



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS**

**ALLAN PACCELI OLIVEIRA CALLOU**

**ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DE IMPLANTAÇÃO DE UM  
SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO EM UMA EMPRESA**

**FORTALEZA**

**2018**

**ALLAN PACCELI OLIVEIRA CALLOU**

**ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DE IMPLANTAÇÃO DE UM  
SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO EM UMA EMPRESA**

**Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia  
de Energias Renováveis da  
Universidade Federal do Ceará, como  
requisito parcial para obtenção do grau  
de Bacharel em Engenharia de  
Energias Renováveis.**

**Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Ana Fabíola  
Almeida**

**FORTALEZA**

**2018**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

C16a Callou, Allan.

Análise de viabilidade econômica de implantação de um sistema solar fotovoltaico em uma empresa / Allan Callou. – 2019.

61 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia de Energias Renováveis, Fortaleza, 2019.

Orientação: Profa. Dra. Ana Fabíola Almeida.

1. Sistemas solares fotovoltaicos. 2. Geração distribuída. 3. Viabilidade econômica. 4. Alta tensão. 5. Dimensionamento. I. Título.

CDD 621.042

---

**ALLAN PACCELI OLIVEIRA CALLOU**

**ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DE IMPLANTAÇÃO DE UM  
SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO EM UMA EMPRESA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Energias Renováveis da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Energias Renováveis.

Aprovado em \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_\_.

**BANCA EXAMINADORA**

---

**PROF.<sup>a</sup> ANA FABÍOLA ALMEIDA**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**

**ORIENTADORA**

---

**PROF. FRANCISCO NIVALDO FREIRE**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**

---

**PROF.<sup>a</sup> MÔNICA ALBUQUERQUE**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Francisca Eliene Oliveira Callou e Josef Lopes Callou, pelo apoio incondicional ao longo da minha vida acadêmica, pela simplicidade e humildade que inspirou a minha trajetória pessoal e acadêmica e por sempre me estimular a sonhar com os meus objetivos.

Aos meus amigos Uly Beatriz, Carlos Vasconcelos, Mariellen Holanda, Patrick Teixeira, Pedro Henrique Diniz, Bernardo Gomes, Lara Timbó, Lara Campana e Laryssa Fernandes não apenas pelo apoio, sugestões, críticas e compartilhamento de aprendizados em momentos de dificuldades acadêmicas, mas também pela amizade e companheirismo que marcou o período em que estive na Universidade.

À minha orientadora Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Ana Fabíola Almeida por me possibilitar essa oportunidade de desenvolver meu esse trabalho e compartilhar o seu conhecimento comigo.

Aos professores Francisco Nivaldo Freire e Paulo Alexandre pela disponibilidade em participar da minha banca examinadora e colaborar com o trabalho.

Ao corpo docente da Universidade Federal do Ceará por colaborar com o meu desenvolvimento pessoal e profissional.

“Transmitir conhecimento não é apenas falar o que sabe, mas inspirar novas atitudes.”

Juliano Kimura

## RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo técnico e econômico para implantação de um sistema solar fotovoltaico conectado à rede de alta tensão de uma empresa localizada no município de Fortaleza, no estado do Ceará. Com o forte avanço tecnológico e crescimento na viabilidade econômica dos sistemas solares fotovoltaicos no mundo, o modelo de geração distribuída apresenta-se como excelente alternativa para reduzir os custos com energia elétrica. No Brasil, esse modelo começou a ser difundido após a regulamentação da ANEEL, que define a metodologia para conectar um sistema solar fotovoltaico à rede distribuidora. Assim, o dimensionamento apresentado nesse estudo busca minimizar os custos de energia elétrica de uma empresa, obedecendo às normas brasileiras disponíveis e considerando os valores reais de consumo, equipamentos e serviços prestados pelo mercado cearense. O resultado final mostra que o investimento se tornaria vantajoso, com tempo de retorno estimado de até 5 anos.

**Palavras-Chaves:** Sistemas solares fotovoltaicos; geração distribuída; viabilidade econômica; alta tensão; dimensionamento.

## ABSTRACT

This work presents a technical and economic study for the implementation of a photovoltaic solar system connected to the high voltage grid of a company located in the city of Fortaleza, in the state of Ceará. With the strong technological advance and growth in the economic viability of solar photovoltaic systems in the world, the distributed generation model presents itself as an excellent alternative to reduce the costs with electric energy. In Brazil, this model began to be diffused after the regulation of ANEEL, which defines the methodology to connect a solar photovoltaic system to the distribution network. Thus, the design presented in this study seeks to minimize a company's electricity costs, in compliance with the Brazilian standards available and considering the actual values of consumption, equipment and services provided by the market of Ceará. The final result shows that the investment would become advantageous, with estimated return time of up to 5 years.

