the two systems focusing each inversor on their characteristics, generation differences, maintenance, price, warranty, model, safety, assembly and their benefits on the project as one all.

Keywords: Photovoltaic, inverters, microinverters, photovoltaic panels.

Lista de figuras

Figura 1 - Matriz elétrica brasileira.	11
Figura 2 - Ranking de investimento e potência acumulada no mundo.....	12
Figura 3 - Mapa solarimétrico anual do Brasil.....	13
Figura 4 - Movimento de translação terrestre ao redor do sol.....	14
Figura 5 - Ilustração do ângulo azimutal.....	15
Figura 6 - Trajetória do sol durante verão e inverno.....	15
Figura 7 - Ilustração dos ângulos de um módulo fotovoltaico.....	16
Figura 8 - Exemplo esquemático de um sistema ‘on-grid’.	17
Figura 9 - Exemplo esquemático de um sistema ‘off-grid’.....	18
Figura 10 - Efeito de queda de geração devido a sombreamento.....	20
Figura 11 - Aplicativo de monitoramento, geração por hora e diária.	21
Figura 12 - Aplicativo de monitoramento, geração mensal e anual.	21
Figura 13 - Aplicativo de monitoramento, geração por módulo.	22
Figura 14 - Foto aérea de um sistema fotovoltaico 1.	22
Figura 15 - Foto aérea de um sistema fotovoltaico 2.	23
Figura 16 - Curvas de geração por módulo.	23
Figura 17 - Inversores string com instalação de eletrodutos expostos.	24
Figura 18 - Instalação de sistema fotovoltaico utilizando microinversores.	25
Figura 19 - Irradiação solar diária média mensal no primeiro projeto.....	26
Figura 20 - Irradiação Solar no Plano Inclinado.	26
Figura 21 - Módulos instalados do projeto 1 sobre o telhado.	29
Figura 22 - Microinversor APS YC500.	31
Figura 23 - Módulos instalados do projeto 2 sobre a estrutura.	37
Figura 24 - Foto de satélite da instalação.	37
Figura 25 - Inversor ABB UNO-DM-4.0-TL-PLUS-SB.	38
Figura 26 - Caixa com DPSs projeto 2.....	38

Lista de tabelas

Tabela 1: Valores referentes a melhor inclinação para os módulos fotovoltaicos.[8].....	16
Tabela 2: Dimensões e pesos dos inversores.....	19
Tabela 3: Consumo de energia residencial sem a usina fotovoltaica.	27
Tabela 4: Características elétricas e mecânicas dos módulos fotovoltaicos.....	28
Tabela 6: Geração de energia mensal do projeto 1 utilizando microinversores.....	33
Tabela 7: Consumo de energia residência sem a usina fotovoltaica.	35
Tabela 8: Características elétricas e mecânicas dos módulos fotovoltaicos.....	36
Tabela 9: Características técnicas do inversor utilizado.....	39
Tabela 10: Geração de energia mensal do projeto 2 utilizando inversor string.	40
Tabela 11: Comparativo econômico geral de equipamentos e geração.....	42

Lista de siglas

UFU – Universidade Federal de Uberlândia

FEELT – Faculdade de Engenharia Elétrica

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

CC – Corrente Continua

CA – Corrente alternada

MPPT- Maximum Power Point Tracking

MLPE – Module Level Power Electronics

TRS - Tempo de Retorno Simples

DPS – Dispositivo de Proteção contra Surtos

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1. OBJETIVOS	10
1.2. METODOLOGIA	10
1.3. PANORAMA DA ENERGIA FOTOVOLTAICA NO BRASIL E MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA.....	10
2. CONCEITOS BÁSICOS	12
2.1. RADIAÇÃO E IRRADIAÇÃO	12
2.2. ORIENTAÇÃO DOS MÓDULOS.....	14
2.3. SISTEMAS ‘ON-GRID’ E ‘OFF-GRID’	16
3. DIFERENÇA PRÁTICA ENTRE INVERSORES STRING E MICROINVERSORES	19
4. PROJETOS	26
4.1. PROJETO RESIDENCIAL COM MICROINVERSORES	26
4.1.1. Irradiação solar do local da instalação.....	26
4.1.2. Descrição do consumo do cliente	27
4.1.3. Dimensionamento dos módulos fotovoltaicos.....	28
4.1.4. Dimensionamento dos microinversores.....	29
4.1.5. Custo do projeto	32
4.1.6. Geração total no período do estudo	33
4.1.7. Análise econômica.....	34
4.2. PROJETO RESIDENCIAL COM INVERSORES STRING.....	34
4.2.1. Irradiação solar do local da instalação.....	35
4.2.2. Descrição do consumo do cliente	35
4.2.3. Dimensionamento dos módulos fotovoltaicos.....	36
4.2.4. Dimensionamento do inversor	38
4.2.5. Custo do projeto	39
4.2.6. Geração total no período do estudo	40
4.2.7. Análise econômica.....	41
5. COMPARATIVO ECONÔMICO GERAL	41
6. CONCLUSÃO	42

1. INTRODUÇÃO

1.1. OBJETIVOS

O estudo tem como objetivo principal comparar os dois modelos de inversores, inversor string e microinversor projetados para seus respectivos projetos, a fim de demonstrar as diferenças entre ambas, explorando não só a parte técnica, mas principalmente o lado comercial, financeiro e salientando a qualidade de vida do cliente.

Para este trabalho serão destacadas as vantagens e desvantagens de cada inversor mediante ao seu projeto e comparando com o outro. Além disso quais os fatores que podem influenciar na escolha de um dos tipos de inversores.

1.2. METODOLOGIA

Para a análise dos dois tipos de inversores serão comparadas duas usinas já em operação em Uberlândia, assim o efeito da radiação será o mesmo e ambos possuem faixas de potência semelhantes.

As duas usinas tiveram de julho de 2019 até janeiro de 2020 como faixa de comparação. A usina que utilizada inversor string não possui monitoramento de dados enquanto a que utiliza microinversores possui monitoramento, mas os dados foram retirados das contas de energia do cliente. Assim serão utilizados dados reais para a composição deste trabalho.

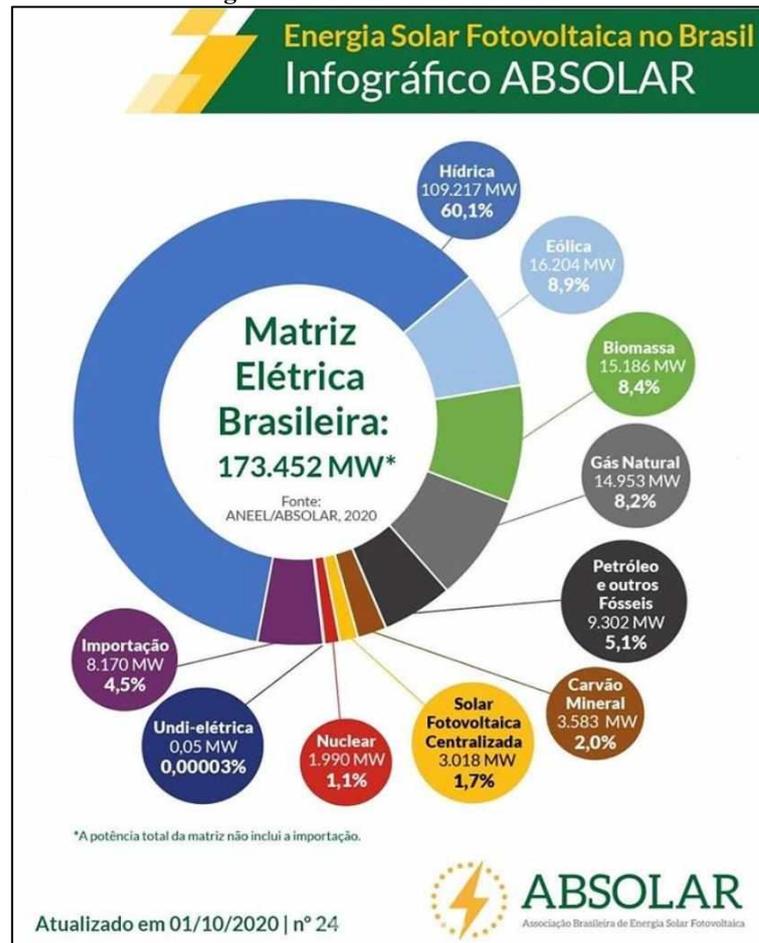
1.3. PANORAMA DA ENERGIA FOTOVOLTAICA NO BRASIL E MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

Embora a matriz elétrica brasileira seja predominantemente renovável, com forte base hidrelétrica, a ampliação da capacidade de geração se dará com importante contribuição da fonte eólica e, em especial, da fonte solar fotovoltaica.

Por muitos anos a matriz energética brasileira se manteve estável em relação a porcentagem de cada fonte de produção de energia, com o início do mercado fotovoltaico em 2012 a capacidade instalada das outras fontes foram se mantendo as mesmas e entre 2012 e 2016 a capacidade instalada de energia solar aumentou 1200% [1], de 2 para 24MW sendo a maior em crescimento, mas ainda a menor em valores absolutos.

Com dados atualizados em 01/10/2020 [2] as fontes fotovoltaicas representam 1,7% do total da energia gerada no país sendo que em Julho de 2019 representavam 1,2%, com um aumento rápido de 0,5% mostra o grande potencial de expansão como mostra a Figura 1.

