

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE CAMPINAS  
CURSO DE TECNOLOGIA EM GESTÃO DE ENERGIA E EFICIÊNCIA  
ENERGÉTICA

GUILHERME BOMFIM NICASTRI

RODRIGO PRATES

**CONCEITUALIZAÇÃO DE MODALIDADE DE  
ARRENDAMENTO DE LOTES, PARA PRODUÇÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA POR SISTEMA FOTOVOLTAICO.**

CAMPINAS/SP  
2021

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE CAMPINAS  
CURSO DE TECNOLOGIA EM GESTÃO DE ENERGIA E EFICIÊNCIA  
ENERGÉTICA

GUILHERME BOMFIM NICASTRI

RODRIGO PRATES

**CONCEITUALIZAÇÃO DE MODALIDADE DE ARRENDAMENTO  
DE LOTES, PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA POR  
SISTEMA FOTOVOLTAICO.**

Trabalho de Graduação apresentado como pré-requisito para a conclusão do Curso Superior de Tecnologia em Gestão de Energia e Eficiência Energética, da Faculdade de Tecnologia de Campinas, elaborado sob a orientação do Prof. Me. Henrique Antônio Mielli Camargo

CAMPINAS/SP  
2021

**FICHA CATALOGRÁFICA**  
**CEETEPS - FATEC Campinas - Biblioteca**

N583e

NICASTRI, Guilherme Bomfim.

Estudo de caso: Fazenda solar e o aluguel de lotes, para pequenos e médios empreendedores. Guilherme Bomfim Nicastrri e Rodrigo Prates. Campinas, 2021.

50 p.; 30 cm.

Trabalho de Graduação do Curso de Gestão de Energia e Eficiência Energética – Faculdade de Tecnologia de Campinas.

Orientador: Prof. Dr. Henrique Mielli Camargo.

1. Fazenda solar. 2. Aluguel de lotes. 3. Fotovoltaica. 4. Painéis fotovoltaicos. 5. Energia elétrica. I. Autor. II. Faculdade de Tecnologia de Campinas. III. Título.

CDD 621.47

Catálogo-na-fonte: Bibliotecária: Aparecida Stradiotto Mendes – CRB8/6553

TG GEEE 21.2

GUILHERME BOMFIM NICASTRI

RODRIGO PRATES

## Conceitualização de Modalidade de Arrendamento de Lotes para Produção de Energia Elétrica por Sistema Fotovoltaico

Trabalho de Graduação apresentado como exigência parcial para obtenção do título de Tecnólogo em Gestão de Energia e Eficiência Energética pelo CEETEPS / Faculdade de Tecnologia – Campinas.

Campinas, 30 de novembro de 2021.

### **BANCA EXAMINADORA**



---

Prof. Henrique Antônio Mielli Camargo  
Fatec Campinas



---

Prof. Gerson Roberto Luqueta  
Fatec Campinas



---

Prof<sup>a</sup>. Rosani Gardin  
Fatec Campinas

## **DEDICATÓRIA**

### **Guilherme Bomfim Nicastri**

Primeiramente dedico a minha mãe Izabel e minha noiva Débora por todo o suporte e o tempo cedido para que eu pudesse me dedicar aos estudos e a Deus por ter me dado saúde e perseverança para ter seguido no curso.

Dedico a todos os docentes do Centro Paula Souza que participaram dessa jornada que mesmo com todas as adversidades que se encontram pelo caminho sendo, desde a falta de infraestrutura didática e de mercado de trabalho, devido ser um curso pioneiro na área, ao enfrentamento da pandemia causada pelo Covid-19, que nunca nos faltaram comprometimento, apoio e atenção por suas partes.

Dedico aos meus companheiros de sala por todo o suporte no decorrer do curso, em especial Leonardo Castro, Leonardo Caselato, Eduardo Genes, Rodrigo Prates e Jamille Pereira, e muitos que levarei alguns para a minha vida como amigos.

### **Rodrigo Prates**

Dedico esse estudo de caso a todos os quais esse venha a alcançar, que possam compreender que somente, a leitura, o estudo e o conhecimento podem mudar posições.

Aos mestres que incansavelmente se dedicaram ao árduo ofício de lecionar, ainda com o advento de uma pandemia, quase dezoito meses em uma crise sanitária para tornar a tarefa ainda mais desafiadora, sem citar nomes, afinal de contas todos gigantes vencendo batalhas pessoais para alcançar um resultado coletivo, e assim resultado disseminação do conhecimento.

Sem mais delongas, minha gratidão aos companheiros de sala que fizeram tudo se tornar mais fácil, desde o simples compartilhar de um cálculo matemático, até as conversas mais complexas sobre ética, conduta e segurança.

## RESUMO

Com o avanço da população aos grandes centros, vieram também o crescimento populacional que, por sua vez, trouxe a alavancagem no consumo. Com o advento populacional nos grandes centros e o crescimento do consumo pelas famílias identificou-se que os centros das cidades tiveram um aumento no consumo de diversos bens sejam consumíveis ou duráveis, as famílias aumentaram seu consumo. A energia elétrica com sua matriz focada na geração hidrelétrica e histórico permanente de escassez e aumento de seu custo, foi facilmente apontada como um fator de risco para o crescimento dos grandes centros, para empreendedores um player a ser explorado como oportunidade.

Com sua matriz energética focada em hidrelétricas o Brasil precisou pensar em novas formas de gerar energia, e as oportunidades mais relevantes com resultado a curto prazo na geração, foram as energias; fotovoltaica e eólica. Considerando que o aumento no consumo de energia acontece de forma exponencial, nos grandes centros não é diferente com o adicional que os prédios comerciais não conseguem fazer uso de painéis fotovoltaicos, desta forma foi identificado esse nicho de mercado, pequenos empreendedores nos grandes centros.

Atualmente com mercado aquecido os painéis fotovoltaicos, tem tido um crescimento exponencial e considerado como principal recurso para geração de energia a curto prazo com excelente custo benefício, porém o desafio é como utilizar esse recurso em prédios comerciais nos grandes centros, onde em sua maioria os imóveis de pequenos empreendedores não comportam a instalação dos painéis; seja por motivo de espaço físico para sua instalação ou seja por questões financeiras onde muitas das vezes o imóvel é alugado ou compartilhado como pequenos shoppings e mini galerias.

**Palavras-chave:** fotovoltaica; painéis fotovoltaicos; energia elétrica.

## ABSTRACT

With the population movement from urban centers, came population growth, which in turn brought leverage in consumption. With the advent of population in large centers and the growth of consumption by families, it was identified that urban centers had an increase in the consumption of various goods, whether consumable or durable, families increased their consumption. Electric energy, with its matrix focused on hydroelectric generation and a permanent history of scarcity and increase in its cost, was easily identified as a risk factor for the growth of large centers, for entrepreneurs, a player to be explored as an opportunity.

With its energy matrix focused on hydroelectric plants, Brazil had to think of new ways to generate energy, and the most relevant opportunities with short-term results in generation were energy, photovoltaic and wind power. Considering that the increase in energy consumption happens exponentially, in large centers it is no different with the addition that commercial buildings cannot make use of photovoltaic panels, thus this market niche was identified, small entrepreneurs in large centers.

Currently with a heated market, solar panels have had an exponential growth and considered as the main resource for short-term energy generation with excellent cost-benefit, but the challenge is how to use this resource in commercial buildings in large centers, where most of the properties owned by small entrepreneurs do not support the installation of the panels; either for reasons of physical space for installation or for financial reasons where the property is often rented or shared with small shopping malls and mini galleries.

**Keywords:** photovoltaic; solar panels; electrical energy.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Solstícios e equinócios.....	14
Figura 2 – Movimento da terra em torno do sol. ....	16
Figura 3 – Declinação Solar ( $\delta$ ) nas quatro estações do ano. ....	16
Figura 4 – Componentes da Radiação Solar.....	19
Figura 5 - Representação dos ângulos segundo as técnicas solares. ....	21
Figura 6 - Representação dos ângulos segundo as técnicas solares. ....	21
Figura 7 - Representação de irradiância sobre uma superfície horizontal. ....	23
Figura 8 - Representação de irradiância sobre uma superfície inclinada. ....	23
Figura 9 – Movimento do sol verão / inverno.....	24
Figura 10 – Piranômetro Fotovoltaico.....	25
Figura 11 – Piranômetro Termoelétrico.....	26
Figura 12 – Resposta Espectral dos Piranômetros. ....	26
Figura 13 – Resposta Espectral dos Piranômetros. ....	27
Figura 14 – Junção pn de uma Célula Fotovoltaica. ....	29
Figura 15 – Módulo Jinko Solar JKM525M-72HL4-TV.....	30
Figura 16 – Características mecânicas. ....	30
Figura 17 – Especificações técnicas.....	31
Figura 18 – Performance elétrica e temperatura de dependência. ....	31
Figura 19 – Diagrama de blocos - CSI-125KTL-GI-E.....	38
Figura 20 – Inversor de string trifásico 125kW - CSI-125KTL-GI-E. ....	39
Figura 21 – Mapa da Potência Fotovoltaica Específica de Minas Gerais.....	44
Figura 22 – Mapa da Irradiação Solar Horizontal de Minas Gerais. ....	45
Figura 23 – Fluxograma do arrendamento de lotes, para produção de energia elétrica por sistema fotovoltaico. ....	48



## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Curva de eficiência CSI-125KTL-GI-E.....	41
---	----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela o consumo médio de energia elétrica de alguns eletrodomésticos. ....	12
Tabela 2 – Unidades para radiação solar e fatores de conversão.....	18
Tabela 3 – Valores Típicos de Albedo para Diferentes Superfícies.....	19
Tabela 4 – Médias do Total Diário da Irradiação no Plano Inclinado para o Estado de MINAS GERAIS. ....	46

## LISTA DE SÍMBOLOS

V	Volts
Vcc	Tensão em Corrente Contínua
Vca	Tensão em Corrente Alternada
m <sup>2</sup>	Metros Quadrados
W	Watt
kW	Quilowatt
MW	Megawatt
kWp	Quilowatt Pico
kWh	Quilowatt Hora
Wh/m <sup>2</sup> .dia	Watt Hora por Metros Quadrados Dia
kWh/m <sup>2</sup>	Quilowatt Hora por Metros Quadrados

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	10
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO .....	11
1.2	JUSTIFICATIVA/PROBLEMÁTICA .....	11
2	REVISÃO DA LITERATURA/BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1	Introdução Teórica.....	14
2.1.1	Geometria da Terra – Sol.....	15
2.1.2	Distribuição da Radiação Solar .....	17
2.1.3	Radiação Direta e Difusa .....	17
2.1.4	Definição do Ângulo .....	20
2.2	Métodos e cálculos .....	24
2.2.1	Instrumentos de Medição da Radiação Solar .....	24
2.3	Materiais e sua relevância .....	28
2.3.1	Módulos Fotovoltaicos .....	28
2.3.2	Inversor String.....	32
2.3.2.1	Controle PID .....	32
2.3.2.1.1	Controle Proporcional .....	33
2.3.2.1.2	Controle Integral .....	34
2.3.2.1.3	Controle Derivativo .....	36
2.3.2.2	Modulação PWM .....	37
2.3.2.3	Recurso MPPT.....	38
3	MATERIAIS E MÉTODOS .....	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	47
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	49
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	50

## 1 INTRODUÇÃO

Diante de um cenário crescente do consumo de energia elétrica no Brasil, e estudos internacionais apontando a energia elétrica Brasileira como sendo a 37º mais cara em um ranking de 110 países pesquisados pelo instituto Global Petrol Prices, o país se vê diante um impasse como garantir o atendimento da demanda com preços acessíveis a população.

Seguindo por anos com uma matriz energética centralizadora, e um histórico complexo de baixos investimento no setor elétrico o Brasil vem há anos deficitário na geração de energia e cada vez mais dependente da matriz Hidrelétrica. Se por um lado o avanço tecnológico trouxe o aumento do consumo, por outro trouxe a solução com o uso das placas fotovoltaicas, para geração de energia fotovoltaica.

Com o avanço tecnológico e a abertura do livre mercado de energia, veio a popularização do uso das placas solares, o mercado expandiu e as possibilidades de empreender se multiplicaram. O mercado de vendas de painéis solares cresceu vertiginosamente, sanando três “gaps” do Brasil sendo o primeiro contribuir para redução dos gastos com energia, segundo é diversificar a matriz energética do país e em terceiro trazer uma energia limpa.

Se tornando cada vez mais populares as placas fotovoltaicas vêm conquistando cada vez mais adeptos no país, ganhando mercado no segmento residencial, comercial e até em pequenas indústrias. Com uma visão empreendedora grandes “players” (terminologia conceitualmente utilizada na área de negócios para definir uma empresa do seguimento) do mercado de energia limpa, desenvolveram uma estratégia muito inteligente de empreendedorismo, a criação de fazenda solares. Onde a fazenda solar faz toda a captação/geração de energia, e essa energia é dividida em pequenos lotes, e registrados como geração compartilhada junto a distribuidora, aos moldes do que é feito quando se tem a placa fotovoltaica instalada no telhado da residência, porém neste caso as placas estão instaladas em uma fazenda solar a muitos quilômetros da residência que adquiriu/alugou o lote.