**Palavras-Chaves:** Photovoltaic solar systems; distributed generation; economic viability; high voltage.

## LISTA DE SIGLAS

|         |   |
|---------|---|
| ABNT    | Associação Brasileira de Normas Técnicas                      |
| ANEEL   | Agência Nacional de Energia Elétrica                          |
| AT      | Alta tensão   |
| CA      | Corrente Alternada  |
| CC      | Corrente Contínua   |
| CRESESB | Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sergio Brito |
| DPS     | Dispositivo de proteção contra surto                          |
| ENEL    | Ente Nazionale per l'energia Elettrica                        |
| FV      | Fotovoltaica  |
| HSP     | Horas de sol pico por dia                                     |
| SSF     | Sistema Solar Fotovoltaico                                    |

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Usina de energia solar térmica na Austrália. As placas direcionam a luz solar para aquecer o topo do prédio, onde fica a câmara com combustível. .... 15
- Figura 2: Efeito fotoelétrico. Ondas de luz (em vermelho) atingem uma superfície de metal e faz com que os elétrons do metal sejam expulsos para fora do metal. .... 16
- Figura 3: Desenho esquemático do comportamento frequência da onda de luz com a frequência limite. A frequência da luz vermelha (esquerda) é menor que a frequência limite deste metal, portanto, nenhum elétron é ejetado. As luzes verdes (no meio) e azul (direita) têm frequência mais alta do que a frequência limite, portanto ambas causam foto emissão. A luz azul, de maior energia, ejeta os elétrons com maior energia cinética em comparação com a luz verde..... 17
- Figura 4: Desenho esquemático do funcionamento das células fotovoltaicas. Os elétrons livres no terminal ‘negativo “n” vão migrar para a parte da célula que está com ausência de elétrons, o terminal positivo “p”. Esse fluxo de elétrons gera corrente elétrica..... 18
- Figura 5: Imagem ilustrativa de Forno cadinho para fundição, similar aos utilizados para a cultura de monocristais de silício.....21
- Figura 6: Célula de silício policristalino. Em destaque, a coloração azul e as formas dos cristais que aparentam vidro quebrado, característicos desse tipo de célula.....23
- Figura 7: Célula de filme fino com substrato de polímero. Observe a separação transparente entre as células. Quanto menor a separação, maior a eficiência, mas elas também podem ser usadas de forma estética. ....24
- Figura 8: Fotografia da usina solar de Moapa Southern Paiute, na Califórnia. ....25
- Figura 9: Esquema de ligação de módulos fotovoltaicos em série. ....26
- Figura 10: Esquema de ligação de módulos fotovoltaicos em paralelo. ....27

|   |    |
|---|----|
| Figura 11: Infográfico do funcionamento de um sistema <i>off grid</i> . .....                     | 29 |
| Figura 12: Infográfico do funcionamento de um sistema <i>on grid</i> . .....                      | 30 |
| Figura 13: Imagem aérea da empresa ABC da Educação, com indicação da área total do telhado.....   | 42 |
| Figura 14: Conta de energia elétrica fornecida pela empresa referente ao mês de maio de 2018..... | 44 |

## LISTA DE GRÁFICOS

|   |    |
|---|----|
| Gráfico 1: Irradiação solar para o município de Fortaleza, próximo ao local de instalação. ....                       | 43 |
| Gráfico 2: Valor Médio da Tarifa de Energia no Brasil, em R\$ por megawatt-hora, para consumidores residenciais. .... | 51 |
| Gráfico 3: Economia acumulada ao longo dos 25 anos. ....  | 54 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1: Irradiação solar próximo ao local de implantação, na cidade de Fortaleza, CE. ....   | 44 |
| Tabela 2: Histórico de consumo de energia elétrica da empresa .....  | 46 |
| Tabela 3: Dados preliminares do sistema solar fotovoltaico. ....   | 49 |
| Tabela 4: Proposta comercial feita pela empresa Fênix Solar.....   | 50 |
| Tabela 5: Aumento da tarifa de energia utilizado nos cálculos de viabilidade econômica.....  | 52 |
| Tabela 6: Economia acumulada por ano, no período de 25 anos.....   | 52 |
| Tabela 7: Resumo geral do balanço econômico do sistema solar fotovoltaico. ....  | 55 |
| Tabela 8: Comparação ano a ano do balanço econômico entre o investimento no sistema solar fotovoltaico, na poupança e em um fundo de investimento com retorno bruto de 9% a.a..... | 56 |

# SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO</b> .....                                      | <b>12</b> |
| 1.1. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA .....                            | 13        |
| <b>1.1.1. Objetivo Geral</b> .....                              | <b>13</b> |
| <b>1.2.2. Objetivos Específicos</b> .....                       | <b>13</b> |
| <br>  |           |
| <b>2. REFERÊNCIAL TEÓRICO</b> .....                             | <b>14</b> |
| 2.1. ENERGIA SOLAR .....  | 14        |
| <b>2.1.1. Processo heliotérmico</b> .....                       | <b>14</b> |
| <b>2.1.2. Processo fotovoltaico</b> .....                       | <b>15</b> |
| 2.2. CÉLULAS FOTOVOLTAICAS.....                                 | 17        |
| <b>2.2.1. Dopagem eletrônica</b> .....                          | <b>18</b> |
| <b>2.2.2. Tipos de células</b> .....                            | <b>19</b> |
| 2.3. MÓDULOS FOTOVOLTAICOS .....                                | 25        |
| <b>2.3.1. Ligação em série</b> .....                            | <b>26</b> |
| <b>2.3.2. Ligação em paralelo</b> .....                         | <b>27</b> |
| 2.4. SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS.....                        | 28        |
| <b>2.4.1. Sistemas isolados (<i>off grid</i>)</b> .....         | <b>28</b> |
| <b>2.4.2. Sistemas conectados à rede (<i>on grid</i>)</b> ..... | <b>29</b> |
| <b>2.4.3. Inversor <i>grid-tie</i></b> .....                    | <b>30</b> |
| <b>2.4.4. Quadro de proteção</b> .....                          | <b>31</b> |
| <b>2.4.5. Medidor bidirecional</b> .....                        | <b>32</b> |
| <br>  |           |
| <b>3. A EMPRESA</b> .....                                       | <b>33</b> |
| <br>  |           |
| <b>4. METODOLOGIA</b> .....                                     | <b>34</b> |
| 4.1. LEVANTAMENTO DE DADOS .....                                | 35        |
| <b>4.1.1. Área do telhado disponível:</b> .....                 | <b>35</b> |
| <b>4.1.2. Irradiação solar local</b> .....                      | <b>35</b> |
| <b>4.1.3. Faturamento de energia elétrica da empresa</b> .....  | <b>36</b> |
| 4.2. POTÊNCIA DO SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO .....               | 36        |
| 4.3. MÓDULOS FOTOVOLTAICOS .....                                | 37        |
| 4.4. ÁREA DOS MÓDULOS E ÁREA DISPONÍVEL PARA INSTALAÇÃO .....   | 37        |
| 4.5. DIMENSIONAMENTO DO INVERSOR.....                           | 38        |
| 4.6. VIABILIDADE ECONÔMICA .....                                | 40        |
| <b>4.6.1. Custos totais do sistema</b> .....                    | <b>41</b> |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>4.6.2. Custos de manutenção .....</b>  | <b>41</b> |
| <b>5. RESULTADOS E ANÁLISE .....</b>      | <b>42</b> |
| 5.1. POTÊNCIA NECESSÁRIA DO SISTEMA ..... | 42        |
| 5.2. POTÊNCIA DO INVERSOR .....           | 47        |
| 5.3. PAINÉIS FOTOVOLTAICOS.....           | 48        |
| 5.4. PROPOSTA COMERCIAL.....              | 49        |
| 5.5. VIABILIDADE ECONÔMICA .....          | 51        |
| <b>6. CONCLUSÃO .....</b>                 | <b>57</b> |
| <b>BIBLIOGRAFIA .....</b>                 | <b>58</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

A eletricidade é a mais versátil e mais fácil de controlar forma de energia utilizada em larga escala no mundo. Considerando apenas o uso, e não geração, a energia elétrica apresenta perda de energia muito baixa e é essencialmente não poluidora, se comparada às outras formas de energia disponíveis. Como a energia elétrica não tem peso e é mais fácil de transportar e distribuir, ela representa a forma mais eficiente de se consumir energia (International Electrotechnical Commission, 2018). Dessa forma, o desenvolvimento tecnológico com objetivo de aumentar o bem-estar da população necessita bastante do aumento da disponibilidade de energia elétrica.

Nesse contexto, foi intensificado o processo de eletrificação de objetos e de processos, quando há conversão da utilização de uma forma de energia para utilização da energia elétrica, o que tornou a geração de energia um tema fundamental para a sociedade.

No Brasil, a geração interna de energia elétrica, subconjunto da matriz energética, é principalmente feita por meio de fontes renováveis de energia, com previsão para chegar a 83,3% em 2018. No mundo, este indicador é de apenas 24,1% (Ministério de Minas e Energia, 2017).

Em dezembro de 2017 foram acordadas as contratações de novas instalações de energia limpa a preços menores do que as hidrelétricas. A recente instabilidade política e econômica enfrentada pelo Brasil reduziu a demanda por eletricidade, causando o cancelamento de leilões. Assim, a alta competitividade de investidores interessados em construir esses empreendimentos possibilitou fortes quedas em relação ao preço teto estipulado pelo governo. Os lotes de projetos eólicos chegaram a registrar preços médios de R\$ 98 por MWh. O recorde anterior foi registrado em 2012: R\$ 119 atualizados conforme inflação. As fontes fotovoltaicas registraram preços médios de R\$ 145, ante R\$ 245 registrados em 2014. (ASM Latin, 2018).

Assim, o aproveitamento da energia elétrica fotovoltaica ganhou impulso com as resoluções normativas definidas em 2012 pela Agência Nacional de Energia

Elétrica (ANEEL), na Resolução Normativa Nº 482. Esta permitiu que diferentes unidades consumidoras pudessem instalar e conectar os sistemas solares fotovoltaicos de sua residência ou comércio à rede distribuidora de energia elétrica.

Assim, com o crescimento do número de pessoas interessadas na micro geração de energia e o conseqüente aumento do número de empresa que atuam na fabricação e na venda desses equipamentos, a implantação desses sistemas se tornou viável em alguns cenários. Este trabalho, portanto, busca apresentar o correto dimensionamento dos sistemas solares fotovoltaicos e mostrar a viabilidade econômica destes.