Figura 1- Matriz elétrica brasileira.



Fonte: Página web da ABSOLAR. [2]

China, Estados Unidos, Japão e Alemanha estão no topo da lista mundial dos países com a maior potência instalada de energia fotovoltaica, como mostra a Figura 2, e a produção da própria energia elétrica usando painéis solares se espalhou também por quase toda a Europa. Mesmo sendo uma das maiores produtoras de energia fotovoltaica a Alemanha tem o índice de radiação solar 40% menor que o índice da região menos ensolarada do Brasil isso mostra que a incidência de sol no Brasil é muito maior e o potencial de mercado é enorme.

Em 2012 o Brasil deu seus primeiros passos para o mundo fotovoltaico e através da geração distribuída e por sistemas conectados à rede das distribuidoras casas e empresas conseguem reduzir o valor da conta de energia em até 95%.

O setor vem crescendo mais de 200% ao ano e a quantidade de novos sistemas instalados e conectados à rede só no primeiro trimestre de 2019 foi de 13.941, mais do que 134,97% em relação ao mesmo período de 2018, em 2018 instalou 1,2 GW totalizando 2,4 GW de capacidade instalada acumulada.

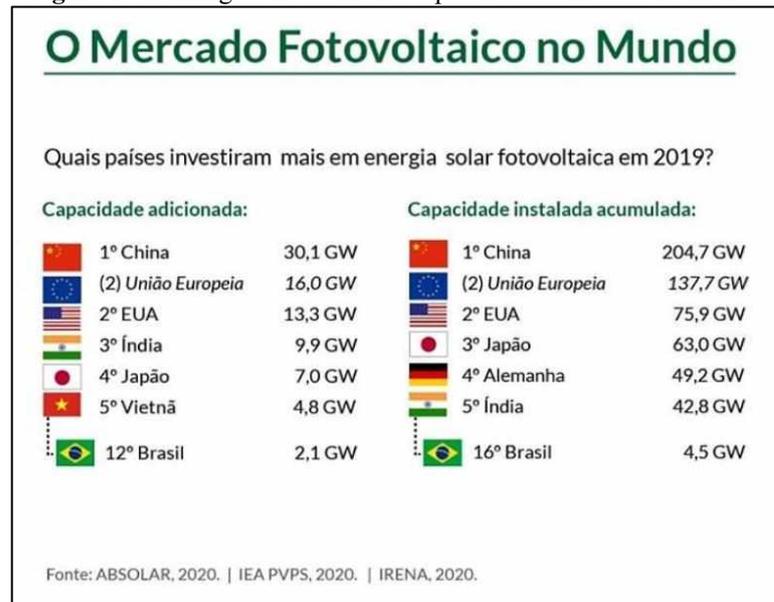
Figura 2- Ranking de investimento e potência acumulada no mundo.

Figura: Página web da ABSOLAR. [2]

Tendo em vista todas as vantagens da energia fotovoltaica uma das melhores é o consumo no próprio ponto de geração, sem necessitar de linhas de distribuição e transmissão o custo é bem menor, já que o maior custo da energia são os custos das próprias linhas, e ajuda a melhorar a eficiência energética.

Hoje no mercado os módulos fotovoltaicos, 80% feitos com silício cristalino, têm uma faixa de eficiência em torno de 15 a 18% mostrando que, mesmo com pouco, se dá uma geração de excelente qualidade e é o que motiva pesquisas que visam melhorar esse rendimento.

Uma fonte de energia que pode ser explorada em praticamente todo território nacional, sem necessidade de ter um elemento específico, como água ou vento, já que há uma grande quantidade de insolação solar em sua maior parte.

2. CONCEITOS BÁSICOS

2.1. RADIAÇÃO E IRRADIAÇÃO

O aproveitamento da energia gerada pelo Sol tanto como fonte de calor quando de luz, é hoje, sem sombra de dúvidas, uma das mais promissoras para se enfrentar os desafios do novo milênio. O sol fornece anualmente $1,5 \times 10^{18}$ kWh de energia para a atmosfera terrestre, correspondendo a 10 mil vezes o consumo mundial de energia no mesmo período. A radiação solar, ou insolação, constitui-se numa inesgotável fonte energética, onde há um enorme

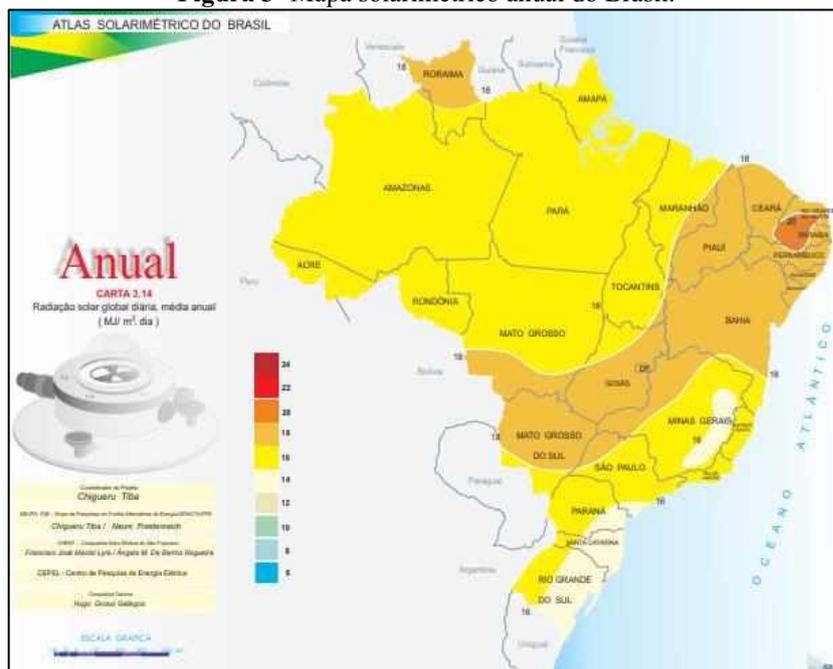
potencial de utilização por meio de sistemas de captação e conversão em outra forma de energia (Térmica, elétrica, etc.).

Parte da radiação emitida pelo Sol é refletida (por nuvens, gelo, oceanos), perdida por difusão ou absorvida por moléculas de oxigênio e ozônio da atmosfera. No entanto, mais de 50% chega à superfície, e é essa fração de radiação que chega à superfície que é aproveitada pelo sistema fotovoltaico.

Irradiação é a propagação de energética sem a necessidade de meio material, é a quantidade de radiação solar em determinado intervalo de tempo medida em watt por hora por metro quadrado ($\frac{Wh}{m^2}$). O Brasil é um dos poucos países com maior incidência de raios solares ao ano, especialmente os estados da região Nordeste, que apresenta os maiores valores de irradiação solar global. Entre o centro da Bahia e o noroeste de Minas Gerais, a média anual é de 6,5kWh/m²/dia e no país a média fica entre 4,5kWh/m² e 6,3kWh/m², de acordo com dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar [3].

Para um dimensionamento de projetos com mais detalhes e sem o uso de aproximações o site <http://www.cresesb.cepel.br> [4] possui um banco de dados com informações de centros de pesquisa atualizados do Brasil, e fornece a insolação na exata coordenada geográfica solicitada. Site esse utilizado para ajudar no dimensionamento dos dois projetos aqui apresentados.

Figura 3- Mapa solarimétrico anual do Brasil.

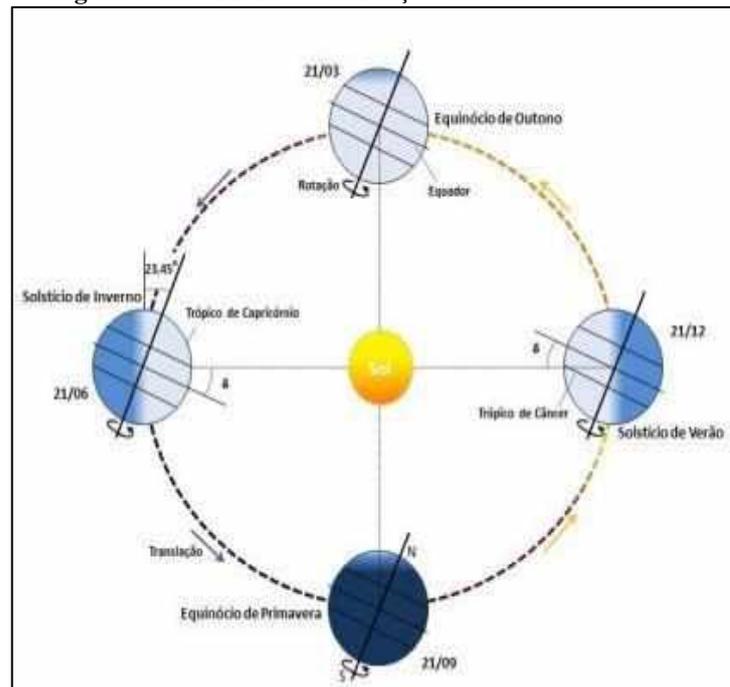


2.2. ORIENTAÇÃO DOS MÓDULOS

A quantidade de eletricidade produzida por uma usina fotovoltaica está diretamente relacionada com a radiação solar disponível. Assim, quanto maior a disponibilidade dos recursos solares maior será o potencial da produção de eletricidade. Os módulos fotovoltaicos têm a necessidade de serem instalados segundo a direção dos raios solares. A produção dos módulos é máxima quando se encontram instalados perpendicularmente em relação aos raios solares.