O objetivo deste trabalho é apresentar e desmistificar o mercado de locação de lotes em fazenda solares, proposto por esses players de energia que hoje praticam esse comércio no estado de Minas Gerais, junto a concessionária local CEMIG.

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Temos como objetivo a conceitualização de arrendamento de lotes para a produção de energia elétrica através de fazendas fotovoltaicas. Ao longo deste trabalho demonstraremos o conceito de uma empresa que atua na modalidade de geração compartilhada. O público-alvo são micro e pequenas empresas que não possuem capital e/ou estrutura física para instalação in-loco de um sistema de geração de energia fotovoltaica.

## 1.2 JUSTIFICATIVA/PROBLEMÁTICA

O Brasil, um país de origem agrícola com sua matriz energética voltada para a geração de energia Hidrelétrica, encontra-se hoje sofrendo com a escassez de energia devido inúmeras intempéries causadas por crises hídricas que levaram as hidrelétricas a uma baixa no volume de geração de energia, o governo na impossibilidade de prover novos meios de geração de energia delibera a criação de algumas medidas para solução, a primeira cria uma forma de tarifação “extra” sob o consumo de energia, classificadas e chamadas de bandeiras tarifárias, e o intuito é restringir o consumo em períodos de crises hídricas, deliberando sob o custo da energia um aumento financeiro de acordo com a faixa de bandeira; verde, amarela e vermelha.

Com o crescimento das cidades, ficou visualmente notável a falta de espaço físico e a crescente urbanização dos polos metropolitanos, e como consequência trouxeram um novo problema para os grandes centros, o aumento no consumo de energia. Através de uma problemática consistente e condizente com os dias atuais, a demanda por energia nos grandes centros tem sido uma dificuldade para os pequenos e médios empreendedores.

Abaixo na tabela 1, é apresentado uma lista de consumo de energia onde destacam se os equipamentos mais utilizados em unidades comerciais, segundo site da empresa AFAP, do seguimento de desenvolvimento de painéis de controle de energia.

Tabela 1 – Tabela o consumo médio de energia elétrica de alguns eletrodomésticos.

Tipo	Potência (W)	Tipo	Potência (W)
Aquecedor de água (até 80ℓ)	1500	Fogão (valor por boca)	1500
Aquecedor de água (de 100ℓ a 150ℓ)	2500	Forno (Embutir)	4500
Aquecedor de água (de 200ℓ a 400ℓ)	4000	Forno Microondas	750
Aquecedor de água por Passagem	6000	Freezer Horizontal	500
Aquecedor de Ambiente	1000	Freezer vertical	300
Aspirador de pó	600	Geladeira	250
Batedeira	100	Grill	1200
Cafeteira - Uso doméstico	600	Liquidificador	200
Cafeteira - Uso comercial	1200	Máquina de Costura	100
Chuveiro (127 V)	4400	Máquina de Lavar Louças	1500
Chuveiro (220 V)	6000	Máquina de Lavar Roupas	1000
Aparelho de SOM	100	Máquina de Secar Roupas	3500
Ebulidor	1000	Rádio Gravador	50
Enceradeira	300	Secador de Cabelos	1000
Espremedor de frutas	200	Televisor a cores	300
Exaustor	150	Torneira Elétrica	2500
Ferro de Passar Roupa Automático	1000	Torradeira	800
Ferro de Passar Roupa Simples	500	Ventilador	100

Fonte: <http://afap.com.br/noticias/2013/06/page/2/>

Como gerar eficiência energética e sustentabilidade para negócios de pequeno e médio porte, instalados nos grandes centros que por sua maioria são imóveis alugados ou arrendados, onde a reforma e alterações de layout não são permitidas e que por se tratar de empresas de pequeno e médio porte onde o empreendedor tem restrição de capital financeiro para esse tipo de investimento.

Para esta pesquisa escolhemos o estado de Minas Gerais que é um dos estados brasileiros que possui a kW/h mais caro do país, onde o ICMS tem a alíquota de 30% para o consumidor residencial, 25% para estabelecimentos comerciais e 18% para industrial (informação de domínio público), nossa pesquisa visa propor como solução para pequenos e médios empreendedores o aluguel de placas solares dentro de uma fazenda solar. Para as análises estamos considerando o estado de Minas Gerais, por já existir um player desenvolvendo essa atividade de locação de painéis solares dentro de uma fazenda solar, devido se tratar de um negócio novo o player não nos retornou os contatos, portanto ao longo da pesquisa não será citado o nome do mesmo.

Com o crescimento das cidades, ficou visualmente notável a falta de espaço físico e a crescente urbanização dos polos metropolitanos, e como consequência

trouxeram um novo problema para os grandes centros, o aumento no consumo de energia. Através de uma problemática consistente e condizente com os dias atuais, a demanda por energia nos grandes centros tem sido uma dificuldade para os pequenos e médios empreendedores.

O Brasil, um país de origem agrícola com sua matriz energética voltada para a geração de energia Hidrelétrica, encontra-se hoje sofrendo com a escassez de energia devido inúmeras intempéries causadas por crises hídricas que levaram as hidrelétricas a uma baixa no volume de geração de energia, o governo na impossibilidade de prover novos meios de geração de energia delibera a criação de algumas medidas para solução, a primeira cria uma forma de tarifação “extra” sob o consumo de energia, classificadas e chamadas de bandeiras tarifárias, e o intuito é restringir o consumo em períodos de crises hídricas, deliberando sob o custo da energia um aumento financeiro de acordo com a faixa de bandeira; verde, amarela e vermelha.

Fazendo concorrência direta com a matriz hidrelétrica a matriz fotovoltaica veio como solução para os constantes aumentos do preço da energia e tornou se rapidamente, uma opção de menor custo de investimento e com retorno rápido no consumo de energia.

Neste cenário de novos negócios, empreendedores com baixo capital a ser investido na empresa, instalados em grandes centros com problema de espaço físico para instalação de placas fotovoltaicas, surge a solução das fazendas solares que, consiste em construir usinas solares englobando-as na geração compartilhada.



## 2 REVISÃO DA LITERATURA/BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Introdução Teórica

O Brasil e suas vantagens fotovoltaicas, localizado parcialmente nos hemisférios norte e sul, o mesmo país recebe sol em todas as estações tornando assim, o país um grande gerador de energia fotovoltaica. Com o favorecimento pelo equinócio e solstício conforme esquemático apresentado figura 1 abaixo, o país conta então uma excelente matriz energética disponível o ano todo, e com vastas possibilidades.

Figura 1 - Solstícios e equinócios



Fonte: <https://brasilecola.uol.com.br/geografia/solsticios-equinocios.htm>

Segundo especialistas, solstício e equinócio são dois fenômenos que possibilitam enxergarmos as diferentes formas como o planeta é iluminado pelos raios solares. O estudo desses fenômenos é importante para a análise de disponibilidade da geração de energia solar, análises aprofundadas apoiam na tomada de decisão do posicionamento dos painéis fotovoltaicos no globo terrestre

O Sol fornece energia na forma de radiação. No centro do Sol ocorre a fusão de núcleos de hidrogênio em núcleos de hélio, durante este processo, parte da massa é transformada em energia.

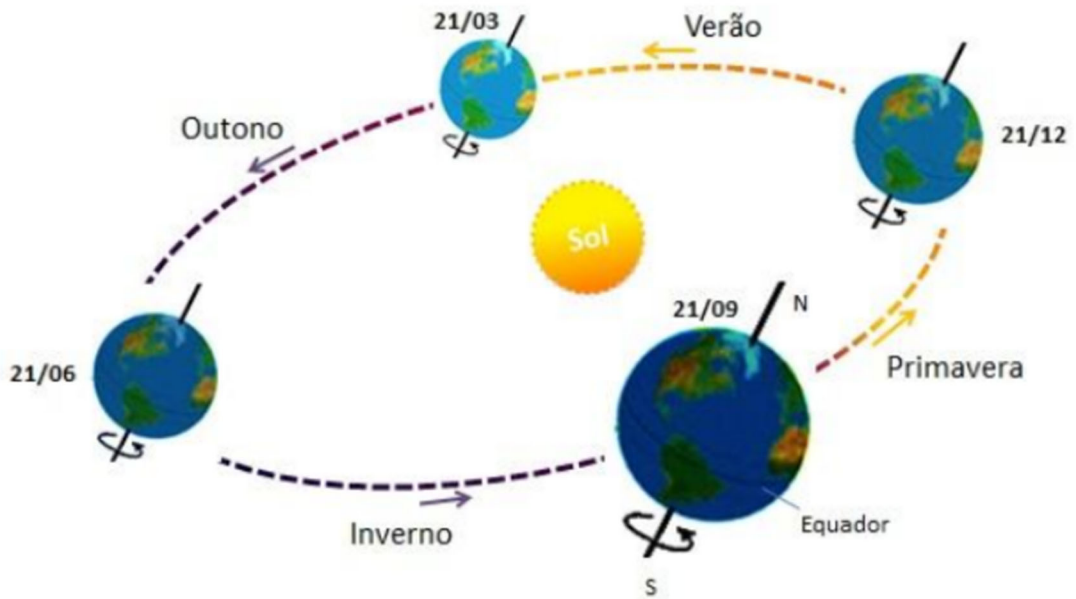
“Devido à grande distância existente entre o Sol e a Terra, apenas uma mínima parte (aproximadamente duas partes por milhão) da radiação solar emitida atinge a superfície da Terra. Esta radiação corresponde a uma quantidade de energia de  $1 \times 10^{18}$  KWh/ano.”

### 2.1.1 Geometria da Terra – Sol

No movimento anual em torno do sol, a terra percorre uma trajetória elíptica com uma ínfima excentricidade,  $\epsilon \approx 0,017$ . Seu eixo em relação ao plano normal da elipse apresenta aproximadamente  $23,45^\circ$  de inclinação conforme ilustrado na figura 2. A inclinação juntamente com seu movimento de translação é o que originasse às estações do ano.

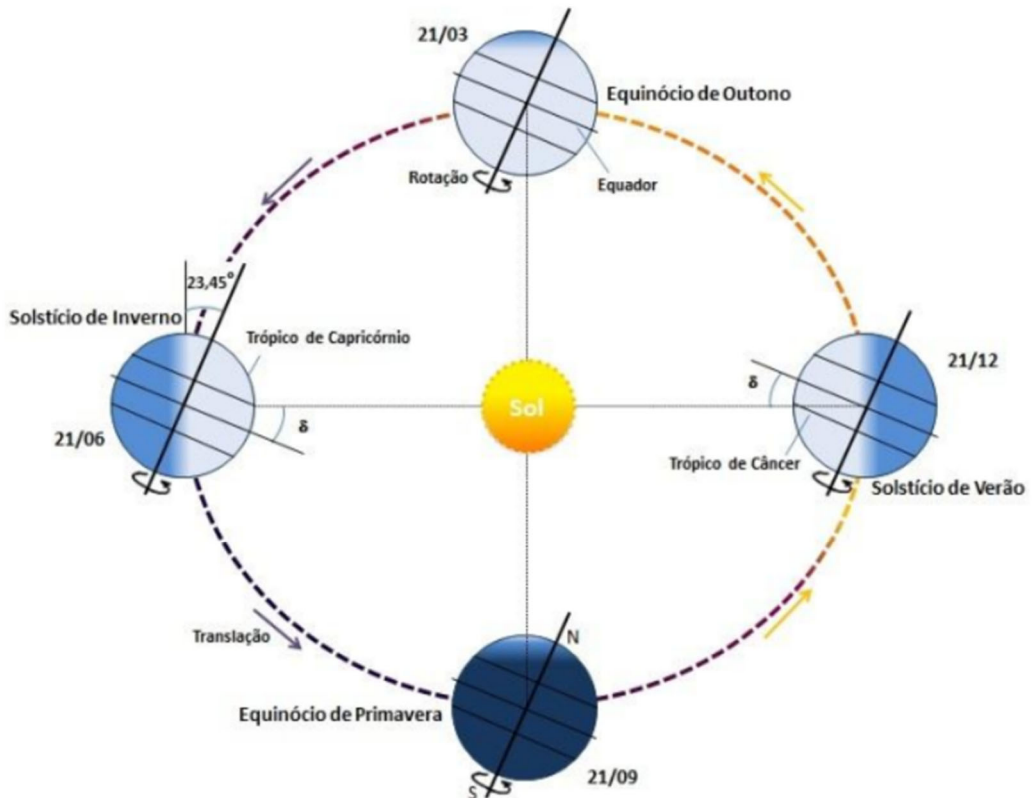
Este ângulo, que é denominado de Declinação Sola ( $\delta$ ), é positivo ao norte do Equador enquanto ao sul ele é negativo. As estações nada mais são a incidência solar e seu ângulo no plano do Equador onde no solstício de inverno no hemisfério sul (21 de junho) temos  $\delta = +23,45^\circ$  e no solstício de verão (21 de dezembro) temos  $\delta = -23,45^\circ$ . Nos equinócios de primavera e outono (21 de setembro e 21 de março respectivamente) os raios solares se alinham com o plano do Equador,  $\delta = 0$  conforme ilustrado na figura 3.

Figura 2 – Movimento da terra em torno do sol.



Fonte: Manual de Engenharia FV - 2014

Figura 3 – Declinação Solar ( $\delta$ ) nas quatro estações do ano.