## 1.1. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA

### 1.1.1. Objetivo Geral

Avaliar a viabilidade técnica e econômica para implantação de um sistema solar fotovoltaico (SSF) integrado à sede de uma empresa em Fortaleza e conectado à rede distribuidora operada pela ENEL Distribuição Ceará, dimensionando os principais parâmetros técnicos aos dados coletados em visita, considerando as condições econômicas da empresa e com base em procedimentos propostos por fontes de pesquisa.

### 1.2.2. Objetivos Específicos

- Atender a demanda do consumo de energia elétrica de uma empresa;
- Analisar o faturamento de energia elétrica da unidade consumidora;
- Analisar a disponibilidade solar e a área disponível do local de instalação do sistema por meio de ferramentas geográficas e visita *in loco*;
- Dimensionar os equipamentos que comporá o SSF: os módulos, os inversores e o medidor bidirecional de acordo com a regulamentação;
- Investigar o impacto financeiro do SSF;
- Calcular o retorno financeiro do SSF por meio do tempo de retorno do investimento.

## **2. REFERÊNCIAL TEÓRICO**

### **2.1. ENERGIA SOLAR**

O nosso Sol pode ser considerado como um reator nuclear natural (SunPower, 2017). Ele dispara pequenas partículas de energia chamados fótons, que viajam cerca de 149,6 milhões de quilômetros, distância entre o Sol e a Terra, em cerca de 8,5 minutos (U.S. Naval Observatory, 2008). A cada hora, a quantidade de fótons que impactam o nosso planeta é suficiente para gerar energia para suprir toda a demanda de energia elétrica global por um ano (SunPower, 2017).

Toda essa energia radiante é emitida pelo Sol em forma de ondas eletromagnéticas e é designada de radiação solar. Essa energia pode se transformar em energia elétrica, principalmente por dois processos: o heliotérmico e o fotovoltaico.

#### **2.1.1. Processo heliotérmico**

O primeiro deles é chamado de processo heliotérmico. No processo heliotérmico a energia solar é coletada através de sistemas compostos por coletores e receptores. Os coletores são superfícies muito polidas que captam os raios solares e os direcionam para os receptores. Os receptores são câmaras que acumulam água, óleo ou ar no seu interior, com o aquecimento do sistema pela conversão da energia solar em energia térmica o fluido, aquecido, escoar pelo sistema devido a variação de pressão. A energia armazenada pode ser utilizada para mover as pás de um gerador elétrico que converte a energia térmica em energia elétrica como em uma termoelétrica, com a grande vantagem de não haver queima de combustível fóssil (PagueVerde, 2017).

Figura 1: Usina de energia solar térmica na Austrália. As placas direcionam a luz solar para aquecer o topo do prédio, onde fica a câmara com combustível.



Fonte: Science Alert

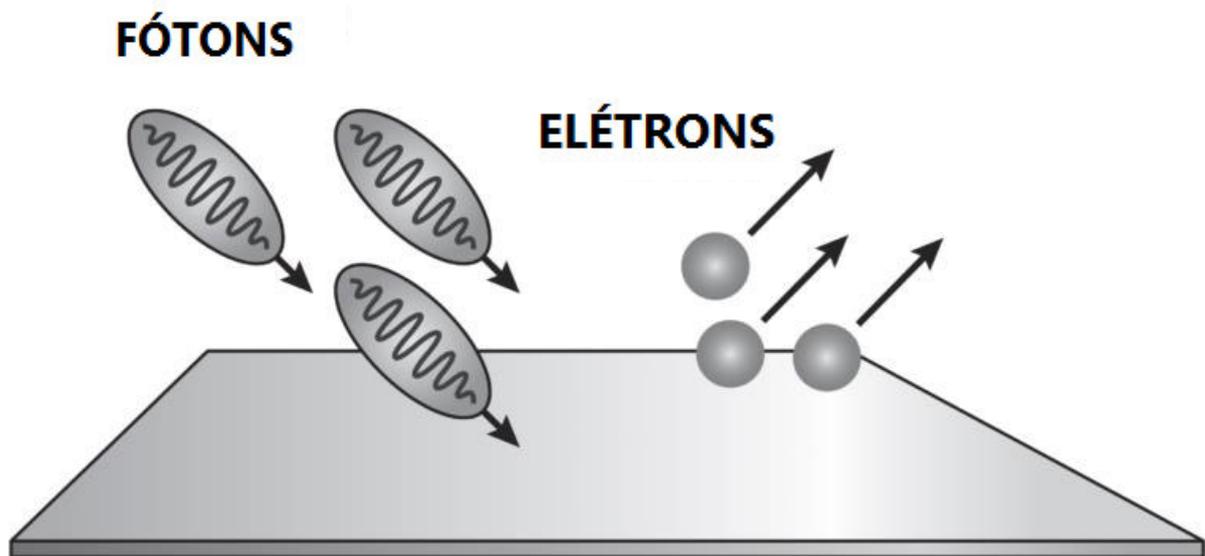
### 2.1.2. Processo fotovoltaico

Além do processo heliotérmico, a energia solar pode ser transformada em energia elétrica também por meio do processo fotovoltaico. Pode haver a conversão em energia elétrica por meio de materiais sólidos, geralmente cristalinos, de condutividade elétrica intermediária entre isolantes e condutores, chamados de semicondutores. Estes materiais são fundamentais para o funcionamento das células fotovoltaicas.