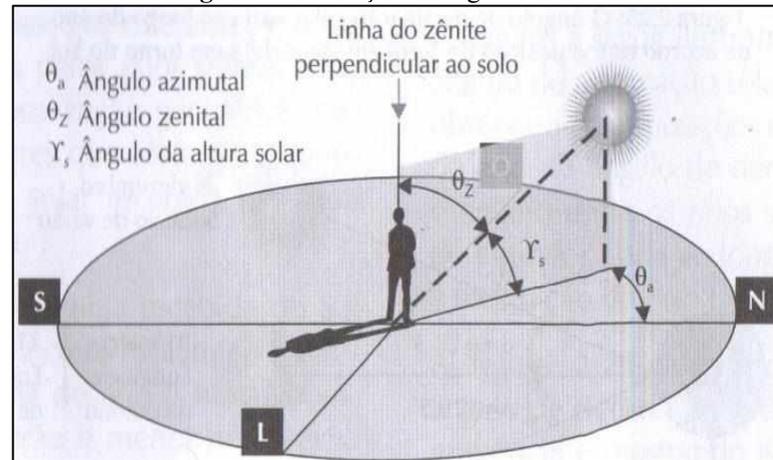
A orientação do sistema tem como objetivo maximizar a radiação solar incidente nos módulos. No hemisfério sul as instalações devem ser direcionadas para o norte para ter o melhor aproveitamento e melhor geração. O melhor ângulo de inclinação para os painéis é um valor próximo da latitude da instalação, em instalações é comum o uso da própria latitude.

Figura 4- Movimento de translação terrestre ao redor do sol.



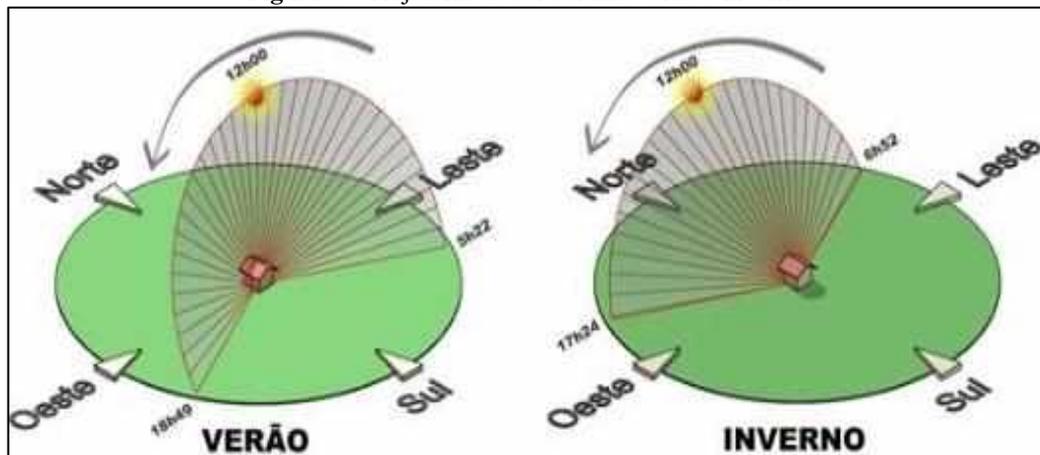
Fonte: Pesquisa da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. [6]

O ângulo azimutal é uma forma de medir o ângulo do sol com o Norte geográfico. Esse ângulo influencia a potência máxima gerada ao longo do dia. A maioria das usinas fotovoltaicas não possui um sistema de rastreamento do sol. Então não é possível otimizar ao máximo a potência gerada, já que parte dela será refletida. Assim, em sistemas sem rastreamento do sol, somente é possível otimizar a inclinação da placa.

Figura 5 - Ilustração do ângulo azimutal.

Fonte: Livro Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações. [7]

Para aqueles que não têm a face do telhado ou a orientação do sistema não é voltada para o Norte a geração da energia solar fotovoltaica possui perdas, mas não críticas ao ponto de inviabilizar a instalação do sistema. As perdas com o sistema com face Nordeste e Noroeste variam entre 3% e 5%, para um sistema com face Leste ou Oeste as perdas variam entre 6% e 8% e com sistemas com face para o Sul as perdas são maiores, mas não o suficiente para inviabilizar a instalação do sistema.

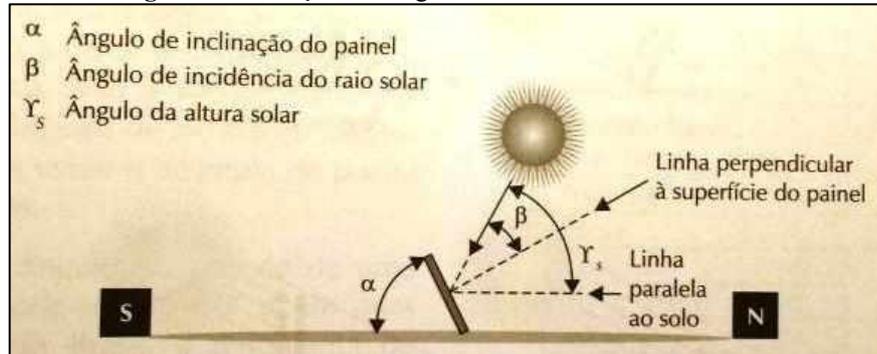
Figura 6 - Trajetória do sol durante verão e inverno.

Fonte: Página web da ABSOLAR. [2]

Além da orientação do sistema a angulação dos módulos solares visa otimizar a geração de energia, para uma melhor geração os raios solares devem incidir perpendicularmente com os módulos, como foi dito anteriormente. Como a maioria das instalações não possuem um sistema que segue a posição de sol é necessário estabelecer um ângulo que aproveite ao máximo essa movimentação. O ângulo de incidência dos raios solares depende da altura do Sol em

referência a uma reta perpendicular à face do módulo fotovoltaico. Conforme visto na figura 7 o ângulo para o melhor aproveitamento será quando $\beta=0$, e conseqüentemente, $\gamma_s=\alpha$.

Figura 7- Ilustração dos ângulos de um módulo fotovoltaico.



Fonte: Pesquisa da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. [6]

O livro ‘Energia Solar Fotovoltaica’, escrito por Marcelo Gradella Villalva, de projetos de sistemas fotovoltaicos usa como referência para a escolha do ângulo de inclinação do módulo (α) a seguinte tabela:

Tabela 1: Valores referentes a melhor inclinação para os módulos fotovoltaicos.[8]

Latitude do local de instalação	Ângulo de inclinação recomendado
0° a 10°	$\alpha=10^\circ$
11° a 20°	$\alpha=\text{latitude}$
21° a 20°	$\alpha=\text{latitude}+5^\circ$
31° a 40	$\alpha=\text{latitude}+10^\circ$
40° ou mais	$\alpha=\text{latitude}+15^\circ$

A angulação mínima de 10° é necessária tanto para a captação de energia solar quanto para o escoamento de água e evitar o acumula de sujeira nos módulos, assim facilita a limpeza e não impacta a eficiência da geração.

2.3. SISTEMAS ‘ON-GRID’ E ‘OFF-GRID’

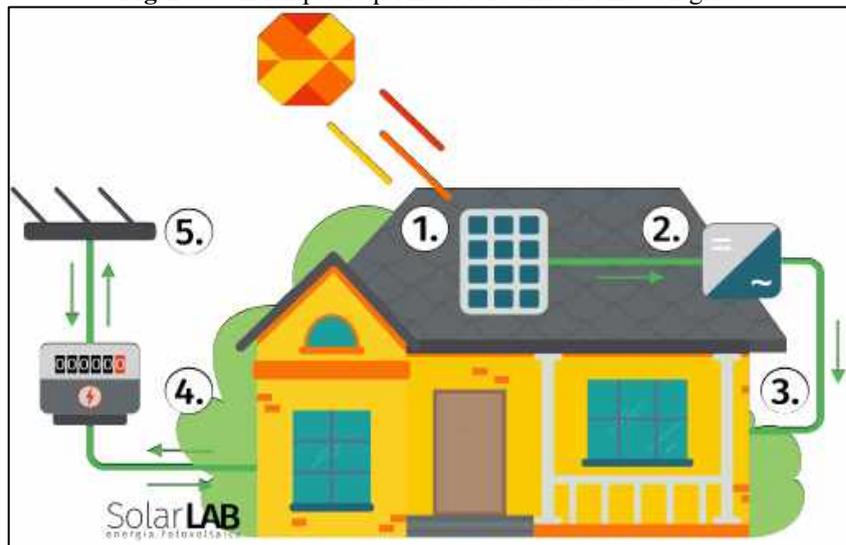
Hoje no mercado os sistemas fotovoltaicos são divididos em dois principais sistemas: sistemas ‘on-grid’ e sistemas ‘off-grid’. A diferença básica entre os dois é que o sistema ‘on-grid’ é interligado com a rede elétrica e o sistema ‘off-grid’ é independente e não possui essa ligação.