Fonte: Manual de Engenharia FV - 2014

A Declinação Sola ( $\delta$ ) para um determinado dia, dia juliano que é contado de 1 a 365 sendo 01/jan – 1 e 31/dez – 365, pode ser obtida pela fórmula abaixo.

$$\text{sen}(\delta) = -\text{sen}(23,45) * \cos \left[ \left( \frac{360}{365,25} \right) * (n + 10) \right]$$

### 2.1.2 Distribuição da Radiação Solar

A intensidade da radiação solar fora da atmosfera, pode variar entre  $1,47 \times 10^8$  W/m<sup>2</sup> e  $1,52 \times 10^8$  W/m<sup>2</sup>. Sendo assim a irradiação  $E_0$  varia entre 1.325 W/m<sup>2</sup> e 1.412 W/m<sup>2</sup>. O valor médio é designado por constante solar,  $E_0 = 1.367$  W/m<sup>2</sup>.

No entanto, apenas uma parte da quantidade total da radiação solar atinge a superfície terrestre. A atmosfera reduz a radiação solar através da reflexão, absorção (ozono, vapor de água, oxigênio, dióxido de carbono) e dispersão (partículas de pó, poluição). O nível de irradiância na Terra atinge um total aproximado de 1.000 W/m<sup>2</sup> ao meio-dia, em boas condições climáticas, independentemente da localização. Ao adicionar a quantidade total da radiação solar que incide na superfície terrestre durante o período de um ano, obtém-se a irradiação global anual, medida em kWh/m<sup>2</sup>.

A irradiação solar em algumas regiões situadas perto do Equador, excede 2.300 kWh/m<sup>2</sup> por ano.

### 2.1.3 Radiação Direta e Difusa

A irradiância solar, genericamente usada também como “radiação solar”, pode ser referenciado em termos de fluxo de potência ou em energia por área. Existem diversas unidades para representar valores de radiação solar conforme apresentado na tabela a seguir.

Tabela 2 – Unidades para radiação solar e fatores de conversão.

Para converter de:	Para:	Multiplique por:
cal/cm <sup>2</sup> .min	W/m <sup>2</sup>	697,8
W/m <sup>2</sup>	cal/cm <sup>2</sup> .min	0,0014331
W/m <sup>2</sup>	mcal/cm <sup>2</sup> .s	0,023885
MJ/m <sup>2</sup> .dia	kWh/m <sup>2</sup> .dia	0,27778
Langley/dia	kWh/m <sup>2</sup> .dia	0,01163
cal/cm <sup>2</sup>	J/cm <sup>2</sup>	4,1868
cal/cm <sup>2</sup>	kWh/m <sup>2</sup>	0,01163
J/cm <sup>2</sup>	cal/cm <sup>2</sup>	0,23885
J/cm <sup>2</sup>	kWh/m <sup>2</sup>	0,0027778
kWh/m <sup>2</sup>	cal/cm <sup>2</sup>	85,985
kWh/m <sup>2</sup>	J/cm <sup>2</sup>	360
Langley	cal/cm <sup>2</sup>	1

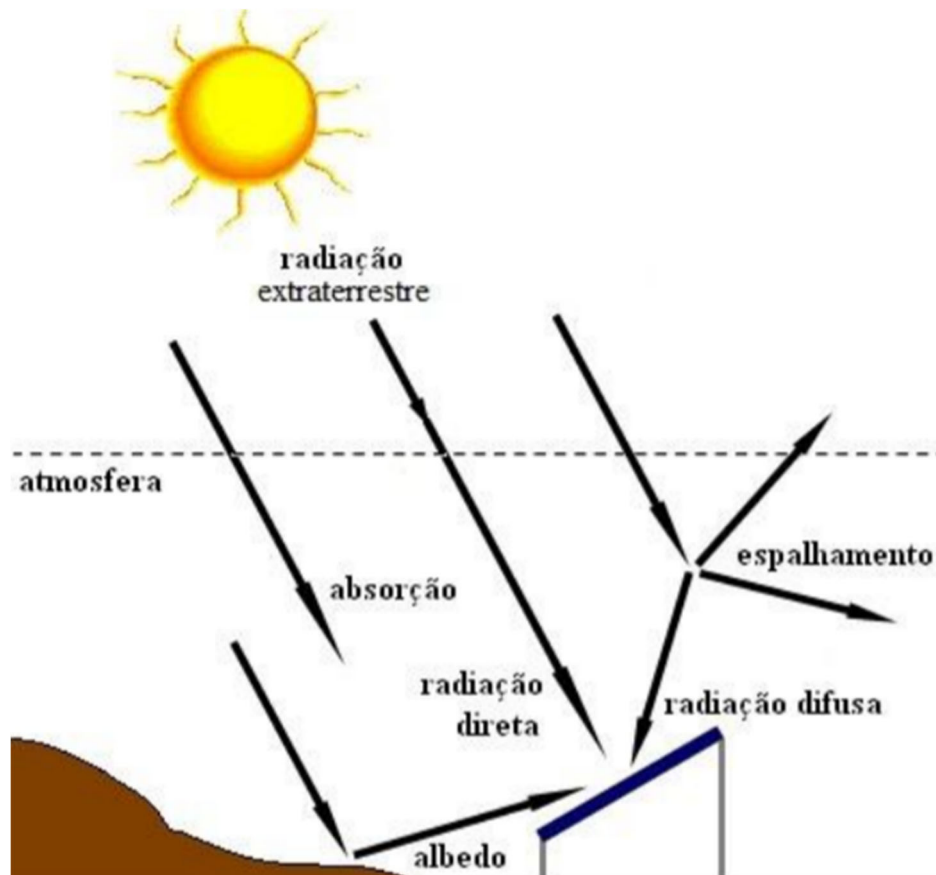
Fonte: Manual de Engenharia FV - 2014

A luz solar que atinge a superfície terrestre, é composta por uma fração direta e por uma fração difusa. A radiação direta vem segundo a direção do Sol, produzindo sombras bem definidas em qualquer objeto. Por outro lado, a radiação difusa não tem direção específica.

Caso a superfície estiver inclinada em relação ao plano horizontal, teremos também uma terceira componente refletida pelo ambiente. A denominação do coeficiente de reflexão destas superfícies é denominado de albedo.

Abaixo será ilustrado as componentes da radiação solar na figura 4 e os valores típicos de albedo na tabela 3.

Figura 4 – Componentes da Radiação Solar.



Fonte: (PINHO et al., 2008)

Tabela 3 – Valores Típicos de Albedo para Diferentes Superfícies.

Superfície	Albedo
Gramado	0,18 – 0,23
Grama seca	0,28 – 0,32
Solo descampado	0,17
Asfalto	0,15
Concreto novo (sem ação de intempéries)	0,55
Concreto (em construção urbana)	0,2
Neve fresca	0,8 – 0,9
Água, para diferentes valores de altura solar:	
$\alpha > 45^\circ$	0,05
$\alpha = 30^\circ$	0,08
$\alpha = 20^\circ$	0,12
$\alpha = 10^\circ$	0,22

Fonte: (MARKVART e CASTAÑER, 2004)

#### 2.1.4 Definição do Ângulo

As relações geométricas entre os raios solares e a superfície terrestre são demonstrados através de ângulos, sendo:

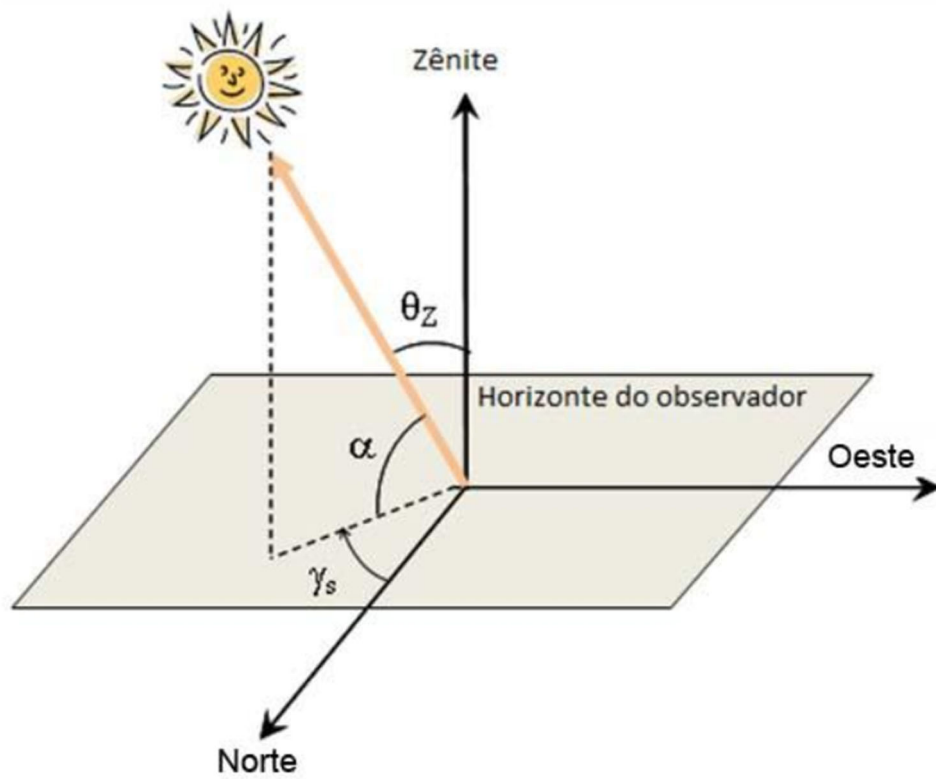
- Ângulo Zenital ( $\theta_z$ ) ou Zênite – é o ângulo formado entre os raios solares e a vertical local que pode ser calculado em função do horário angular ( $\omega$ ), da latitude local ( $\Phi$ ) e a declinação solar ( $\delta$ );

$$\cos\theta_z = \cos\delta * \cos\omega * \cos\Phi + \text{sen}\delta * \text{sen}\Phi$$

- Elevação Solar ( $\alpha$ ) ou Altura – é o ângulo entre os raios do sol e suas projeções sobre o plano horizontal;
- Ângulo Azimutal da Superfície ( $\gamma$ ) – é o ângulo entre a projeção normal à superfície no plano horizontal e a direção Norte-Sul;
- Ângulo Azimutal do Sol ( $\gamma_s$ ) – é o ângulo entre a projeção dos raios solares no plano horizontal e a direção Norte-Sul. Seu deslocamento parte do Norte geográfico ( $0^\circ$ ) onde, por convenção, é positivo quando se encontra à direita do sul e negativo quando a esquerda;
- Ângulo de Incidência ( $\theta$ ) – é o ângulo entre os raios do sol e a normal à superfície de trabalho;
- Inclinação da Superfície de Trabalho ( $\beta$ ) – é o ângulo entre o plano da superfície de captação e o plano horizontal ( $0^\circ - 90^\circ$ ).

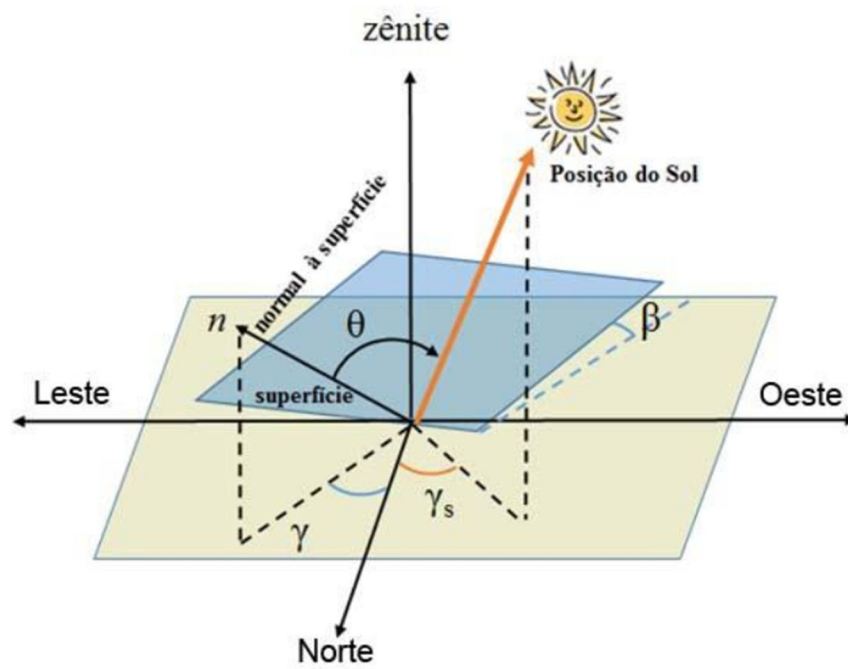
A seguir será apresentado três figuras com as representações dos ângulos.

Figura 5 - Representação dos ângulos segundo as técnicas solares.



Fonte: Manual de Engenharia FV - 2014

Figura 6 - Representação dos ângulos segundo as técnicas solares.



Fonte: Manual de Engenharia FV - 2014



Outro ângulo importante é o Ângulo Horário do Sol ( $\omega$ ) ou Horário Angular, esse ângulo é o deslocamento do meridiano do sol a partir do meridiano local e, devido a rotação da terra, o deslocamento ocorre leste-oeste. Abaixo temos a fórmula que o representa.

$$\omega = (H_s - 12) * 15^\circ$$

A cada hora solar ( $H_s = 1h$ ) equivale ao deslocamento de  $15^\circ$ .