Quando os fótons provenientes do Sol atingem uma célula fotovoltaica, eles podem ser absorvidos ou refletidos. Apenas os fótons absorvidos conseguem produzir energia elétrica. Quando os fótons são absorvidos, a energia do fóton é transferida para um elétron em um átomo da célula de um semicondutor. Esse processo é chamado de efeito fotovoltaico.

O semicondutor mais utilizado é o silício. Seus átomos se caracterizam por possuírem quatro elétrons de ligação que se ligam aos vizinhos, formando uma rede cristalina. Ao adicionarem-se átomos com cinco elétrons de ligação, como o fósforo, por exemplo, haverá um elétron em excesso que não poderá ser emparelhado e que ficará sobrando, fracamente ligado a seu átomo de origem. Isto faz com que, com pouca energia térmica, este elétron se livre, indo para a banda de condução (Fadigas, 2016).

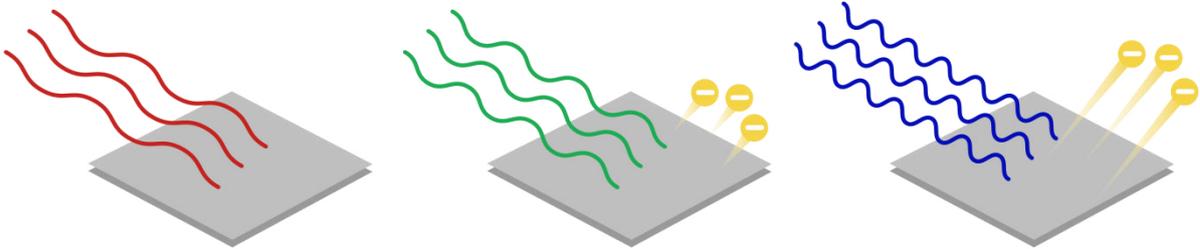
Figura 2: Efeito fotoelétrico. Ondas de luz (em vermelho) atingem uma superfície de metal e faz com que os elétrons do metal sejam expulsos para fora do metal.



Fonte: Scott D. Bembenek. Adaptado.

Pode-se pensar na luz incidente como um fluxo de fótons com uma energia determinada pela frequência da luz. Quando um fóton atinge a superfície do metal, a energia do fóton é absorvida por um elétron no metal. A figura abaixo ilustra a relação entre a frequência da luz e a energia cinética dos elétrons ejetados.

Figura 3: Desenho esquemático do comportamento frequência da onda de luz com a frequência limite. A frequência da luz vermelha (esquerda) é menor que a frequência limite deste metal, portanto, nenhum elétron é ejetado. As luzes verdes (no meio) e azul (direita) têm frequência mais alta do que a frequência limite, portanto ambas causam foto emissão. A luz azul, de maior energia, ejeta os elétrons com maior energia cinética em comparação com a luz verde.



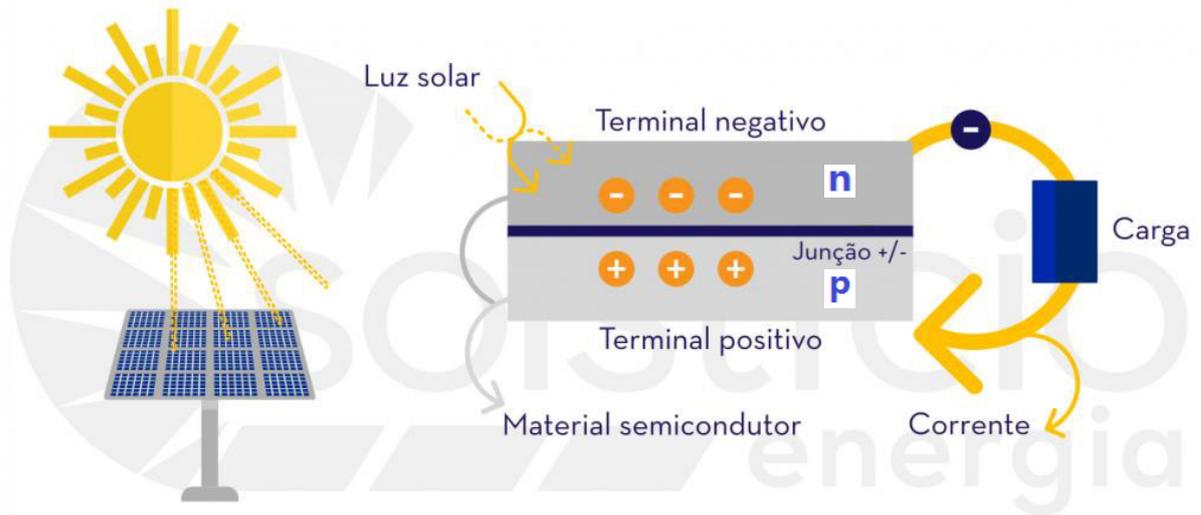
Fonte: Khan Academy.