O sistema ‘on-grid’, ilustrado na figura 8, é interligado a rede e, portanto, quando não há energia na rede, seja por falha ou alguma interrupção para manutenção, o sistema também

interrompe a geração automaticamente por motivos de segurança. Além disso há a necessidade da instalação de um medidor bidirecional que faz a medição de energia de entrada (energia consumida) no imóvel e energia de saída (energia injetada) na rede, assim será descrito em detalhes o consumo e a injeção de energia na fatura da conta de energia.

O consumo de energia do sistema fotovoltaico é imediato, ou seja, durante o dia a geração é consumida por todos os equipamentos ligados naquele momento. Caso haja uma geração superior a esse consumo, chamada de energia excedente, é passada para rede e contabilizada pelo padrão bidirecional e caso essa geração não seja suficiente ou na parte da noite, quando não há geração de energia pelo sistema fotovoltaico, é utilizada a energia da rede normalmente.

Figura 8 - Exemplo esquemático de um sistema ‘on-grid’.



Fonte: Página web da Solar Lab Energia Fotovoltaica. [9]

1. Os painéis solares recebem a luz solar e produzem energia elétrica.
2. Os painéis são conectados entre si e vão para o inversor, que tem o papel de converter a energia dos módulos (Corrente Contínua – CC) em energia que pode ser utilizada no imóvel (Corrente Alternada – CA).
3. O inversor vai conectado ao quadro de energia e através dele a energia é distribuída para todo o imóvel.
4. O medidor convencional de energia será trocado para o modelo bidirecional, que é capaz de fazer a leitura tanto do consumo quanto a injeção de energia excedente na rede.

5. Enquanto o imóvel estiver consumindo, a rede estará fornecendo energia e o medidor marcando consumo. Quando o sistema de geração estiver produzindo mais energia do que está sendo consumido, esta será injetada na rede e o medidor marcará injeção. No final do mês é cobrado a diferença de valores. Caso a injeção tenha sido superior ao consumo, créditos serão gerados e podem ser consumidos em até 5 anos (de acordo com a Resolução 482/687 da ANEEL).

O sistema 'off-grid', ilustrado na figura 9, não possui a mesma característica de consumo imediato e sim o sistema dependente de bancos de baterias onde a energia é armazenada e utilizada posteriormente.

Figura 9 - Exemplo esquemático de um sistema 'off-grid'.



Fonte: Pesquisa da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. [6]

1. Os painéis solares recebem a luz solar e produzem energia elétrica.
2. Os painéis são conectados entre si e vão para o controlador de carga que garantem o correto abastecimento das baterias evitando sobrecargas e descargas profundas, aumentando sua vida útil.
3. As baterias armazenam a energia elétrica para ser utilizada nos momentos em que o sol não esteja presente e não haja outras fontes de energia.
4. O inversor tem o mesmo papel nesse sistema de converter a energia dos módulos (Corrente Contínua – CC) em energia que pode ser utilizada no imóvel (Corrente Alternada – CA) e vai conectado ao quadro de energia e através dele a energia é distribuída para todo o imóvel.

Além desses dois principais existem os sistemas chamados híbridos que possuem características das duas instalações, sendo interligados com a rede e possuindo bancos de baterias. Isso garante que, em momentos de falta de energia, as cargas prioritárias continuem a ser alimentadas. Portanto, além de funcionarem como um fotovoltaico convencional, funcionam também como fonte ininterrupta de energia (no-break).

Atualmente, esse tipo de inversor é utilizado em pequena escala no país já que não possui uma norma clara e específica para tal instalação, considerando somente os requisitos da ABNT NBR 16149. Contudo, diversos outros critérios específicos são importantes para o adequado funcionamento do equipamento. Assim, a criação de uma norma é de suma importância.

3. DIFERENÇA PRÁTICA ENTRE INVERSORES STRING E MICROINVERSORES

O objetivo dos dois tipos de inversores é o mesmo, converter a energia em corrente contínua para energia em corrente alternada, mas mesmo tendo essa mesma finalidade possuem características bem diferentes que são levadas em consideração a cada projeto.

- **Dimensões e pesos** – A primeira diferença visível entre esses tipos de inversores é que o inversor string é mais robusto tendo dimensões e pesos muito maiores que os microinversores. Por exemplo, o inversor string UNO-DM-4.0-TL-PLUS-SB e o microinversor APS-YC500, que serão utilizados nos projetos para comparação neste trabalho, possuem as seguintes descrições:

Tabela 2: Dimensões e pesos dos inversores.

	UNO-DM-4.0-TL-PLUS-SB	APS-YC500
Peso	18 kg	2,5 kg
Largura	606 mm	221 mm
Altura	254 mm	167 mm
Profundidade	481 mm	29 mm

- **Vida útil** – Um sistema fotovoltaico conectado à rede tem uma vida útil de 30 a 40 anos, sendo que a maioria dos módulos fotovoltaicos têm garantia de 25 anos para produção de pelo menos 80% da potência nominal. Já os inversores string possuem uma vida útil esperada de 10 a 15 anos, com uma média de 5 anos de garantia, então, em todo projeto é considerada

no mínimo uma troca de inversores e isso é repassado no valor do projeto para cálculo do payback. Os microinversores possuem uma vida útil maior com média de 25 anos e com a garantia de até 25 anos.

- **Conexões** – Inversores string possuem conexões de entradas MPPT independentes, mas em sua maioria limitados com uma até três entradas, para um conjunto de módulos em série. Microinversores possuem entre uma e quatro conexões de entradas independentes, tendo apenas um módulo por entrada, utilizando a tecnologia MLPE (Module Level Power Electronics).

- **Confiabilidade** – Problemas técnicos e falhas em sistemas fotovoltaicos são sempre possíveis, em caso de problemas em um inversor string todo o sistema seria interrompido até a resolução do problema ou até a troca do inversor. Com o microinversor um problema não interromperia todo o sistema, haveria apenas uma baixa na geração dos módulos conectados à ele, diminuindo assim as possíveis perdas.

- **Sombreamento** – Um dos piores fatores que diminuem a geração de energia pelos módulos é o sombreamento. Como dito, os inversores string possuem entradas MPPT limitadas, em cada entrada são conectados módulos que estão ligados em série formando assim uma string. Quando um dos módulos é sombreado todos os outros, na mesma string, também são afetados na mesma proporção havendo assim perdas bem maiores.

Os microinversores possuem entradas independentes e a geração a nível de módulo pela tecnologia MLPE que controla cada módulo individualmente, então o sombreamento em um módulo não afeta a produção dos demais ligados ao mesmo microinversor e nem no resto do sistema, como mostra a Figura 10, diminuindo as perdas por sombreamento. De acordo com o Laboratório Nacional de Energia Renovável dos EUA (NREL), este efeito pode fazer com que o sistema produza até 12% a mais de energia por ano.

Figura 10 - Efeito de queda de geração devido a sombreamento.



Fonte: Montagem feita pelo autor.

- Monitoramento – Por conta das conexões independentes os microinversores possuem como recurso o monitoramento dos dados do sistema também independentes. Com esse recurso é possível fazer cálculos, verificar a geração momentânea, diária, mensal, anual e total de cada módulo e de todo o sistema pela internet acessando a nuvem e o aplicativo de monitoramento.

Figura 11- Aplicativo de monitoramento, geração por hora e diária.



Fonte: Montagem feita pelo autor.

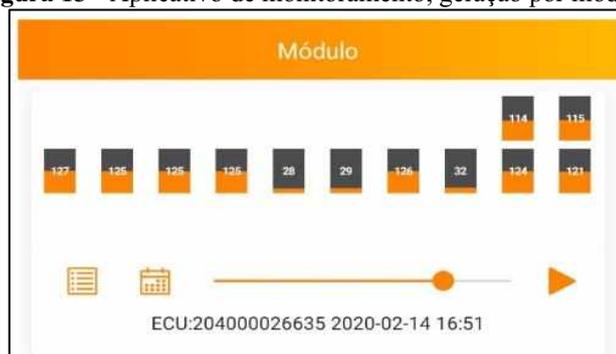
Figura 12 - Aplicativo de monitoramento, geração mensal e anual.



Fonte: Montagem feita pelo autor.

Além de visualizar a geração o recurso possibilita a identificação de possíveis defeitos em algum módulo que tenha comportamentos estranhos, como uma baixa geração em um módulo enquanto não há sombras e todos os outros estão com ótima geração.

Figura 13 - Aplicativo de monitoramento, geração por módulo.



Fonte: Montagem feita pelo autor.

Inversores string também possuem recurso de monitoramento, mas com informações limitadas já que não possuem o monitoramento individual dos módulos e sim o de toda a string. Caso haja algum comportamento estranho na geração geral da string a identificação de algum defeito em algum módulo, quando não se tem certeza, é feita apenas realizando a verificação e medição de módulo por módulo.

- Flexibilidade – Tendo um limite de conexões MPPT e a dependência dos módulos nos sistemas com inversor string também possuem uma limitação na orientação e inclinação de instalação dos módulos, caso faça a instalação de um módulo em uma área ruim isso irá afetar toda à string, então é necessário garantir a instalação de todos os módulos com a mesma orientação e mesma inclinação.

Figura 14 - Foto aérea de um sistema fotovoltaico 1.



Fonte: Foto tirada pelo autor.

Microinversores podem ter até quatro módulos independentes conectados a ele possibilitando a instalação de cada módulo em orientações e inclinações diferentes, tendo assim

uma maior flexibilidade de instalação, excelente para telhados que possuem vários níveis e recortes.