O número de horas de sol é calculado conforme a equação abaixo:

$$N = \frac{2}{15} * \omega_s$$

Onde  $\omega_s$  é o ângulo horário do pôr do sol, que tem o comprimento  $-\omega_s$  e  $+\omega_s$  e é demonstrada pela equação:

$$\omega_s = \cos^{-1} * \left( -\frac{\text{sen}\Phi * \text{sen}\delta}{\text{cos}\Phi * \text{cos}\delta} \right) = \cos^{-1} * (-\text{tg}\Phi * \text{tg}\delta)$$

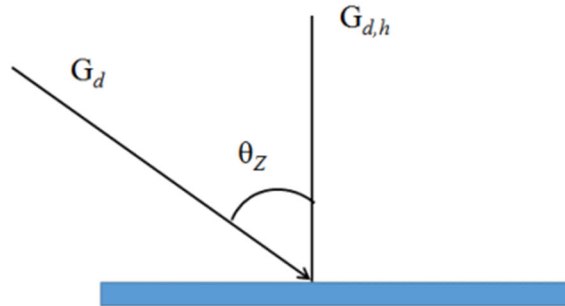
O ângulo de incidência ( $\theta$ ) pode se obter com a seguinte fórmula:

$$\begin{aligned} \cos\theta &= (\cos\beta * \cos\delta * \cos\omega * \cos\Phi) + (\cos\beta * \text{sen}\delta * \text{sen}\Phi) \\ &+ (\text{sen}\beta * \text{sen}\gamma * \cos\delta * \text{sen}\omega) + (\text{sen}\beta * \text{cos}\gamma * \cos\delta * \cos\omega * \text{sen}\Phi) \\ &- (\text{sen}\beta * \text{cos}\gamma * \text{sen}\delta * \cos\Phi) \end{aligned}$$

Para o cálculo da componente direta de irradiância solar coletado por um dispositivo de conversão de energia solar utiliza-se a fórmula abaixo sobre os ângulos Zenital ( $\theta_z$ ) e de Incidência ( $\theta$ ). Nas figuras 7 e 8 serão representadas as componentes das irradiâncias solares.

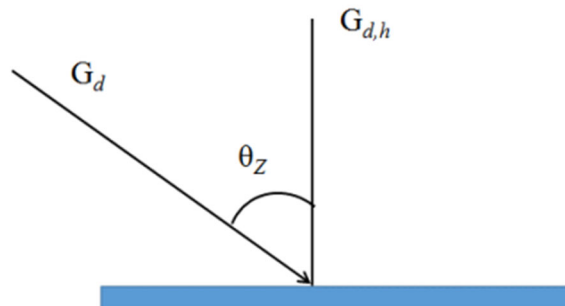
$$\frac{G_{d,\beta}}{G_{d,h}} = \frac{G_d * \cos\theta}{G_d * \cos\theta_z} = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z}$$

Figura 7 - Representação de irradiância sobre uma superfície horizontal.



Fonte: Manual de Engenharia FV - 2014

Figura 8 - Representação de irradiância sobre uma superfície inclinada.

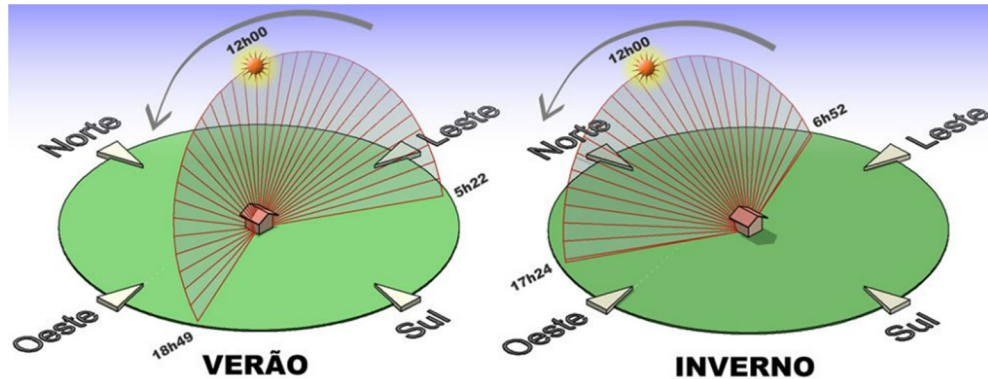


Fonte: Manual de Engenharia FV - 2014

No Brasil a posição ideal para se instalar painéis solares é sempre voltada para o Norte conforme ilustrado na figura 9.

Sabemos que o Sol nasce sempre ao leste, e no decorrer do dia conforme as horas vão se passando, ele faz uma leve inclinação ao Norte e ao final da tarde se põe no Oeste.

Figura 9 – Movimento do sol verão / inverno.



Fonte: <https://www.eduardoaquino.com.br/posicionamento-correto-do-painel-fotovoltaico/>

## 2.2 Métodos e cálculos

Para o dimensionamento do sistema, precisamos saber a quantidade de energia que se deve ser produzida, localização com o melhor montante de benefícios bem como a irradiação solar, a constância da irradiação no decorrer dos meses, benefícios fiscais e disponibilidade de terra, área para a instalação da fazenda solar.

### 2.2.1 Instrumentos de Medição da Radiação Solar

A medição da radiação solar na superfície terrestre, influências climáticas e atmosféricas são pontos importantíssimos para se desenvolver um projeto de conversão de energia solar, sendo o ponto de maior peso para um desenvolvimento de projeto solar. Para verificar a viabilidade de uma instalação de sistemas fotovoltaicos em uma determinada região são utilizados instrumentos que fazem essas medições e criam históricos para garantir o aproveitamento máximo do recurso ao longo do tempo.

O objetivo das medições são a obtenção experimental dos dados solares irradiância (fluxo energético solar) ou irradiação (integrado) ao longo do tempo.

Para a medição da irradiação solar são comumente utilizados dois instrumentos sendo o piranômetro e o pireliômetro.

Os principais modelos de piranômetro são o piranômetro fotovoltaico, apresentado na figura 10, e o piranômetro termoeletrico, apresentado na figura 11. O piranômetro fotovoltaico é um modelo de menor custo que é composto por uma célula fotovoltaica de pequenas dimensões, menor precisão nas medições com uma resposta espectral limitada de 400 a 1.100nm para os modelos com células de c-Si. A menor precisão desse modelo pode chegar à 5% de erro em relação ao modelo piranômetro termoeletrico.

Figura 10 – Piranômetro Fotovoltaico.



Fonte: <http://recursosolar.geodesign.com.br/>

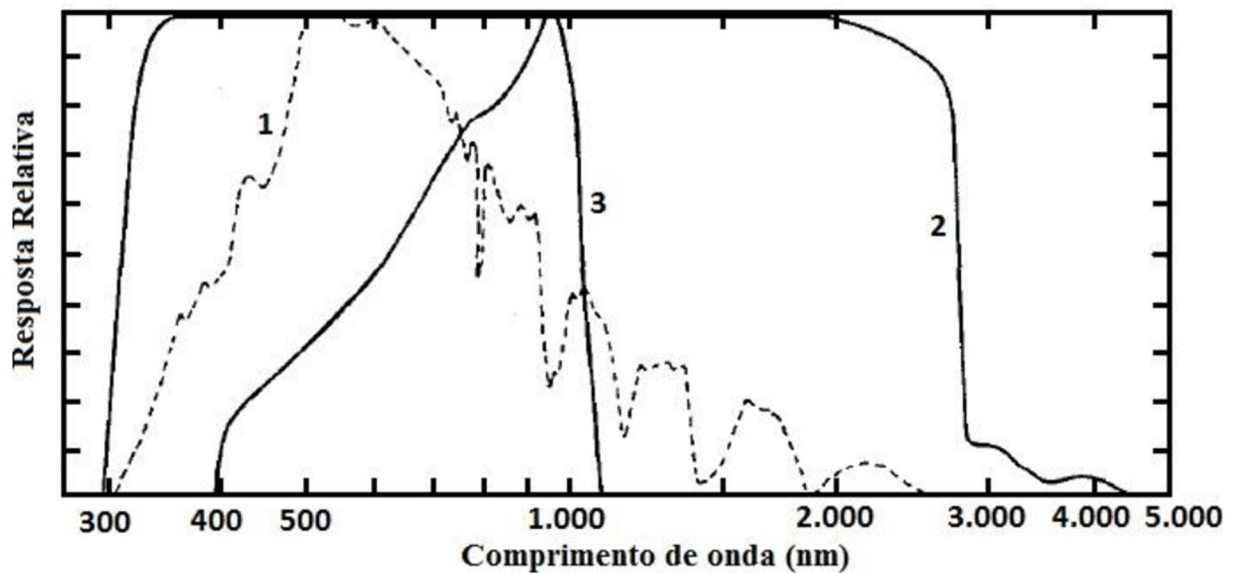
O piranômetro termoeletrico por sua vez mede a irradiância solar global (difusa + direta) no plano horizontal (campo hemisférico). Utiliza-se uma termopilha no interior de duas semiesferas de vidro concêntricas como sensor.

Figura 11 – Piranômetro Termoelétrico.



Fonte: <http://recursosolar.geodesign.com.br/>

Figura 12 – Resposta Espectral dos Piranômetros.



Fonte: Manual de Engenharia FV - 2014

A figura 12 apresenta a distribuição espectral da irradiância solar na superfície terrestre (1), o espectral do piranômetro termoelétrico (2) e a resposta do piranômetro fotovoltaico de silício (3).

O pireliômetro, apresentado na figura 13, é outro instrumento utilizado para medir a irradiância, no caso a direta com incidência normal à superfície. Ele bloqueia a irradiância difusa desde que o sensor termoeletrônico seja montado dentro de um tubo com paredes escura e fique apontado diretamente para o sol.

Figura 13 – Resposta Espectral dos Piranômetros.



Fonte: <http://recursosolar.geodesign.com.br/>

Com as medições e históricos conseguimos selecionar uma localização mais adequada para instalação do sistema fotovoltaico, dimensionamento do gerador fotovoltaico e o cálculo da produção de energia.

Para a localização deve-se também considerar outros pontos bem como terreno, vegetação, viabilidade econômica, leis locais / regionais.

## 2.3 Materiais e sua relevância

Para o estudo de caso foram considerados como essenciais, ou seja, de maior relevância tomando como base sua relevância para o processo, assim como seu custo no orçamento total os itens; os painéis fotovoltaicos e os inversores de tensão  $V_{cc}$  para  $V_{ca}$  bem como decorridos abaixo.

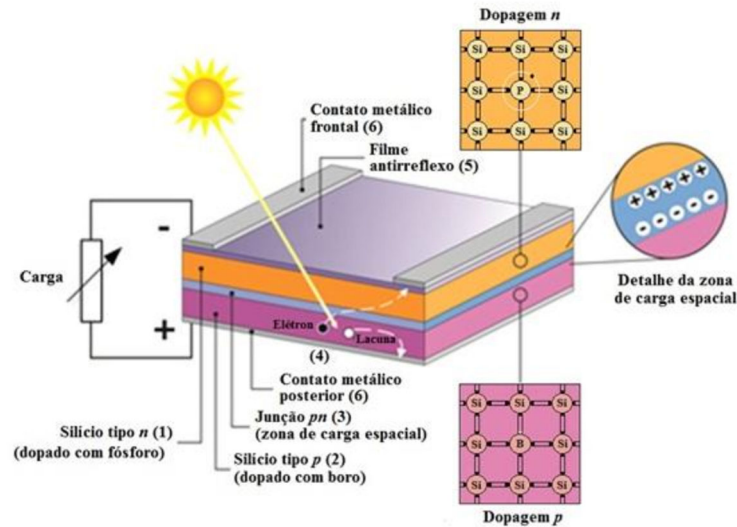
### 2.3.1 Módulos Fotovoltaicos

Segundo o Manual de Engenharia FV 2014 o efeito fotovoltaico foi descoberto por um cientista francês chamado Alexandre-Edmond Becquerel em 1839, quando observou que ao iluminar uma solução ácida surgia uma diferença de potencial entre os eletrodos imersos nessa solução. As primeiras células fotovoltaicas foram fabricadas em selênio e desenvolvidas por C.E. Fritz em 1883. Somente em 1950 foram fabricadas as primeiras células fotovoltaicas a partir de lâmina de silício cristalino e apresentaram uma eficiência de conversão de energia solar em elétrica de 6% sendo uma área de  $2\text{cm}^2$  e uma potência de 5mW.

Nos 60 anos que se passaram surgiram diversas tecnologias de fabricação para células fotovoltaicas onde a de lâmina de silício cristalino (monocristalino e policristalino) dominam o mercado.

Seu funcionamento ocorre a partir do momento que há movimentação de elétrons entre células positivas e negativas enquanto houver incidência de luz solar, dessa forma gerando uma corrente elétrica.

Figura 14 – Junção pn de uma Célula Fotovoltaica.



Fonte: Manual de Engenharia FV - 2014

A figura 14 nos ilustra a estrutura física de uma célula fotovoltaica de silício dopado com fósforo (junção  $n$ ) e com boro (junção  $p$ ) que forma a junção pn.