## 2.2. CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

Células fotovoltaicas são dispositivos que convertem diretamente a luz do Sol em eletricidade. Para tanto, é necessário um material semicondutor que é capaz de elevar o estado energético dos seus elétrons na presença de radiação. Há alguns materiais que também são capazes de fazer esse mesmo processo, mas na prática, os mais empregados são os semicondutores.

A forma mais utilizada dos semicondutores, principalmente diodos e transistores, para gerar energia elétrica por meio de luz solar são as junções P-N. Nesse tipo de junção, o material P apresenta baixa concentração de elétrons, enquanto o N apresenta grande concentração de elétrons. A difusão desses elétrons entre os materiais gera corrente contínua entre os eletrodos da célula, conforme mostrado na Figura 4 abaixo:

Figura 4: Desenho esquemático do funcionamento das células fotovoltaicas. Os elétrons livres no terminal 'negativo "n" vão migrar para a parte da célula que está com ausência de elétrons, o terminal positivo "p". Esse fluxo de elétrons gera corrente elétrica.



Fonte: Solstício Energia. Adaptado.

### 2.2.1. Dopagem eletrônica

Em materiais semicondutores, é necessário acrescentar impurezas químicas para aumentar a sua condutividade elétrica, de forma controlada. Esse processo é chamado de dopagem eletrônica.

Três elementos são comuns nesse processo, o carbono, o silício e o germânio. Todos eles possuem quatro elétrons na camada de valência, possibilitando a formação de cristais. Isso acontece porque seus elétrons são compartilhados com os átomos vizinhos, formando estruturas reticuladas ou cristalinas. Existem dois tipos de impurezas que são utilizadas:

**P:** adição de boro ou gálio ao silício. Como ambos possuem três elétrons na camada de valência, quando são adicionados ao silício, criam lacunas que conduzem corrente. A ausência de um elétron cria uma carga positiva, que recebe o nome "P".

N: adição de fósforo ou arsênio ao silício. Como ambos apresentam cinco elétrons na camada de valência, ocorre ligações covalentes entre quatro desses elétrons e o outro fica livre, que ganha movimento e gera corrente elétrica. O nome “N”, de forma similar ao “P”, ganha esse nome por conta da carga negativada que esse processo gera.

Para formar uma célula solar (ou um diodo) devem ser unidos os dois tipos de semicondutor. Na área da união, junção P-N, os elétrons livres do semicondutor tipo N migrarão para o semicondutor tipo P para ocuparem esses espaços. Ao ligar as duas camadas externamente, pode-se aproveitar a corrente elétrica que se forma na passagem dos elétrons de uma camada para outra. Essa migração não ocorre indefinidamente, pois forma-se um campo elétrico na área de junção que impede que os elétrons continuem fluindo.

## **2.2.2. Tipos de células**

### *2.2.2.1. Células de silício cristalino*

Há diferentes materiais e metodologias para desenvolver uma célula fotovoltaica. Os materiais mais comuns são o silício, o carbono e o germânio.

O silício cristalino é o material mais utilizado no mundo para utilização em células fotovoltaicas, com aplicações que vão desde refinarias de aço até fabricação de componentes eletrônicos de computadores e celulares.

Este tipo de célula é composta de uma lâmina de silício purificado dopada, ao mesmo tempo, com boro e fósforo. A parte dopada com fósforo (do tipo-N) fica exposta ao sol. A parte dopada com boro (do tipo-P) fica na parte inferior da célula, e é maior que o tipo-N. São colocados contatos frontais e traseiros. Os contatos frontais, sobre a parte tipo-N, causam sombra e reflexão, diminuindo a eficiência da célula.

Seria teoricamente possível diminuir as perdas por reflexão, diminuindo a quantidade de contatos frontais, porém, quanto menos condutores para captar os

elétrons liberados pelo efeito fotovoltaico, mais elétrons serão recombinados nos átomos de silício, após perderem a energia adquirida que é transformada em calor, fazendo com que a célula seja ainda mais ineficiente. Temos então uma relação de máxima eficiência, quando a célula tem o máximo de contatos frontais possíveis, mas tem a menor área possível (Blue Sol, 2017).

As células fotovoltaicas de silício cristalizado absorvem a radiação solar em uma faixa muito estreita do espectro da radiação.

Fótons com energia superior à necessária (próximos à luz ultravioleta, com frequência mais alta) concedem energia em excesso, que é transformada em calor. Fótons com energia inferior à necessária (próximos à luz infravermelha, com frequência mais baixa) não concedem energia suficiente para a liberação dos elétrons de sua órbita, e essa energia é convertida em calor.

Mesmo dentro da faixa aproveitável, apenas uma parte dos fótons têm a energia correta para o efeito, e os fótons com mais energia contribuem com maior geração de calor. É importante notar que, com o calor, as células fotovoltaicas de silício cristalino perdem eficiência, pois a tensão da célula cai e, portanto, a potência que essa pode gerar cai também.