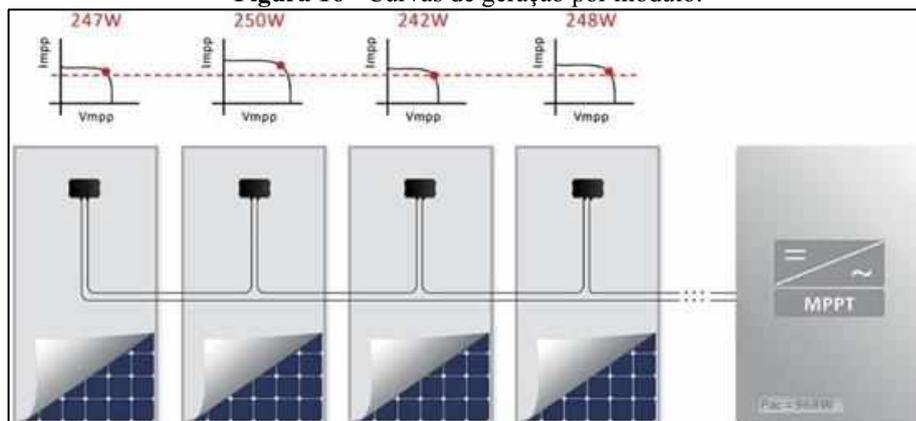
Figura 15 - Foto aérea de um sistema fotovoltaico 2.



Fonte: Foto tirada pelo autor.

- **Modularidade** – Assim como as orientações e inclinações, diferentes módulos em uma mesma string também podem causar perdas na geração, por isso é sempre recomendado a instalação de módulos exatamente iguais em sistemas com inversor string. Módulos de menor potência diminuem a produção dos demais e módulos de maior potência vão ter um custo maior e não vão gerar como esperado, tendo assim um gasto maior em vão. O exemplo da figura 16 mostra quatro módulos diferentes em uma string, mas a potência de pico de todos acompanham o módulo de 242W, ou seja, o de menor índice de geração.

Figura 16 - Curvas de geração por módulo.



Fonte: Montagem feita pelo autor.

As perdas por diferença dos módulos dificultam um possível aumento do sistema, com o avanço rápido da tecnologia a tendência é se ter módulos mais potentes e a produção dos de menor potência parar, por isso os módulos instalados hoje podem não ser mais fabricados daqui a alguns anos. Módulos de 240W, por exemplo, foram muito utilizados há 3 anos atrás e hoje

não são mais produzidos, assim, os sistemas com esses módulos que desejam aumentar sua geração terão que instalar módulos de 330W, ou qualquer outro, mas vão ter sua geração por módulo limitada.

Microinversores, pela sua independência de conexões, não possuem essa limitação podendo ter vários modelos e potências de módulos por microinversor.

- Segurança – Quando são ligados vários módulos em série é gerado uma tensão em corrente contínua muito elevada. Em uma string de 20 módulos, por exemplo, pode-se chegar a uma tensão de 800V em corrente contínua, sendo muito perigosa e exige muita atenção dos técnicos instaladores para evitar acidentes e no lado em corrente alternada se tem as tensões de 127V e 220V normalmente. Com os microinversores, tendo conexões dos módulos independentes, a tensão de operação em corrente contínua será menor, em torno de 40V em corrente contínua, uma tensão mais segura para se trabalhar, e no lado em corrente alternada são as mesmas tensões que no sistema com inversor string.

O local de instalação dos inversores string também possui suas desvantagens, mais robusto o inversor é instalado na parede em uma altura média de 120cm e local coberto, arejado e de fácil acesso para técnicos da concessionária de energia, com isso todo o cabeamento em corrente contínua passa por uma infraestrutura, geralmente exposta nas paredes, de eletrodutos separada que vão dos módulos até as strings box e até o inversor, além da conexão do lado em corrente alternada, também por eletrodutos, do inversor até os disjuntores e DPSs e até o quadro de distribuição do imóvel.

Figura 17 - Inversores string com instalação de eletrodutos expostos.



Fonte: Página web da Fotus Energia. [10]

String box são dispositivos contendo fusíveis, disjuntores e DPSs para o lado em corrente contínua e a chave seccionadora que é responsável por ligar a string de módulos ao inversor e tem o papel de cortar essa ligação quando há algum pico de energia prejudicial aos componentes do sistema e também para manutenções e até o inversor, além da conexão do lado em corrente alternada, também por eletrodutos, do inversor até os disjuntores e DPSs e até o quadro de distribuição do imóvel.

Microinversores, menores e mais leves, são instalados abaixo dos módulos na mesma estrutura de instalação. O lado em corrente contínua, além de ter uma tensão de operação pequena, tem o comprimento dos cabos de conexão pequeno sem a necessidade de eletrodutos e string box, já que os microinversores possuem internamente um dispositivo que corta a ligação com o lado em corrente alternada quando detecta algum distúrbio elétrico no sistema. No lado em corrente alternada, são conectadas as saídas dos microinversores em paralelo e o cabeamento até os disjuntores e DPSs é feito de modo mais simples e mais seguro utilizando a própria infraestrutura interna do imóvel, sem nenhum cabo exposto, e por fim conectado ao quadro de distribuição.

Figura 18 - Instalação de sistema fotovoltaico utilizando microinversores.



Fonte: Casa do microinversor. [12]

- Qualidade – O local próprio para a instalação do inversor string causa, em algumas situações, gastos a mais com reformas e obras para tal adaptação e fazer a passagem dos eletrodutos por dentro da parede, para que não fique exposta. Inversores string emitem ruídos audíveis e até interferências magnéticas, mas com o avanço da tecnologia esses problemas estão diminuindo, então dependendo do local de instalação pode incomodar o cliente. A fácil instalação dos microinversores na mesma estrutura dos módulos sobre o telhado dispensa gastos extras em obras e os ruídos, menores que o do inversor string, não incomodam.

Sem gastos extras com reformas, sem ruídos e menor risco de acidentes o sistema passa a ter não só uma qualidade técnica, como também acrescenta qualidade de vida ao cliente com um sistema seguro, confiável e eficiente.

4. PROJETOS

4.1. PROJETO RESIDENCIAL COM MICROINVERSORES

O primeiro projeto foi dimensionado para uma residência situada em Uberlândia, latitude $18^{\circ}55'41.46''\text{S}$ e longitude $48^{\circ}16'41.12''\text{O}$, instalação da rede bifásica, possui um espaço físico limitado, mas com área suficiente para o projeto e não possuía problemas com sombreamento e o telhado com inclinação de 8° com sentido para o Nordeste com desvio azimutal de 51° favoreceu a instalação dos módulos nesse mesmo sentido.

4.1.1. Irradiação solar do local da instalação

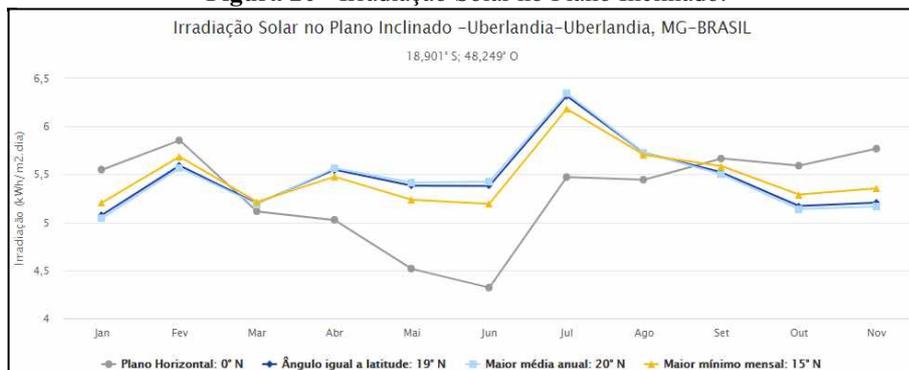
Utilizando os dados de latitude e longitude do local da instalação do projeto no site <http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data> [4] é possível saber a insolação do local e assim ter uma base da quantidade de módulos necessário para atender a demanda. Através do Google Maps é possível obter as exatas coordenadas da instalação.

Figura 19 - Irradiação solar diária média mensal no primeiro projeto.

Estação: Uberlândia Município: Uberlândia, MG - BRASIL Latitude: $18,901^{\circ}$ S Longitude: $48,249^{\circ}$ O Distância do ponto de ref. ($18,928211^{\circ}$ S; $48,278089^{\circ}$ O): 4,3 km																
#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]													
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média	Delta
<input checked="" type="checkbox"/>	Plano Horizontal	0° N	5,55	5,85	5,11	5,02	4,51	4,32	4,55	5,47	5,44	5,67	5,59	5,77	5,24	1,53
<input checked="" type="checkbox"/>	Ângulo igual a latitude	19° N	5,08	5,59	5,20	5,55	5,38	5,38	5,58	6,32	5,72	5,52	5,17	5,21	5,47	1,24
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior média anual	20° N	5,04	5,57	5,19	5,56	5,41	5,42	5,62	6,35	5,72	5,50	5,14	5,17	5,47	1,30
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior mínimo mensal	15° N	5,21	5,68	5,21	5,47	5,23	5,19	5,40	6,18	5,70	5,59	5,29	5,35	5,46	,99

Fonte: Página web do Cresesb. [4]

Figura 20 - Irradiação Solar no Plano Inclinado.