Conforme a tabela 4 a seguir, com modelos de mercado, a melhor opção hoje é a de silício monocristalino que atinge até 25% de eficiência.

Tabela 4 – Eficiência das células fotovoltaicas fabricadas em laboratórios até 2012

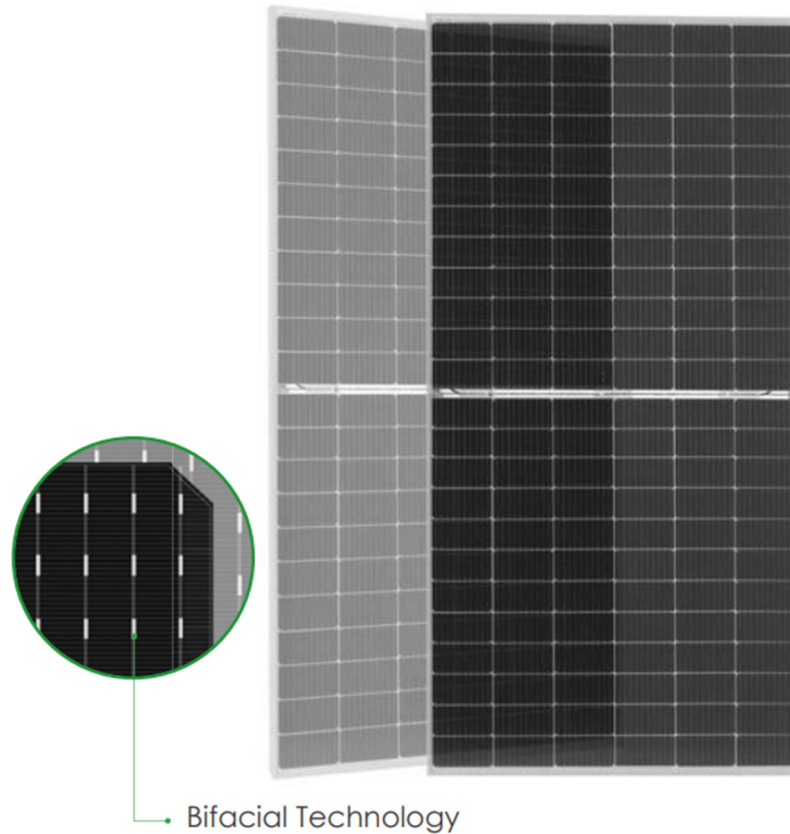
Tecnologia		Eficiência (%)
Silício	Monocristalino	$25,0 \pm 0,5$
	Policristalino	$20,4 \pm 0,5$
	Filmes finos transferidos <sup>4</sup>	$20,1 \pm 0,4$
Compostos III A-VA (ou 13-15)	GaAs (filme fino)	$28,8 \pm 0,9$
	GaAs (policristalino)	$18,4 \pm 0,5$
	InP (monocristalino)	$22,1 \pm 0,7$
Calcogênios Compostos II B-VI A (ou 12-16)	CIGS ( $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{Se}_2$ ) (filme fino)	$19,6 \pm 0,6$
	CdTe (filme fino)	$18,3 \pm 0,5$
Silício amorfo / nanocristalino	Amorfo (a-Si) (filme fino)	$10,1 \pm 0,3$
	Nanocristalino (nc-Si)	$10,1 \pm 0,2$
Células Sensibilizadas por Corantes (DSSC)		$11,9 \pm 0,4$
Células Orgânicas (filme fino)		$10,7 \pm 0,3$
Multijunção	InGaP/GaAs/InGaAs	$37,7 \pm 1,2$
	a-Si/nc-Si/nc-Si (filme fino)	$13,4 \pm 0,4$

Fonte: GREEN et al. 2013



A figura 15 abaixo nos apresenta o modelo de módulo monocristalino JKM525M-72HL4-TV da Jinko Solar e a figura 16 suas características mecânicas.

Figura 15 – Módulo Jinko Solar JKM525M-72HL4-TV.



Fonte: <https://www.jinkosolar.com/uploads/JKM525-545M-72HL4-TV-F1-EN.pdf>

Figura 16 – Características mecânicas.

<b>Mechanical Characteristics</b>	
Cell Type	P type Mono-crystalline
No. of cells	144 (6×24)
Dimensions	2274×1134×35mm (89.53×44.65×1.38 inch)
Weight	28.9 kg (63.7 lbs)
Front Glass	3.2mm, Anti-Reflection Coating, High Transmission, Low Iron, Tempered Glass
Frame	Anodized Aluminium Alloy
Junction Box	IP68 Rated
Output Cables	TUV 1×4.0mm <sup>2</sup> (+): 400mm , (-): 200mm or Customized Length

Fonte: <https://www.jinkosolar.com/uploads/JKM525-545M-72HL4-TV-F1-EN.pdf>

As figuras 17 e 18 abaixo nos apresenta as características elétricas.

Figura 17 – Especificações técnicas.

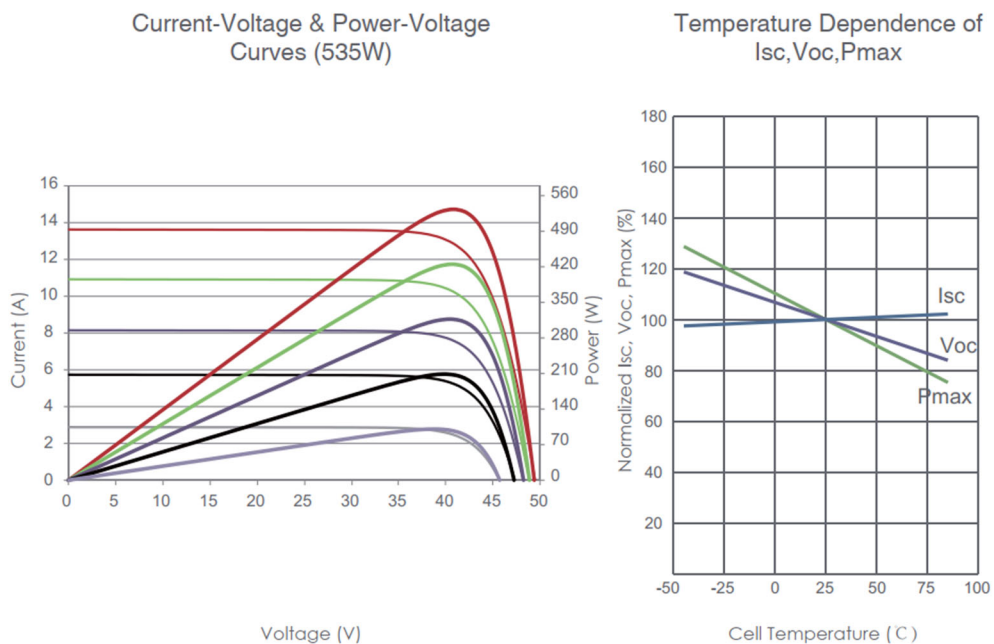
SPECIFICATIONS											
Module Type	JKM525M-72HL4-TV		JKM530M-72HL4-TV		JKM535M-72HL4-TV		JKM540M-72HL4-TV		JKM545M-72HL4-TV		
	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	
Maximum Power (Pmax)	525Wp	391Wp	530Wp	394Wp	535Wp	398Wp	540Wp	402Wp	545Wp	405Wp	
Maximum Power Voltage (Vmp)	40.61V	37.74V	40.71V	37.88V	40.81V	37.98V	40.91V	38.08V	41.07V	38.18V	
Maximum Power Current (Imp)	12.93A	10.35A	13.02A	10.41A	13.11A	10.48A	13.20A	10.55A	13.27A	10.62A	
Open-circuit Voltage (Voc)	49.27V	46.50V	49.35V	46.58V	49.42V	46.65V	49.49V	46.71V	49.65V	46.86V	
Short-circuit Current (Isc)	13.64A	11.02A	13.71A	11.07A	13.79A	11.14A	13.87A	11.20A	13.94A	11.26A	
Module Efficiency STC (%)	20.36%		20.55%		20.75%		20.94%		21.13%		
Operating Temperature(°C)	-40°C~+85°C										
Maximum system voltage	1500VDC (IEC)										
Maximum series fuse rating	30A										
Power tolerance	0~+3%										
Temperature coefficients of Pmax	-0.35%/°C										
Temperature coefficients of Voc	-0.28%/°C										
Temperature coefficients of Isc	0.048%/°C										
Nominal operating cell temperature (NOCT)	45±2°C										
Refer. Bifacial Factor	70±5%										

\*STC: ☀ Irradiance 1000W/m<sup>2</sup> 🌡 Cell Temperature 25°C ☁ AM=1.5  
 NOCT: ☀ Irradiance 800W/m<sup>2</sup> 🌡 Ambient Temperature 20°C ☁ AM=1.5 🌀 Wind Speed 1m/s

Fonte: <https://www.jinkosolar.com/uploads/JKM525-545M-72HL4-TV-F1-EN.pdf>

Figura 18 – Performance elétrica e temperatura de dependência.

## Electrical Performance & Temperature Dependence



Fonte: <https://www.jinkosolar.com/uploads/JKM525-545M-72HL4-TV-F1-EN.pdf>

### 2.3.2 Inversor String

Os inversores de frequência são equipamentos destinados a converter sinais de tensão elétrica senoidal em sinais de onda quadrada, utilizando uma modulação conhecida por PWM – Pulse Width Modulation (Modulação por Largura de Pulso), esse sinal passa por tratamentos em blocos internos do equipamento. Toda a conversão é feita através de um controle PID com MPPT simples que aumenta a eficiência de conversão. A este equipamento está atrelada a responsabilidade pela proteção da tensão gerada em corrente contínua, assim como a conversão em corrente alternada, que será injetada na rede do consumidor local.

O inversor funciona com uma ponte de transistores que chaveia a tensão contínua de forma que ela fique alternada, ligando e desligando o circuito várias vezes por segundo de forma a imitar um sinal senoidal. Dessa forma, para deixar o sinal de saída ainda mais perfeito, utiliza-se filtros indutivos e capacitivos.

Os transistores utilizados na construção do inversor solar são MOSFETs (transistor de efeito de campo), IGBTs (transistor bipolar de porta isolada) ou IGCT (transistor integrado controlado). O controle da tensão de saída funciona por meio de PWM

#### 2.3.2.1 Controle PID

PID é um sistema de controle proporcional com ação integral e derivativa. Esse sistema de controle ainda é o mais eficiente na atualidade.

Esse controle pode usufruir da estabilidade proporcionada pela ação P+D e pela eliminação do offset que a ação P+I pode trabalhar. Esse sistema é necessário ajustar os três parâmetros: o Ganho  $k_c$ ; o tempo integrativo  $t_i$ ; e o tempo derivativo  $t_d$ , o que dificulta a sincronização.

## Equação PID

$$m_{(t)} = k_c * e_{(t)} + \frac{k}{t_i} \int_0^t e_{(t)} * dt + k_c * t_d * \frac{de_{(t)}}{dt} + b$$

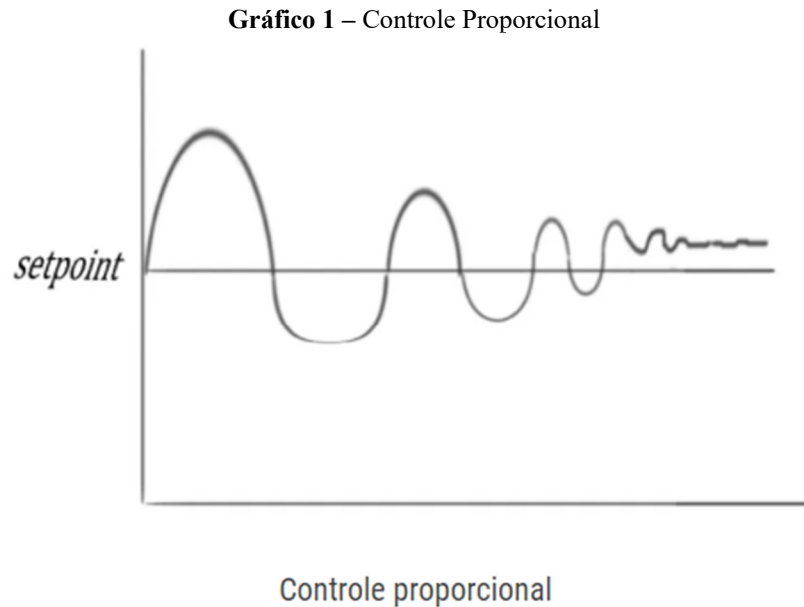
### 2.3.2.1.1 Controle Proporcional

O controle proporcional trabalha sempre em cima do erro do sistema, ou seja, ele irá variar conforme o erro e não trabalhará com tempo.

#### Equação Controle Proporcional

$$m_{(t)} = k_c * e_{(t)} + b$$

- $m_{(t)}$  – é a saída do sistema.
- $k_c$  – O ganho, é a variável que o sistema trabalhará, pode ver que ela está se multiplicando com o erro ( $e_{(t)}$ ).
- $e_{(t)}$  (variável medida) – Ela é a diferença entre o valor real e o valor desejado (setpoint);
- $b$  – é uma constante a ser definida.



Fonte: <https://abee-go.org.br/2019/05/01/tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-controle-pid/>

O gráfico acima mostra que o nesse controle o sinal se alinha o mais próximo possível da linha do setpoint. O controle proporcional possui essa peculiaridade que é dado o nome de offset.