O silício é um material semicondutor que é considerado a primeira geração da tecnologia fotovoltaica, mas com forte avanço tecnológico. Hoje, existem empresas que alcançam eficiência de até 24,13%, utilizando célula solar de silício monocristalino tipo n, fabricada em um grande substrato de silício dopado com fósforo, com um processo IBC industrial de baixo custo, através de tecnologias de dopagem por tubo convencional e metalização inteiramente impressa em tela (Trina Solar, 2017).

#### ***2.2.2.2. Células de silício monocristalino***

Nas células monocristalino, o silício policristalino purificado é transformado em um único cristal por meio de um processo de cultura de cristais. O mais conhecido deles é o Método Czochralski.

Nesse método, onde é possível obter Silício com pureza na ordem de 99,99% a 99,999999%, o Silício Poli cristalino (pc-Si) é derretido em um reator (figura abaixo), sob atmosfera controlada e em temperatura na ordem de 1500°C. Nesse, adiciona-se elementos dopantes ou impurezas, com quantidades controladas e necessárias para a formação de um material com características semicondutoras, denominados de material tipo-N ou tipo-P.

Figura 5: Imagem ilustrativa de Forno para fundição, similar aos utilizados para a cultura de monocristais de silício.



Fonte: DJ Fornos Industriais

Os elementos normalmente utilizados como dopantes para formação do material tipo-N (características penta valente) nesse método é o Fósforo (P), ou o Arsênio (As), ou o Antimônio (Sb), etc., e os elementos dopantes para formação do material do tipo-P(características trivalentes) normalmente é o Boro (B), ou o Alumínio (Al), ou o Gálio (Ga), etc. Uma amostra do cristal que se deseja obter semente de Silício Mono cristalino - (mc-Si) é mergulhada no cadinho contendo

Silício Poli cristalino (pc-Si) derretido e essa semente é levantada lentamente numa velocidade na ordem de cm/hora, e em movimentos rotatórios.

No Silício derretido, seus átomos se cristalizam em torno da semente e estende uma estrutura em formato de lingote com orientação cristalina igual à da semente, porém com diâmetro que depende dos fatores de temperatura, da velocidade de elevação e rotação da semente e da velocidade de rotação do cadinho. Já estendido e formado o lingote de Silício, este é fatiado em finos discos, formando os wafers que serão processados a fim da obtenção de dispositivos semicondutores para a indústria eletroeletrônica. Para cada centímetro de lingote fatiado, obtém-se uma média de 20 a 30 unidades de wafers (20 a 30 Wafer/cm) (Blue Sol, 2017).

#### ***2.2.2.3. Células de silício policristalino***

As células de silício policristalino formam, juntamente com as monocristalinas, os dois principais tipos de células fotovoltaicas utilizadas no mercado.

O silício purificado, como explicado anteriormente, é derretido em um cadinho de quartzo e moldado em forma de cubo e, através de um processo controlado de aquecimento e resfriamento, o bloco se solidifica em uma única direção, de maneira a conseguir uma formação cristalina a mais homogênea possível. Como o silício cristaliza livremente, há a formação de vários cristais, por isso o nome policristalino.

Os vários cristais aumentam as perdas por recombinação, fazendo com que as células de silício policristalino sejam levemente menos eficientes que as de silício monocristalino. Durante o processo de solidificação são criados lingotes de silício policristalino que serão serrados em barras, utilizando uma serra-fio e depois cortados em lâminas (wafers) de aproximadamente 0.3 mm de espessura, mais uma vez por uma serra-fio.

Todo esse processo de serragem provoca perdas de material na forma de pó de serragem. O silício já é dopado com a impureza tipo-P (geralmente boro) durante a purificação. Após a serragem e limpeza, as lâminas serão dopadas com fósforo

(em apenas uma face) e será aplicada uma camada de material antirreflexo (que aumentará a absorção luminosa). Por fim, serão impressos os contatos frontais e traseiros.

Figura 6: Célula de silício policristalino. Em destaque, a coloração azul e as formas dos cristais que aparentam vidro quebrado, característicos desse tipo de célula.



Fonte: eCycle.