Fonte: Página web do Cresesb. [4]

Como visto na Figura 19 a distância do ponto de referência é de 4,3 km, apesar da distância não influencia significativamente nas medições. O telhado de instalação é levemente inclinado, o que levaria a irradiação média ser algo entorno do aferido pelo ‘ângulo igual a latitude’ e o ‘plano horizontal’.

Utilizando a irradiação média $5,24 \text{ kW} * \frac{h}{m^2 * dia}$, temos:

$$I_{mensal} = 5,24 * 30 = 157,2 \left[\frac{kW * h}{m^2 * mês} \right]. [11]$$

4.1.2. Descrição do consumo do cliente

A conta de luz do proprietário está descrita na Tabela 3.

Tabela 3: Consumo de energia residencial sem a usina fotovoltaica.

Mês/Ano	Consumo (kW*h)	Média(kW*h/dia)	Dias de faturamento
fev/19	533	17,19	43
jan/19	580	18,70	30
dez/18	697	24,03	31
nov/18	613	18,57	31
out/18	478	14,93	29
set/18	529	18,24	33
ago/18	560	18,66	32
jul/18	599	19,96	29
jun/18	811	25,34	30
mai/18	488	16,82	30
abr/18	562	19,37	32
mar/18	704	21,33	29
TOTAL	7154		

Com os dados da conta de energia do consumidor é possível calcular a média de consumo anual:

$$Consumo \text{ médio} = \frac{7154}{12} \cong 596 \text{ kWh/mês}$$

Além do consumo a taxa de disponibilidade [12] está inclusa na conta de energia mensal conforme art. 98. da resolução 414 da ANEEL. O custo de disponibilidade do sistema elétrico,

aplicável ao faturamento mensal de consumidor responsável por unidade consumidora do grupo B, é o valor em moeda corrente equivalente a:

- I. 30 kWh, se monofásico ou bifásico a 2 (dois) condutores;
- II. 50 kWh, se bifásico a 3 (três) condutores; ou
- III. 100 kWh, se trifásico.

Assim, essa taxa de disponibilidade é subtraída da média para o cálculo do consumo a ser suprido pela usina fotovoltaica. Como dito, o consumidor neste projeto possui um sistema bifásico, subtraindo 50kWh:

$$\text{Consumo a suprir: } 546 \text{ kWh/mês} = 6554 \text{ kWh/ano}$$

4.1.3. Dimensionamento dos módulos fotovoltaicos

Nesse projeto foi montada uma proposta utilizando 12 módulos fotovoltaicos do fabricante DAH Solar no modelo DHP72-330, que possuem potência de pico de 330W cada, assim a potência de pico instalada na usina é de 3,96kW_p, cujas características elétricas e mecânicas estão descritas da Tabela 4.

Tabela 4: Características elétricas e mecânicas dos módulos fotovoltaicos.

Características Elétricas	
Potência Máxima (pico)	330 W
Tensão em Potência Máxima	37,3 V
Corrente em Potência Máxima	8,85 A
Tensão em Circuito Aberto	46,1 V
Corrente em Curto Circuito	9,38 A
Eficiência	17,02 %
Características Mecânicas	
Altura	1956 mm
Largura	991 mm
Profundidade	40 mm
Peso	22,5 kg
Nº de Células Fotovoltaicas	72
Terminais de Acesso	MC4 / IP67

Neste estudo de caso o foco principal são as diferentes características dos dois tipos de inversores, mas o estudo da eficiência de geração por mês de cada tipo de módulo também é válido. Assim, utilizando os valores tirados do datasheet, foi possível calcular a energia por módulo pela multiplicação das suas dimensões, o rendimento (17,02% arredondado para 17%) e pela irradiação mensal:

$$E_{pai\ nel} = 157,2 * (1,956 * 0,991) * 0,17 \cong 51,80 [kW * h]. [13]$$

Os módulos fotovoltaicos possuem ligados à sua caixa de conexão, um par de cabos com dupla isolamento para 1 kV, de 99 cm, em cujas extremidades são ligados conectores tipo MC-4, que permite a interligação segura e impermeável.

Figura 21- Módulos instalados do projeto 1 sobre o telhado.



Fonte: Foto tirada pelo autor.

4.1.4. Dimensionamento dos microinversores

Como dito, os microinversores são conectados à um ou mais módulos fotovoltaicos. Neste projeto os inversores utilizados serão do fabricante Altenergy Power Systems, modelo YC500, cujas características elétricas e mecânicas estão descritas na Tabela 5.

O modelo YC500 possui duas entradas MPPT, a instalação será de um microinversor a cada dois módulos, assim, como são 12 módulos o projeto possui 6 microinversores.

Tabela 5: Características elétricas e mecânicas dos microinversores.

Características Elétricas	
Características das Entradas CC	
Máxima Tensão de Entrada	55 V
Máxima Corrente de Entrada	12 A
Número de Rastreadores de MPPT	2
Faixa de Tensão para MPPT	22 – 45 V
Características de Saída CA	
Máxima Potência de Saída	500 W
Faixa de Tensão de Funcionamento	101,6 – 139,7 V
Tensão Nominal de Saída	127 V
Máxima Corrente de Saída	3,94
Frequência Nominal de Operação	60 Hz
Faixa de Frequência de Operação	55,1 – 64,9 Hz
Fator de Potência Nominal	> 0,99
Distorção Harmônica Total	< 3%
Tipo de Conexão à Rede	Monofásico
Rendimento	95,00%
Características Mecânicas	
Altura	221 mm
Largura	167 mm
Profundidade	29 mm
Peso	2,5 kg
Grau de Proteção	IP 67
Faixa de Temperatura de Trabalho	-40°C à 65°C

Por ser inversores de pequeno porte, a instalação dos mesmos será localizada na própria estrutura de fixação dos módulos fotovoltaicos.

As funções de proteção do sistema fotovoltaico estão de acordo com os requisitos mínimos em função da potência instalada, presente na Seção 3.7 do PRODIST da ANEEL. [14]

O inversor para a conexão à rede do sistema possui as seguintes funções internas de proteção:

- 25 – Sincronização do inversor com a rede;
- 27 – Subtensão;
- 59 – Sobretensão;
- 81 – Sub e Sobre frequência.

Figura 22 - Microinversor APS YC500.



Fonte: Casa do microinversor. [12]

Os inversores possuem também proteção anti-ilhamento conforme exigido pela Seção 3.7 do PRODIST da ANEEL. Ou seja, quando a energia da concessionária sofrer alguma perturbação no sistema ou quando houver desligamento da rede da concessionária, o inversor interrompe automaticamente a injeção de energia e só reconecta ao sistema novamente após 3 minutos da normalização da rede.

O disjuntor para proteção e seccionamento do circuito CA será de 20A, curva tipo C, bipolar, com tensão de operação de 127/220Vca e frequência de 50/60 Hz. Os Dispositivos de Proteção Contra Surtos (DPS) serão à base de varistores, classe II, com tensão nominal de 275 V, corrente nominal de 20 kA e corrente máxima de 10kA. O sistema fotovoltaico nessa instalação utilizará o sistema de aterramento já instalado na unidade consumidora.

A fixação do módulo fotovoltaico será mediante perfis de alumínio suportados em bases de aço galvanizado fixados ao telhado. Os módulos fotovoltaicos serão fixados aos trilhos através de presilhas de fixação feitas de liga de alumínio anodizado. A estrutura de fixação será

solidariamente aterrada com os módulos fotovoltaicos, utilizando-se o sistema de aterramento da unidade consumidora.

4.1.5. Custo do projeto

O custo final de um sistema fotovoltaico é a soma de vários itens e fatores, que possuem sua importância e, é claro, seu valor em dinheiro. Os custos são divididos em módulos fotovoltaicos, inversores, cabeamento, estruturas onde os módulos são instalados, aparelho de monitoramento, mão de obra, frete, etc.

Neste estudo não serão descritos, individualmente, todos os elementos e seus valores, apenas os valores dos módulos, dos inversores e o valor total do projeto tirando ainda o lucro que a empresa contratada teve, assim tendo como objetivo o valor bruto do sistema.

Os módulos e microinversores deste projeto são importados e seus valores variam com o preço do dólar. Os fornecedores no Brasil, que fazem a importação, possuem os preços dos equipamentos tabelados, mas dependendo da demanda ou de alguma promoção os valores podem ter alterações e dentro desse valor, geralmente, já fica incluso o frete até o local da instalação ou onde o cliente deseja.

Com o projeto de 12 módulos fotovoltaicos do fabricante DAH Solar no modelo DHP72-330 e 6 microinversores do fabricante Altenergy Power Systems modelo YC500 o valor total foi de:

R\$ 26.990,00

O preço dos módulos varia muito dependendo da demanda, assim teve-se uma média do preço de cada módulo de R\$600,00, assim, com 12 módulos:

R\$7.200,00

Como dito, os microinversores, que são o foco deste estudo, são a parte mais cara e mais importante do sistema e são responsáveis, em média, por 30% do valor total do projeto. Assim como os módulos o valor do microinversor depende muito da demanda e teve-se uma média de R\$2090,00 para cada microinversor, então com 6 microinversores:

R\$12.540,00

4.1.6. Geração total no período do estudo

Os dados de geração foram retirados do monitoramento instalado e mostrados na Tabela 6.