Este erro residual consiste no estado estacionário, e pode ser alterado com o ajuste do ganho  $k_c$ .

#### 2.3.2.1.2 Controle Integral

Na ação integral a velocidade da correção que é proporcional ao erro e não a ação conforme no controle proporcional. No controle integral trabalha-se com tempo de forma direta. A razão é que a ação integral isolada fornece uma velocidade de resposta pequena. Na prática a ação integral é usada juntamente com a ação proporcional, P+I.

O Controle P + I é a ação mais utilizada pois ele não apresenta o offset que o proporcional apresenta e ele possui resposta mais rápida do que a ação integral.

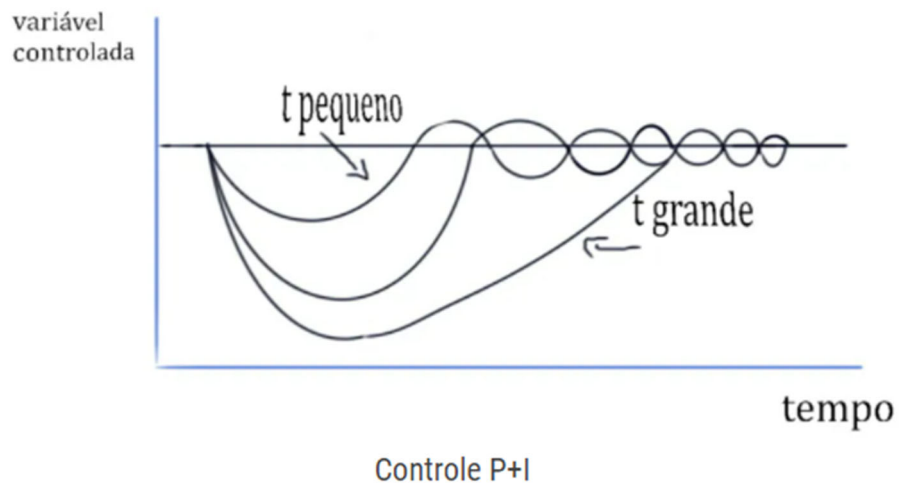
## Equação Controle P+I

$$m(t) = k_c * e(t) + \frac{k}{t_i} \int_0^t e(t) * dt + b$$

A parte verde, ação proporcional, da equação já foi apresentada na ação proporcional derivativa, a segunda parte vermelha, integração do erro em relação ao tempo, da equação é a ação integral. Nesse controle as variáveis controladas serão o ganho (k) e o tempo (t). No P+I, quando o tempo for pequeno, ocorrerá grandes oscilações, o que leva a estabilização demorar mais tempo, já quando o tempo é grande, o percurso que a variável terá para chegar ao pointset será mais menor.

No gráfico a seguir, podemos ver exemplos de como o controle agiria conforme a alimentação da variável do tempo integral.

**Gráfico 2 – Controle P+I**



Fonte: <https://abee-go.org.br/2019/05/01/tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-controle-pid/>

### 2.3.2.1.3 Controle Derivativo

Essa ação sempre será usada junto a proporcional e nunca sozinha. Sendo assim teremos o controle P+D.

A saída deste sistema é função da derivativa da variável do erro em relação ao tempo.

Equação Controle P+D

$$m_{(t)} = k_c * e_{(t)} + k_c * t_d * \frac{de_{(t)}}{dt} + b$$

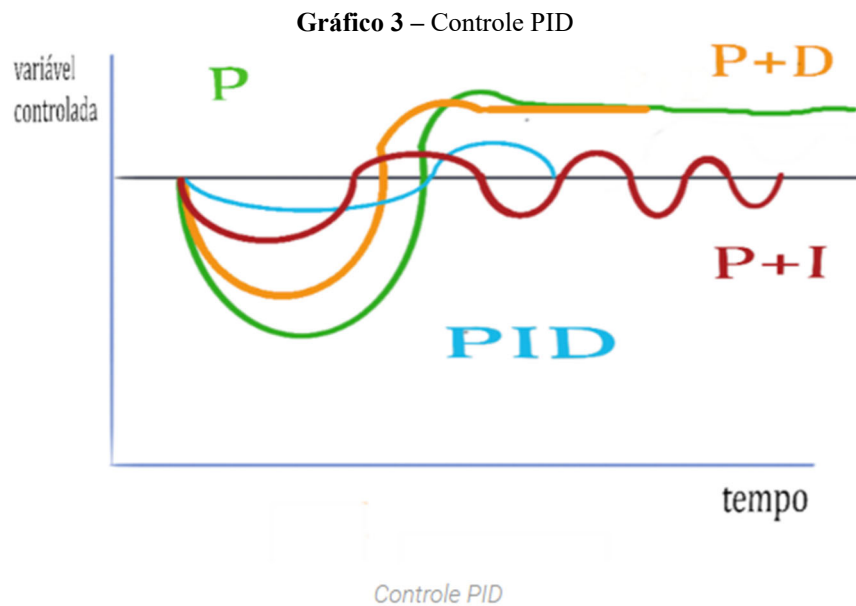
A parte azul, ação proporcional, da equação já foi apresentada na ação proporcional derivativa, a segunda parte roxa, derivação do erro em relação ao tempo. Esse controle é bem eficiente em relação a correção, pois ele já inicia a correção imediatamente assim que o erro começa a variar, devido a derivação de constante ser sempre zero. O controle não trabalha com ganho, mas sim com rampa, sendo assim então a variação da rampa em relação ao erro é que causará o efeito desse controle.

O tempo simboliza a saída da ação proporcional até chegar na saída de forma derivativa. Conforme apontado no sistema P+I, os valores altos e baixos para o tempo influenciam. Quando temos tempos grandes, temos uma maior estabilidade no sistema e velocidade de resposta baixa. Quando nós falamos de tempos curtos, temos muitas oscilações e quedas na estabilidade.

Esse controle também tem a característica de deixar um resíduo, o offset. Mesmo assim, a ação derivativa melhora a estabilidade do sistema, de forma que o ganho pode ter aumento através da ação proporcional sem comprometer a estabilidade do sistema.

Resumindo o controle via PID, é um ótimo sistema atualmente por fazer a correção do offset de forma mais rápida e assertiva.

No gráfico a seguir, temos o controle PID com os 03 controles simultâneos:



Fonte: <https://abee-go.org.br/2019/05/01/tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-controle-pid/>

### 2.3.2.2 Modulação PWM

PWM – Pulse Width Modulation (Modulação por Largura de Pulso) é uma técnica que veio para substituir algumas técnicas antigas para controle de potência como as técnicas on-off, modulação de frequência (FM) e até mesmo potenciômetros (resistores variáveis). Essa técnica trabalha como a on-off porém faz o controle da largura do pulso dentro do período.

No caso do inversor solar o controle PWM atua diretamente na ponte inversora convertendo o sinal de onda quadrada em sinal de tensão elétrica senoidal (DC para AC). Dada a largura que esses pulsos apresentam, ocorre uma variação na tensão/corrente analisando sempre a entrada (DC) e a saída (AC) para ter a maior eficiência na conversão.

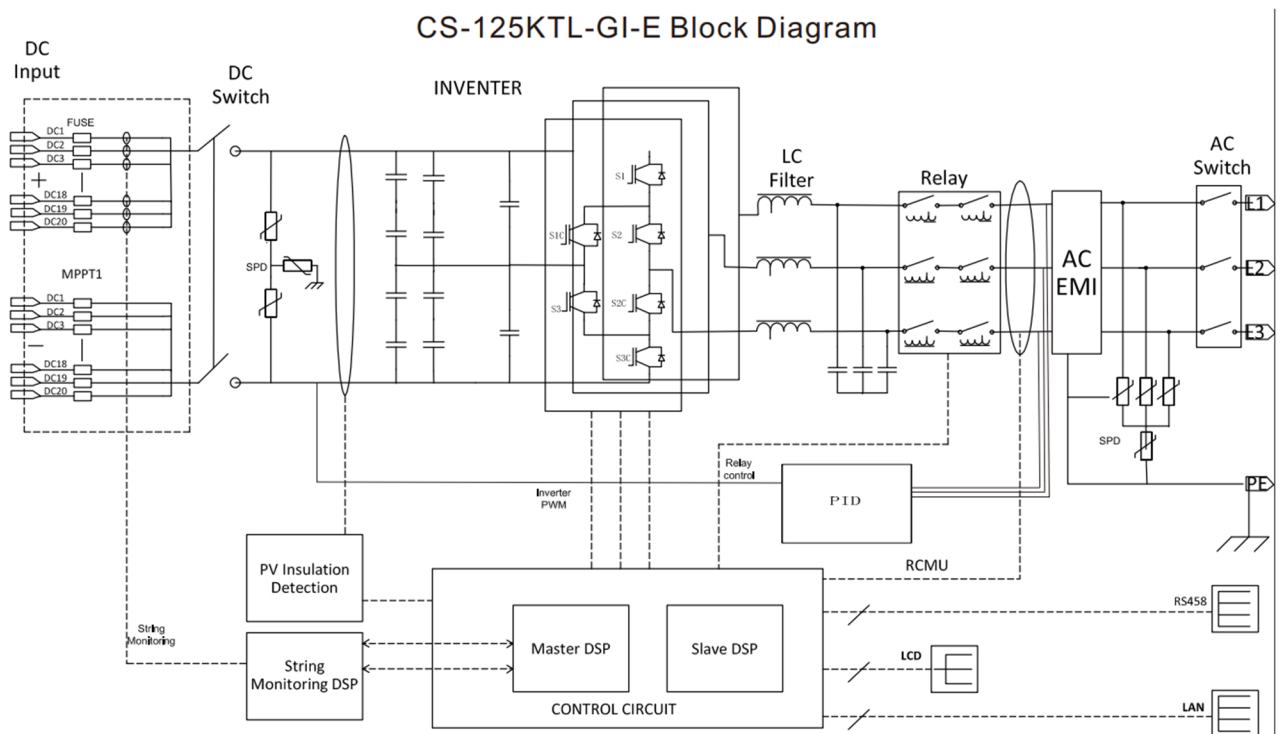


### 2.3.2.3 Recurso MPPT

MPPT é a sigla para maximum power point tracking (rastreamento do ponto de máxima potência), que é um recurso embutido em todos os inversores para uso em sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Esse recurso é importante para garantir a operação dos módulos fotovoltaicos sempre no ponto de máxima potência, possibilitando a máxima geração de energia pelo sistema fotovoltaico.

Abaixo na figura 19 será apresentado um diagrama de blocos com detalhamento interno, uma imagem do inversor seus dados técnicos para o modelo String CS125KTL-GI-E da CanadianSolar.

Figura 19 – Diagrama de blocos - CSI-125KTL-GI-E.



Fonte: <https://canadiansolar.com.br/la/knowledge-base/trifasico-125kw-01-2020-2/>

Seguindo a linha de geração em DC para AC, esquerda para a direita, temos o MPPT, nesse caso para a entrada de até 20 circuitos fotovoltaicos seguidos por uma chave seccionadora DC, um circuito de proteção contra riscos atmosféricos da entrada DC, barramento com filtro DC composto de capacitores, a ponte inversora DC para

AC que pode ser composta por MOSFETs (transistor de efeito de campo), IGBTs (transistor bipolar de porta isolada) ou IGCT (transistor integrado controlado) e é onde o controle PWM atua através de um circuito controlador, outro filtro já em CA composto pela associação de indutores e capacitores, um conjunto de relés controlados também pelo controlador do inversor, controle via sistema PID entre a entrada em DC e a saída em AC para se extrair o máximo na conversão, um filtro de interferência eletromagnética, um circuito de proteção contra riscos atmosféricos da saída CA e por fim uma chave seccionadora CA.

Figura 20 – Inversor de string trifásico 125kW - CSI-125KTL-GI-E.



Fonte: <https://canadiansolar.com.br/la/knowledge-base/trifasico-125kw-01-2020-2/>

Na figura 20 acima temos um exemplar da CanadiaSolar onde é possível vermos o inversor com a estrutura de fixação, invólucro, a IHM para operação / parametrização, uma das seccionadoras, DC ou CA, conectores de entrada DC e CA na parte inferior da figura.

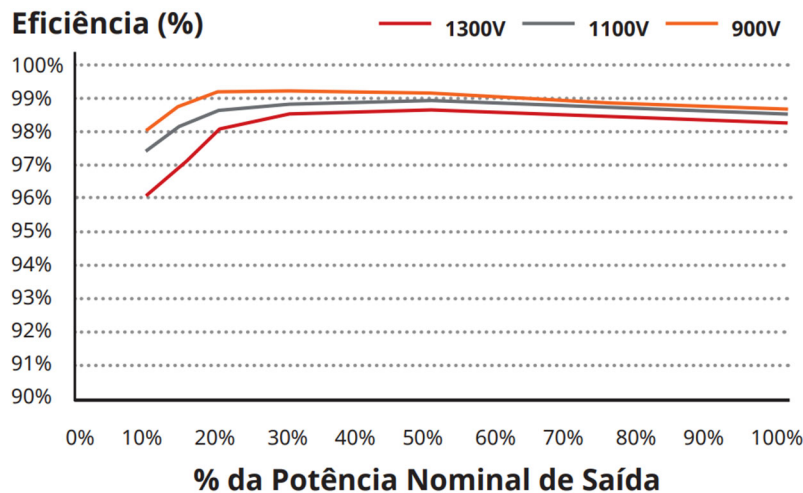
Abaixo temos a ficha técnica do Inversor de string trifásico 125kW - CSI-125KTL-GI-E.