Tabela 5: Geração de energia mensal do projeto 1 utilizando microinversores.

Mês/Ano	Geração (kWh)
mar/20	515,92
fev/20	551,71
jan/20	540,85
dez/19	526,24
nov/19	533,59
out/19	613,67
set/19	602
ago/19	545,48
jul/19	607,6
jun/19	533,29
mai/19	529,35
abr/19	509,42
TOTAL	6609,12

Tendo o consumo a suprir de 6.554 kWh o sistema utilizando microinversores teve uma produção maior de 6.609,12 kWh, assim, teve-se um saldo positivo de 55,12 kW.

A qualidade de produção de energia do sistema é dada pelo coeficiente da produção específica. O coeficiente é a divisão entre a produção específica do sistema e a potência de pico dos módulos. A partir de experiências anteriores algumas empresas chegaram a um valor médio do coeficiente de 1,6 e o usam para se fazer uma avaliação da geração ou até mesmo uma projeção de uma nova instalação. Um coeficiente acima de 1,6 mostra qualidade e abaixo disso mostra um déficit de geração.

A produção específica deste projeto é de 6.609 kWh/kWp/ano, assim o coeficiente da produção específica, que mostra a qualidade de produção de energia do sistema é dada por:

$$\text{Produção específica} = \frac{6.609,12 \text{ kWh}}{3.960 \text{ Wp}} = 1,6689$$

4.1.7. Análise econômica

O projeto de um sistema fotovoltaico é considerado um investimento e, assim como qualquer investimento, possui uma taxa ou tempo de retorno. A taxa de retorno indica de maneira direta o resultado de um investimento durante um intervalo de tempo específico.

A viabilidade técnica não é por si só uma condição determinante e definitiva para as ações a serem implementadas. Sem dúvida que a viabilidade técnica é uma condição importante e necessária, mas a palavra final, em condições gerenciais de normalidade energética, dependerá da viabilidade econômica e da disponibilidade de recursos próprios ou do emprego de financiamentos.

Neste estudo será calculado o tempo de retorno levando em conta um investimento à vista feito pelo cliente, sem financiamentos e sem juros durante o ano e apesar da taxa de aumento no custo da energia estar em 9,6% ao ano não será levada em consideração, assim será utilizado o tempo de retorno simples – TRS (payback).

$$TRS = \frac{\Delta C}{EcoR\$}$$

onde,

TRS – é o tempo de retorno em meses ou anos;

ΔC – é o custo do investimento;

EcoR\$ – é a economia por mês ou ano em R\$.

A EcoR\$, ou retorno financeiro, será a geração do sistema, no período de análise de um ano, de 6.609,12kWh/ano multiplicado pela tarifa de aproximadamente 0,93 R\$/kWh, dado retirado da conta de energia do cliente:

$$EcoR\$ = R\$6.146,48$$

Assim, temos:

$$TRS = \frac{R\$ 26.990,00}{R\$ 6.146,48} \cong 4,39 \text{ anos}$$

4.2. PROJETO RESIDENCIAL COM INVERSORES STRING

O segundo projeto também foi dimensionado para uma residência situada em Uberlândia, latitude 18°55'41.03" S e longitude 48°16'51.45" O, instalação da rede bifásica,

possui um espaço físico limitado, mas com área suficiente para o projeto e não possuía problemas com sombreamento e as mesas de módulos fotovoltaicos com inclinação de 5° com sentido para o Nordeste com desvio azimutal de 51° favorecendo a instalação e o comparativo neste estudo por ser muito parecido com o primeiro projeto.

4.2.1. Irradiação solar do local da instalação

Como os dois projetos foram feitos bem próximos um do outro a irradiação é a mesma nos dois locais.

A distância do ponto de referência é de 4,5 km, apesar da distância não influencia significativamente nas medições. O telhado de instalação é plano, porém a estrutura onde serão instalados os módulos é levemente inclinada, o que levaria a irradiação média ser algo entorno do aferido pelo ‘ângulo igual a latitude’ e o ‘plano horizontal’, sendo igual ao primeiro projeto.

Utilizando a irradiação média $5,24kW * \frac{h}{m^2*dia}$, temos:

$$I_{mensal} = 5,24 * 30 = 157,2 \left[\frac{kW*h}{m^2*mês} \right]. [11]$$

4.2.2. Descrição do consumo do cliente

A conta de luz do proprietário está descrita na Tabela 7.

Tabela 6: Consumo de energia residência sem a usina fotovoltaica.

Mês/Ano	Consumo (Kw*h)	Média(Kw*h/dia)	Dias de faturamento
fev/19	759	25,3	30
jan/19	533	17,19	31
dez/18	580	18,7	31
nov/18	697	24,03	29
out/18	613	18,57	33
set/18	478	14,93	32
ago/18	529	18,24	29
jul/18	560	18,66	30
jun/18	599	19,96	30
mai/18	811	25,34	32
abr/18	488	16,82	29
mar/18	562	19,37	29
TOTAL	7209		

Com os dados da conta de energia do consumidor é possível calcular a média de consumo anual:

$$\text{Consumo médio} = \frac{7209}{12} = 600,75 \text{ kWh/mês}$$

O segundo projeto também possui um sistema bifásico assim como o primeiro e, portanto, a taxa de disponibilidade de 50kWh é subtraída da média para o cálculo do consumo a ser suprido pela usina fotovoltaica:

$$\text{Consumo a suprir: } 550,75 \text{ kWh/mês} = 6.609 \text{ kWh/ano}$$

4.2.3. Dimensionamento dos módulos fotovoltaicos

Nesse projeto foi montada uma proposta utilizando também 12 módulos fotovoltaicos do fabricante Canadian Solar, modelo CS6U – 330P, que possuem potência de pico de 330W cada, assim a potência de pico instalada na usina é de 3,96 kWp, cujas características elétricas e mecânicas estão descritas da Tabela 8.

Tabela 7: Características elétricas e mecânicas dos módulos fotovoltaicos.

Características Elétricas	
Potência Máxima (pico)	330 W
Tensão em Potência Máxima	37,2 V
Corrente em Potência Máxima	8,88 A
Tensão em Circuito Aberto	45,6 V
Corrente em Curto Circuito	9,45 A
Eficiência	16,97 %
Características Mecânicas	
Altura	1960 mm
Largura	992 mm
Profundidade	40 mm
Peso	22,4 kg
Nº de Células Fotovoltaicas	72
Terminais de Acesso	IP67, 3 diodos

O Módulo Fotovoltaico utilizado é fabricado pela Canadian Solar apresenta elevada eficiência, baixo custo e classificação “A” pelo INMETRO. Além disso, é certificado por várias instituições internacionais, seguindo os tradicionais e rigorosos padrões europeus e americanos.

Utilizando os valores tirados do datasheet, conseguimos calcular a energia por módulo pela multiplicação das suas dimensões, o rendimento (16,97% arredondado para 17%) e pela irradiação mensal:

$$E_{pai\ nel} = 157,2 * (1,960 * 0,992) * 0,17 \cong 51,96 [kW * h]. [12]$$

Figura 23 - Módulos instalados do projeto 2 sobre a estrutura.



Fonte: Foto tirada pelo autor.

Como dito, os projetos utilizando inversores strings são dimensionados a partir de uma quantidade de módulos para cada inversor. Neste projeto será utilizado apenas um inversor para os 12 módulos fotovoltaicos.

Figura 24 - Foto de satélite da instalação.



Fonte: Montagem feita pelo autor.

4.2.4. Dimensionamento do inversor

O inversor escolhido foi o da marca ABB modelo UNO-DM-4.0-TL-PLUS-SB com potência maior que o sistema necessita, mas é algo para se ter uma margem maior de segurança.

Este inversor possui algumas características de entrada, como:

- Proteção contra inversão de polaridade;
- Monitoração de falta de aterramento;
- Chave de desconexão CC integral (opcional);
- Fusíveis para as entradas CC (opcional);
- Configuração para aterramento do positivo ou negativo ou em flutuação.

Figura 25 - Inversor ABB UNO-DM-4.0-TL-PLUS-SB.



Fonte: DataSheet do fabricante.

Figura 26 - Caixa com DPSs projeto 2.



Fonte: Foto tirada pelo autor.

A Tabela 9 a seguir apresenta as principais características técnicas desse inversor.

Tabela 8: Características técnicas do inversor utilizado.

Dados de entrada	
Potência nominal CC	4250 W
Tensão máxima CC	600 V
Faixa de tensão do MPPT	130-530 V
Corrente máxima de entrada	32 A
Número de entradas de strings FV / MPPT	2
Número de MPPTs	1
Dados de saída	
Potência de saída nominal	4000 W
Corrente máxima CA	17,2 A
Tensão de saída da rede	230 V
Frequência da rede	50/60 Hz
Fator de potência (cos ϕ)	1
Dados de desempenho	
Eficiência máxima	97 %
Potência no modo noturno	< 0,4 W
Dados mecânicos	
Grau de proteção	IP65
Dimensões	553 x 418 x 175 mm
Peso	15 kg

4.2.5. Custo do projeto

Os módulos e o inversor deste projeto também são importados e seus valores variam com o preço do dólar. De mesmo modo o inversor também possui sua tabela de preços e podendo ter as variações de preços pela demanda ou por promoções do fornecedor.