<b>DADOS TÉCNICOS/SISTEMA</b>	
<b>NOME DO MODELO</b>	<b>CSI-125KTL-GI-E</b>
<b>ENTRADA CC</b>	
Máx. Potência PV	187,5 kW
Máx. Tensão de Entrada CC	1500 V CC
Faixa de Tensão de Entrada CC de Operação	860 a 1450 VCC
Tensão/Potência de Partida da Entrada CC	900 V CC
Número de MPPTs	1
Faixa de Tensão de MPPT	860 a 1450 V CC
Corrente de Operação (Imp)	150 A
Máx. Corrente de Entrada (Isc)	300 A
Número de Entradas CC	20
Tipo de Desconexão CC	Chave de Carga CC Nominal
<b>SAÍDA CA</b>	
Potência Nominal de Saída CA	125 kW
Potência Nominal de Saída CA	125 kW
Tensão Nominal de Saída	600 V CA
Faixa de tensão de operação*	528 a 660 VCA
Tipo de Conexão de rede	3 $\Phi$ /PE
Corrente Nominal CA de Saída @600 Vca	120 A
Frequência Nominal de Saída	50/60 Hz
Faixa de Frequência de Saída*	47 a 62 Hz
Fator de Potência	1 padrão ( $\pm 0,8$ ajustável)
THDI	< 3%
Tipo de desconexão CA	Chave de Carga CA Nominal
<b>SISTEMA</b>	
Topologia	Sem Transformador
Máx. Eficiência	99,1%
Eficiência CEC	98,6%
Consumo Noturno	< 2 W
<b>AMBIENTE</b>	
Grau de proteção	NEMA 4X (IP65)
Resfriamento	Resfriamento Inteligente Redundante
Faixa de Temperaturas de Operação	-13 ° F a + 140 ° F / -25 ° C a +60 ° C
Faixa de Temperaturas de Armazenamento	-40 ° F a + 158 ° F / -40 ° C a +70 ° C
Umidade de Operação	0 a 100%
Altitude de Operação	13123,4 pés / 4000 m
Ruído Audível	<55 dBA @ 1 m

<b>DADOS TÉCNICOS/SISTEMA</b>	
<b>MOSTRADOR E COMUNICAÇÃO</b>	
Mostrador	LED
Comunicação	Padrão: RS485 (Modbus RTU), E MODBUS over ETHERNET
<b>DADOS MECÂNICOS</b>	
Dimensões (L / A / P)	46,3 x 28,1 x 12,4 pol. / 1176 x 713,5 x 315 mm
Peso	82kg
Ângulo de Instalação	Inclinação para trás até 15 graus
Amperagem nominal do fusível CC	20 A padrão
<b>SEGURANÇA</b>	
Segurança e Padrão EMC	IEC/EN 62109-1/-2, IEC/EN 61000-6-2/-4
Padrão da rede	VDE0126-1-1, IEC61683 or EN50530
Recursos Smart-Grid	Voltage-Ride Thru, Frequency-Ride Thru, Soft-Start, Volt-Var, Frequency-Watt, Volt-Watt

O quadro 1 abaixo apresenta a eficiência do inversor e, uma tensão de 900Vcc.

Quadro 1 - Curva de eficiência CSI-125KTL-GI-E



Fonte: <https://canadiansolar.com.br/la/knowledge-base/trifasico-125kw-01-2020-2/>

No quadro acima temos a representação da eficiência de acordo com a potência de saída do inversor em 03 tensões sendo 900V, 1100V e 1300V. vemos que quanto menor a tensão maior a eficiência e conforme aumentamos a potência de saída entre 10% e 30% aproximadamente temos um aumento brusco na eficiência e uma leve queda da mesma entre 20% aproximadamente e 100% da potência nominal de saída de acordo com a tensão analisada.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Como dito anteriormente o estado de Minas Gerais é um dos estados brasileiros que possui o kWh mais caro do país. A concessionária local CEMIG cobra aproximadamente na tarifa residencial R\$ 0,618/kWh enquanto a média nacional é de R\$ 0,573/kWh, R\$ 0,703/kWh na Celpa no estado do Pará e de 0,490 na CPFL Piratininga no interior do estado de São Paulo.

Em um exemplo de um consumidor residencial que consome 100kWh mês da CEMIG, sem contar as bandeiras tarifárias, o valor pago seria a partir de R\$ 61,81 onde:

- Energia que foi gerada na usina: R\$ 33,47 - 54,1%;
- Transmissão energia até a subestação de distribuição: R\$ 4,05 - 6,6%;
- Distribuição que adequa a tensão para seu consumo: R\$ 19,24 - 31,1%;
- Encargos: R\$ 5,06 - 8,2%.

A componente que ainda falta são os tributos federais, estaduais e municipais, que estão embutidos nos preços dos bens e serviços.

As distribuidoras apenas recolhem e repassam esses tributos às autoridades competentes pela sua cobrança. A ANEEL publica, por meio de resolução, o valor da tarifa de energia sem os tributos, por classe de consumo (residencial, comercial, industrial, etc.).

Com base nesses valores, as distribuidoras incluem os tributos: PIS, COFINS, ICMS e CIP, e emitem a conta de luz que os consumidores pagam.

$$\frac{\text{Valor da tarifa publicada pela ANEEL}}{1 - (\text{PIS} + \text{COFINS} + \text{ICMS})}$$

Lembrando que a alíquota de ICMS aplicado nas contas de luz no estado de Minas Gerais para clientes de baixa tensão residencial é de 30%, estabelecimentos comerciais possuem alíquota de 25% e industriais, 18%. A alíquota de PIS e COFINS de 1,65% e 7,6%, respectivamente, apurados de forma não cumulativa, varia todos os meses. Esse tributo varia com o volume de créditos apurados mensalmente pelas concessionárias e com o PIS e a COFINS pagos sobre custos e despesas no mesmo período. Por exemplo nas contas de luz da CEMIG referentes a setembro de 2020, a alíquota efetiva de PIS e COFINS foi de 4,87%.

O exemplo do consumidor residencial que consome 100kWh mês, o valor que antes era de R\$ 61,81 salta para R\$ 92,82.

Minas Gerais, por sua vez, é o estado mais avançado na questão de incentivos para a geração fotovoltaica pois, já participava do Convênio 16/2015 do CONFAZ que deixava o estado adotar a isenção da alíquota de ICMS no kWh da parte gerada a partir de sistemas fotovoltaicos de até 1MW, em 2017 criou a Lei 22.549 que amplia a geração de até 5MW em sistemas fotovoltaicos e nas quatro modalidades existentes sendo a geração junto a carga, autoconsumo remoto, empreendimento de múltiplas unidades consumidoras e a que irá nos interessar, a geração compartilhada. Outro ponto positivo do estado e uma das principais diferenças dentre os outros estados, Minas Gerais adotou a isenção do ICMS nas tarifas TE e TUSD enquanto todos os outros estados aderiram parcialmente apenas na tarifa TE.

Por exemplo, se houver o consumo de 1000kWh, a geração de 800kWh, o consumidor irá pagar ICMS apenas sobre 200kWh.

Segundo Castilho; Brito (Energia Hoje), “A isenção do ICMS para a geração distribuída de energia: críticas, riscos e exemplo”.

De acordo com Thiago Castilho (Energia Hoje),

O Convênio ICMS nº 16/2015, aprovado no âmbito do Conselho Nacional de Política Fazendária (Confaz), autorizou os Estados signatários, mediante edição de legislação específica, a concederem isenção do ICMS incidente sobre a energia elétrica fornecida pela distribuidora à unidade consumidora, na quantidade correspondente à soma da energia elétrica injetada na rede de distribuição pela mesma unidade consumidora ou por outra unidade do mesmo titular, através de geração distribuída com capacidade instalada de até 1 MW, nos termos da Resolução Normativa nº 482/2012.

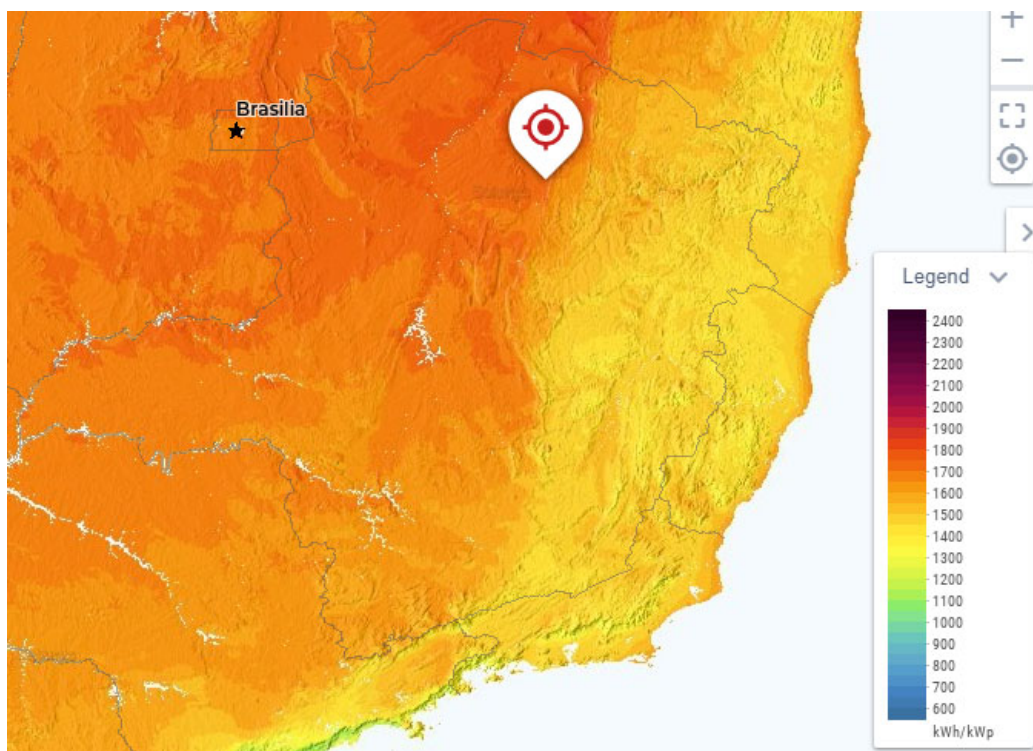
Em iniciativa arrojada, o Estado de Minas Gerais promulgou, no final do mês de junho, a Lei nº 22.549/2017, que acrescentou o Art. 8-C à Lei 6.763/1975, que consolida a legislação tributária naquela unidade federativa. Referida norma não só concedeu a isenção do ICMS nas operações previstas no Convênio ICMS nº 16/2015 como foi além, e admitiu a aplicação dessa desoneração na compensação da energia gerada através de projetos de geração distribuída que integrem ou se caracterizem como empreendimento de múltiplas unidades consumidoras ou geração compartilhada e/ou possuam capacidade instalada de

até 5 MW. Como ponto negativo, a referida norma isentou o ICMS apenas na compensação de energia proveniente de geração distribuída de fonte solar fotovoltaica.

O estado de Minas Gerais está também entre os estados com melhor incidência solar, proporcionando luz solar de alta qualidade a maior parte do ano. O estado está entre os 6 estados que mais geram energia solar segundo o site portal solar, nesta lista ainda constam São Paulo, Rio Grande do Sul, Rio de Janeiro, Ceará e Paraná.

Estudos apresentados confirmam o estado de Minas Gerais, como uma das melhores regiões de incidência de raios solares, abaixo a figura 21 confirmando a localização do estado com grande incidência desses raios.

Figura 21 – Mapa da Potência Fotovoltaica Específica de Minas Gerais.

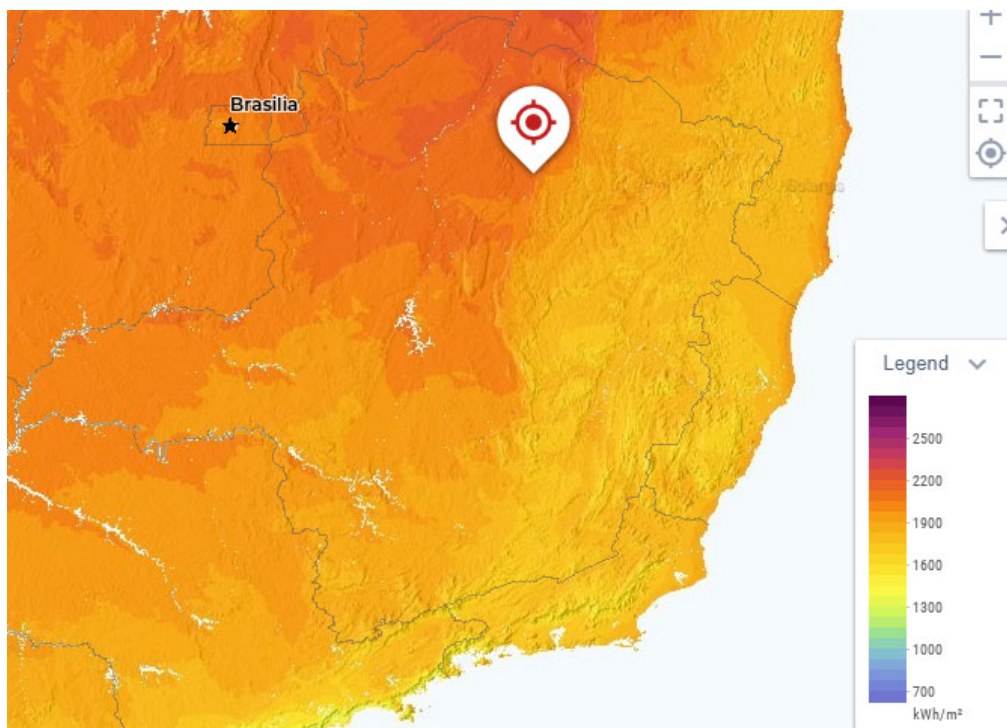


Fonte: < <https://globalsolaratlas.info/map?c=-17.769612,-47.109375,4&s=-16.477721,-43.494259&m=site>>, acesso em 21 mar. 2021.