Com o projeto de 12 módulos fotovoltaicos do fabricante Canadian Solar, modelo CS6U – 330P e 1 inversor string do fabricante ABB modelo UNO-DM-4.0-TL-PLUS-SB o valor total, tirando o lucro da empresa contratada e o valor de no mínimo uma troca de inversor que corresponderia a mais 30%, foi de:

R\$ 22.950,00

O preço dos módulos varia muito dependendo da demanda, assim teve-se uma média, como no primeiro projeto, do preço de cada módulo de R\$650,00, assim, com 12 módulos:

R\$7.800,00

Em um sistema utilizando inversor string a porcentagem do mesmo, no valor total do projeto, corresponde a uma média de 40%, mais do que no projeto utilizando microinversores. Fazendo uma média no preço de mercado desse modelo de inversor temos:

R\$9.200,00

4.2.6. Geração total no período do estudo

Os dados de geração foram retirados do monitoramento instalado e mostrados na Tabela 10.

Tabela 9: Geração de energia mensal do projeto 2 utilizando inversor string.

Mês/Ano	Geração (kWh)
mar/20	501,14
fev/20	498,43
jan/20	432,56
dez/19	471,52
nov/19	488,12
out/19	579,17
set/19	504,18
ago/19	471,18
jul/19	481
jun/19	497,65
mai/19	512,24
abr/19	475,21
TOTAL	5.912,4

Tendo o consumo a suprir de 6.609 kWh o sistema utilizando microinversores teve uma produção maior de 5.912,4 kWh, assim, teve-se um saldo negativo de 696,6 kW.

A produção específica deste projeto é de 5.912,4 kWh/kWp/ano, assim o coeficiente da produção específica, que mostra a qualidade de produção de energia do sistema é dada por:

$$Produção\ específica = \frac{5.912,4\ kWh}{3.960\ Wh} = 1,493$$

4.2.7. Análise econômica

Como no primeiro projeto será calculado o tempo de retorno levando em conta um investimento a vista, sem financiamentos e sem juros durante o ano e apesar da taxa de aumento no custo da energia estar em 9,6% ao ano não será levada em consideração, assim será utilizado o Tempo de retorno simples – TRS (payback) – que mostrará o pior caso de tempo de retorno.

$$TRS = \frac{\Delta C}{EcoR\$}$$

onde,

TRS – é o tempo de retorno em meses ou anos;

ΔC – é o custo do investimento;

EcoR\$ – é a economia por mês ou ano em R\$.

A EcoR\$, ou retorno financeiro, será a produção do sistema de 6.336kWh/ano multiplicado pela tarifa de aproximadamente 0,93 R\$/kW, dado retirado da conta de energia do cliente:

$$EcoR\$ = R\$5.498,53$$

Assim, temos:

$$TRS = \frac{R\$ 22.950,00}{R\$5.498,53} \cong 4,17\ anos$$

5. COMPARATIVO ECONÔMICO GERAL

A Tabela 11 mostra um comparativo geral dos dois sistemas, detalhando a quantidade e valores dos equipamentos utilizados, suas gerações no período de análise (1 ano), seus saldos de comparação entre o consumo a suprir e a geração anual, o retorno financeiro (utilizado a tarifa de 0,93 reais/kWh), a produção específica e a taxa de retorno (payback) de cada sistema.

Tabela 10: Comparativo econômico geral de equipamentos e geração.

	Projeto 1	Projeto 2
Conexão	Bifásico	Bifásico
Consumo total	7.154 kWh/ano	7.209 kWh/ano
Consumo a suprir	6.554 kWh/ano	6.609 kWh/ano
Módulos	DAH Solar DHP72-330	Canadian Solar CS6U-330
Quantidade	12	12
Geração	3,96 kWp	3,96 kWp
Valor dos módulos	R\$ 7.200,00	R\$ 7.800,00
Inversor	Microinversor	Inversor String
Modelo	APS YC500	ABB UNO-DM-4.0-TL-PLUS-SB
Quantidade	6	1
Valor dos inversores	R\$ 12.540,00	R\$ 9.200,00
Valor total do projeto	R\$ 26.990,00	R\$ 22.950,00
Geração em 1 ano	6.609,12 kWh/ano	5.912,4 kWh/ano
% do Saldo	0,8%	-10,5%
Saldo em kWh	55,12	-696,6
Valor	R\$ 51,26	-R\$ 647,84
Retorno Financeiro	R\$ 6.146,48	R\$ 5.498,53
Produção Específica	1,6689	1,493
Payback -TRS	4,39 anos	4,17 anos

6. CONCLUSÃO

Esse estudo de caso teve como finalidade mostrar, de forma mais comercial, as diferenças entre microinversores e inversores string. Nessa visão não foi detalhado os processos de geração do sistema em si e sim o que é mais interessante ao cliente/consumidor que é a viabilidade, os benefícios e a economia como maior foco. O objetivo dos dois sistemas é o mesmo, produzir sua própria energia e não depender de tarifas das concessionárias de energia

elétrica, que possuem aumentos anuais, tendo a visão de economia a partir do investimento do projeto.

Os resultados dos dois projetos mostraram a capacidade que o sistema fotovoltaico tem de suprir e gerar economia para os clientes. Como visto, as diferenças dos dois sistemas são consideráveis e o microinversor leva bastante vantagem pela quantidade de benefícios que possui, entretanto, essas diferenças não se concentram apenas na parte física e técnica.

A Tabela 11 dá uma ideia melhor das diferenças de equipamentos, valores e geração de cada sistema e conclui-se que a única vantagem do Projeto 2, projeto que utiliza o inversor string, sobre o Projeto 1 é o menor preço do inversor, mas esse menor preço acaba não sendo uma vantagem considerável quando se tem a visão geral dos dois sistemas e o preço maior do microinversor é justificável pela quantidade de benefícios que ele traz para o sistema e, conseqüentemente, para o cliente, tendo um sistema com vida útil maior, flexível por ter várias opções de lugares de instalação, tipos de módulos diferentes, orientações de telhado e números de conexões, menos perdas na geração por sombreamento ou falhas técnicas, acompanhamento do sistema com o monitoramento detalhado, mais seguro e confiável.

Há casos de projetos que o uso de inversores string inviabiliza a instalação, assim, quando se há possibilidade e viabilidade, a utilização de microinversores torna o projeto fotovoltaico viável e melhor, com mais tecnologia e com mais benefícios, melhorando assim a qualidade de vida do cliente e levando o sistema fotovoltaico a verdadeira eficiência energética.

REFERÊNCIAS

- [1] ANEEL. **Anuário de Estatística de Energia Elétrica 2017**. Brasília: [s. n.], 2019- . *E-book*.
- [2] Infográfico ABSOLAR de energia do Brasil, 20 jan. 2020. Disponível em: <http://www.absolar.org.br/infografico-absolar.html>. Acesso em: 25 janeiro 2020.
- [3] Atlas Brasileiro de Energia Solar - 2ª Edição (2017). Disponível em: http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html.
- [4] Centro de referência para as energias solar e eólica Sérgio de S. Brito – Cálculo da irradiação. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>.
- [5] Atlas Solarimétrico do Brasil – Banco de dados terrestres 2000. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Atlas_Solarimetrico_do_Brasil_2000.pdf.
- [6] Precessão do Eixo da Terra. [S. l.], 17 set. 2016. Disponível em: <http://astro.if.ufrgs.br/fordif/node8.htm>. Acesso em: 8 maio 2019
- [7] VILLALVA, Marcelo Gradella; GAZOLI, Jonas Rafael. Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações. São Paulo: Érica, 2013.
- [8] SolarLAB energia fotovoltaica – portfólio. Disponível em: <http://www.solarlabenergia.com.br/portfolio>.
- [9] Sistema fotovoltaico “off-grid”. Disponível em: <https://consultrevisolar.com.br/sistema-fotovoltaico-off-grid/>.
- [10] FOCUS Energia. Disponível em: <https://focusenergia.com.br/>.
- [11] Valores de serviços e tarifas CEMIG. Disponível em: https://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/Paginas/valores_de_tarifa_e_servicos.aspx
- [12] Casa do Microinversor. Disponível em: <https://microinversor.com.br>.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

PRIEB, César Wilhelm Massen. Determinação da eficiência de seguimento de máxima potência de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição. 2011. 141 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

KRAUTER, Stefan; BENDFELD, Jörg. Update on rankings of conversion efficiencies and energy yield of microinverters, including inverters for two pv modules. Amsterdam, 2017.

P. A. B. James et al., PV array <5 kWp + single inverter = grid connected PV system: Are multiple inverter alternatives economic?, Solar energy, 2006, 80, 1179-1188.

HUANG,B.J.;SUN,F.S.;HO,R.W.Near Maximum Power Point Operation (nMPPO) Design of Photovoltaic Power Generation System.SolEnergy. v. 80, p.1003-1020,2006.

D. Petreus et al., Low cost single stage micro-inverter with MPPT for grid connected applications, Solar Energy, 2013, 92, 241-255.

Hadeed Ahmed Sher and Khaled E. Addoweesh, Micro-inverters — Promising solutions in solar photovoltaics, Energy for Sustainable Development, 2012, 16, 389-400.

HOHM, D. P.; ROPP, M. E. Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms. Prog Photovoltaics: Research and Applications, vol 11, p. 47-62,2003.