Com tantos benefícios o estado se tornou alvo de inúmeros investidores e expandiu rapidamente o player energia solar. Com mais de 6.000 sistemas de energia solar instalados até 2019, entre instalações residenciais e comerciais, o estado se tornou celeiro de bons investimentos.

O estado de Minas Gerais tem uma capacidade de 1500 à 1800 kWh/kWp e de 1600 à 2200 kWh/m<sup>2</sup> de irradiação solar horizontal conforme figura 22, e o dado mais importante para um sistema fotovoltaico, 5.822 Wh/m<sup>2</sup> dias para o plano inclinado conforme tabela 4. O estado também apresenta uma disponibilidade territorial muito favorável para a instalação de usinas solares. A região norte do estado, tem uma desvantagem na produção de agropecuária em relação ao restante do estado, apresenta um índice de desenvolvimento menor onde muitos produtores perdem ou não conseguem suprir a própria existência com a produção devido a maior disponibilidade do sol, permeando este cenário de baixa produção no agronegócio, muitos pecuaristas veem nas fazendas solares uma forma de complementar a renda, viabilizando facilidades para o arrendamento de terrenos e áreas rurais, com contratos de médio e longo prazo, em uma negociação ágil, hábil e vantajosa para ambos os lados.

Figura 22 – Mapa da Irradiação Solar Horizontal de Minas Gerais.



Fonte: < <https://globalsolaratlas.info/map?c=-19.652934,-44.714355,6&s=-16.477721,-43.494259&m=siteacesso> em 21 mar. 2021.



Tabela 4 – Médias do Total Diário da Irradiação no Plano Inclinado para o Estado de MINAS GERAIS.

**Médias do Total Diário da Irradiação no Plano Inclinado para o Estado de MINAS GERAIS***(Wh/m<sup>2</sup>.dia)*

Mostrar  registros Procurar:  [Inserir ID](#)

ID	Lon	Lat	Anual	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
18217	-43,749	-16,3005	5822	5813	6324	5805	5856	5600	5438	5729	6337	6287	5857	5191	5622

Fonte: [http://labren.ccst.inpe.br/atlas2\\_tables/MG\\_inc.html](http://labren.ccst.inpe.br/atlas2_tables/MG_inc.html)

Diante deste cenário, identifica-se a possibilidade de empreender em um novo negócio de fazenda solar, no norte de Minas Gerais onde as terras são “férteis” de irradiação solar, fortes incentivos fiscais e com área para arrendamento com preços atrativos, surge a ideia de empreender neste seguimento. Em uma área de 3 alqueires, aproximadamente 50.000m<sup>2</sup>, é possível a geração de 5MW de energia, para isso se faz necessário uma composição de 9540 painéis solares cada um de 525W de potência, combinados com 30 inversores de 125kW – 400V, organizados em lay out de 953 fileiras. Com custo inicial orçado em R\$ 14,5M para a instalação.

A fazenda solar gera a energia, o cliente final contrata o plano, a energia gerada é disponibilizada na rede da distribuidora local, a própria distribuidora faz o desconto equivalente a área contratada do cliente em sua fatura de energia, resultando dessa forma em uma economia na conta final do cliente. O estado de Minas Gerais também saiu na frente dos demais ao isentar a taxa do ICMS no que compete a geração distribuída, ou seja, o cliente cativo que gera sua própria energia paga a alíquota do ICMS sobre o consumo líquido, já com a energia gerada descontada.

Tomando como base a os estudos do Solstício, renomados institutos passaram a estudar a irradiação no Brasil, para este estudo manteremos o foco no estado de Mina Gerais.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No Brasil a geração compartilhada para um consumidor cativo tem modelos de estruturamento sendo alguns deles o consórcio, cooperativa e sociedade empresária Ltda ou EIRELI.

O modelo utilizado é o de consórcio que é a junção de duas ou mais pessoas jurídicas onde essa junção é registrada em um contrato social que vai a registro na junta comercial do estado. Conforme constituído o consórcio, os consorciados estarão aptos a receber os créditos de energia gerados na usina solar que vai ser alugado para o consórcio.

A intenção não é vender energia e sim alugar os equipamentos de geração através de planos e pacotes para terceiros.

Portanto o norte do estado de Minas Gerais possui todos os pontos favoráveis para a implantação de um sistema fotovoltaico com um montante de geração significativa.

Se obtém uma boa irradiação solar em grande parte do tempo, grandes áreas rurais possíveis de disponibilidade devido as condições climáticas não serem apropriadas para plantações e isenções fiscais diferenciada entre todos os outros estados.

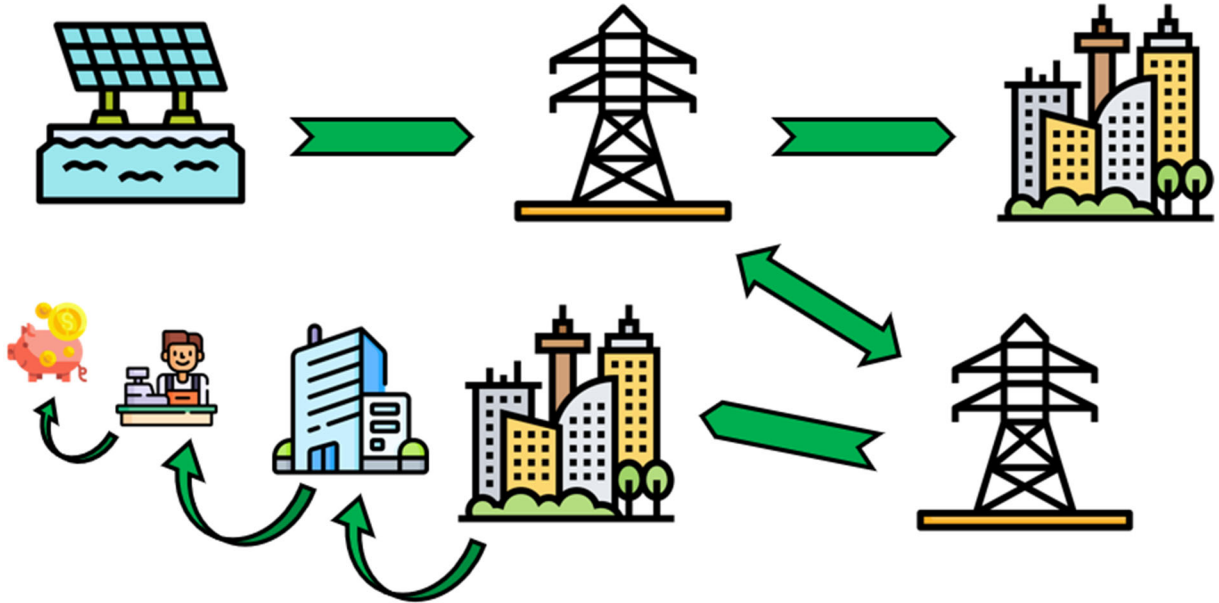
Com a modalidade geração compartilhada temos regras a serem seguidas bem como, geração fotovoltaica até 5MW, no caso de Minas Gerais; atuação somente em cidades atendida pela mesma concessionária; não se pode comercializar energia, ou seja, não se pode vender propriamente a energia gerada; realizar pagamentos em forma de energia como por exemplo, no caso do arrendamento do terreno para a implantação da fazenda solar, não pode ser pago em relação a energia gerada e sim via um contrato firmado entre as partes em valores em reais.

Por isso as atividades de negócio são as 35.11-5-02 - Atividades de coordenação e controle da operação da geração e transmissão de energia elétrica e a 77.39-0-99 - Aluguel de outras máquinas e equipamentos comerciais e industriais não especificados anteriormente, sem operador.

Desta forma a energia gerada nas fazendas, são disponibilizadas na rede local da concessionária onde será feito o consumo/transmissão, o cliente contratante segue

fazendo consumo da rede local e fica a cargo da concessionária realizar o administrar a geração/consumo de cada cliente conforme ilustração da figura 23 abaixo.

Figura 23 – Fluxograma do arrendamento de lotes, para produção de energia elétrica por sistema fotovoltaico.



## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com estudos levantados ao longo desta pesquisa, encontramos as evidências e pontos relevantes que têm atraído empresas do seguimento fotovoltaico para o estado de Minas Gerais. Considerando os pontos pesquisados de um dos players envolvidos, o qual não permitiu sua citação, ele tem obtido êxito e sucesso no arrendamento de lotes para produção de energia fotovoltaica, com divulgação nesse semestre de inauguração de 9 fazendas solares totalizando 22,5MW e mais de 50mil painéis fotovoltaicos instalados.

Ao longo deste foi possível evidenciarmos capacidade produtiva de energia fotovoltaica, através de solstício abundante e grande disponibilidade de terrenos improdutivos para a agropecuária, foi demonstrado também a disponibilidade do governo estadual em incentivar políticas favoráveis para o desenvolvimento de negócios deste segmento.

Com a alavancagem do novo player, os consumidores do estado de Minas Gerais estão tendo a possibilidade de se tornarem clientes de “novo negócio” arrendamento de lotes para produção de energia elétrica por sistema fotovoltaicos e desta forma pequenos e médios empreendedores estão conseguindo solucionar o problema do alto custo da energia, com redução média entre 10 e 15% em suas faturas da CEMIG.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CASTILHO, Thiago, **A isenção do ICMS para a geração distribuída de energia: críticas, riscos e exemplo**, Publicado em 06/09/2017, Disponível em: <https://energiahoje.editorabrasilenergia.com.br/artigo-isencao-do-icms-para-geracao-distribuida-de-energia-criticas-riscos-e-exemplo/>, Acesso em: 11 de abril de 2021.

GLOBAL SOLAR ATLAS, Acessado em 08/04/2021, Disponível em: <https://globalsolaratlas.info/map>

LABREN, **Dados de irradiação para o Estado de MINAS GERAIS**, Publicado em 06/09/2017, Disponível em: [http://labren.ccst.inpe.br/atlas\\_2017\\_MG.html](http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017_MG.html)

CanadianSolar, Acessado em 27/10/2021, Disponível em: <https://canadiansolar.com.br>

Jinko Solar, Acessado em 27/10/2021, Disponível em: <https://jinkosolar.com>

Associação Brasileira de Engenheiros Eletricistas – Seção de Goiás, Acessado em 09/11/2021, **Tudo o que você precisa saber sobre controle PID**, Publicado em 01/05/2019, Disponível em: <https://abee-go.org.br/2019/05/01/tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-controle-pid/>

Canal Solar, Acessado em 09/11/2021, **Inversor solar com 2 MPPT operando com entrada única**, Publicado em 16/07/2020, Disponível em: <https://canalsolar.com.br/inversor-solar-com-2-mppt-operando-com-entrada-unica/>

Eduardo Aquino, Acessado em 09/11/2021, **Posicionamento correto do Painel Solar**, Publicado em 11/05/2016, Disponível em: <https://www.eduardoaquino.com.br/posicionamento-correto-do-painel-fotovoltaico/>

REIS, Pedro, **ENERGIA FOTOVOLTAICA - MANUAL SOBRE TECNOLOGIAS, PROJECTO E INSTALAÇÃO**, Publicado em 27/03/2019, Disponível em: <https://www.portal-energia.com/manual-e-guia-tecnico-de-projecto-e-instalacao-da-energia-solar-termica/>

MARKVART, T.; CASTAÑER, L.; **Practical handbook of photovoltaics fundamentals and applicattios**; ELSEVIER, 2003.

PINHO, J. T.; BARBOSA, C. F. O.; PEREIRA, E. J. S.; SOUZA, H. M. S.; BLASQUES, L. C. M.; GALHARDO, M. A. B.; MACEDO, W. N.; **Sistemas híbridos – Soluções energéticas para a Amazônia**; 1ª ed. Brasília, Brasil: Ministério de Minas e Energia, 2008.

Dirceu Azevedo, Acessado em 09/11/2021, **TUDO O QUE VOCÊ SEMPRE QUIS SABER SOBRE SUA CONTA DE LUZ DA CEMIG**, Publicado em 11/10/2020, Disponível em: <https://sunwise.com.br/tudo-o-que-voce-sempr-quis-saber-sobre-sua-conta-de-luz-da-cemig/>