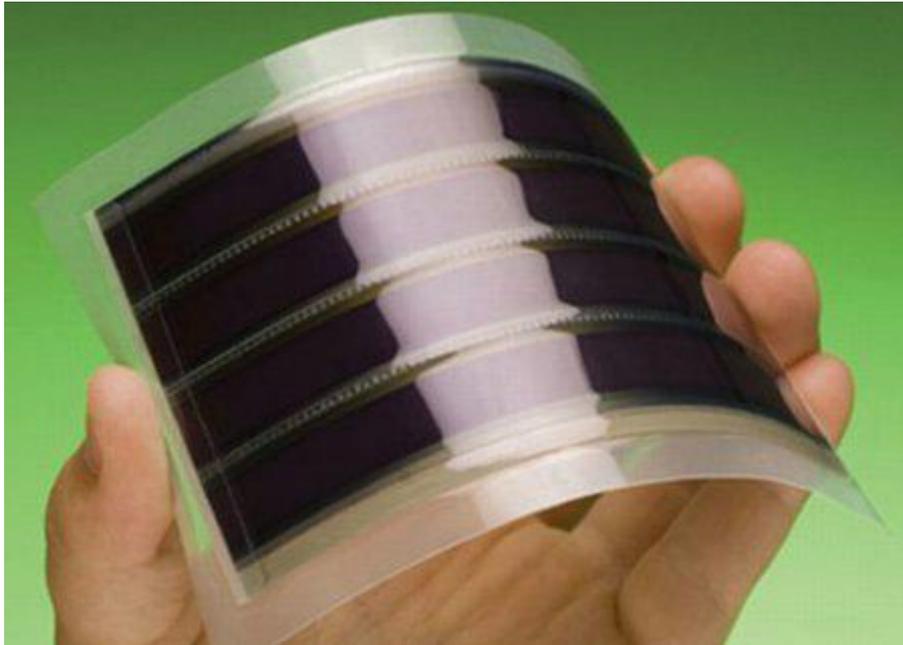
#### ***2.2.2.4. Células de filme fino***

As células de filme fino são constituídas por finas camadas de material fotovoltaico colocadas num substrato de vidro, metal ou polímeros utilizando técnicas de fabricação, normalmente por deposição em vácuo.

Uma das características que diferenciam as células de filme fino das células de silício cristalizadas é o tipo de interligação. As células de silício cristalizadas são soldadas de célula para célula, enquanto as células de filme fino são ligadas monoliticamente, ou seja, são separadas eletricamente e interligadas em etapas

estruturais, criando assim as finas ranhuras transparentes entre as células individuais, como visto na figura abaixo:

Figura 7: Célula de filme fino com substrato de polímero. Observe a separação transparente entre as células. Quanto menor a separação, maior a eficiência, mas elas também podem ser usadas de forma estética.



Fonte: Sol Central

Essa tecnologia promete a diminuição do custo das células garantindo a confiabilidade, durabilidade, flexibilidade com boas características estéticas das mesmas. Além disso, utilizam quantidade menor de material, diminuindo consideravelmente o consumo de energia durante a produção das células e reduzindo a complexidade dos processos. Com essas características, é possível perceber que a produção de filmes finos para utilização em geração de energia pode ser feita em larga escala a preços competitivos (Lacroix, 2013).

Um exemplo dessas células pode ser visto em uma usina de energia solar na Califórnia (figura abaixo). Os empreendedores disseram que a utilização de células de filme fino, em vez de silício, se deu por ser mais vantajoso economicamente (First Solar, 2017).

Figura 8: Fotografia da usina solar de Moapa Southern Paiute, na Califórnia.



Fonte: First Solar

### 2.3. MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

O módulo fotovoltaico é o conjunto de células que nos principais modelos do mercado são compostos por 60 a 72 células ligas em série. Isso acontece porque uma única célula não é capaz de produzir voltagem suficiente para a rede de distribuição.

Portanto, quando se projeta os sistemas fotovoltaicos, deve-se estar atento para as ligações série e paralelo entre os módulos pois é de suma importância que a tensão do arranjo seja compatível com o equipamento ao qual os painéis serão ligados.

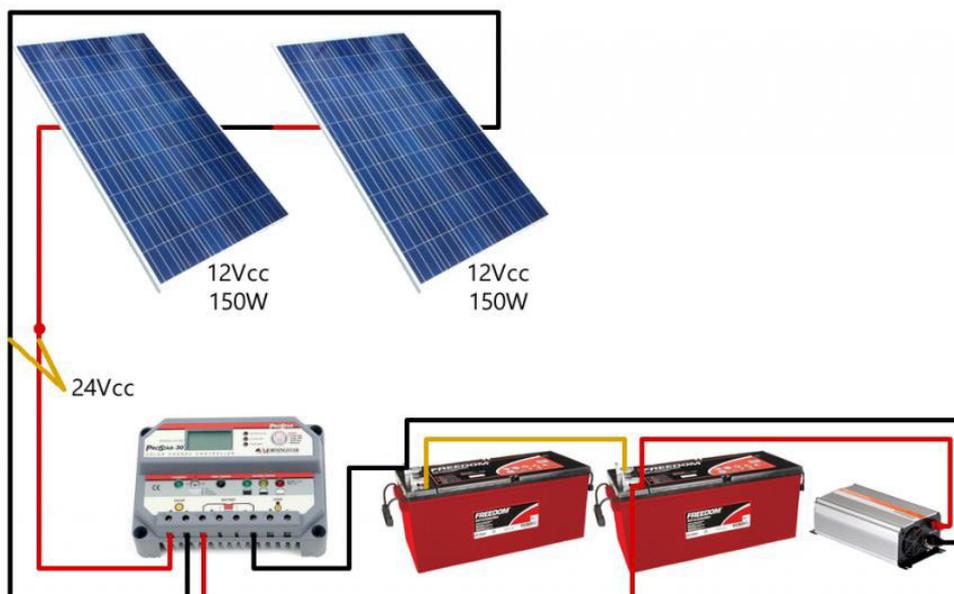
Nos sistemas conectados à rede, o componente que se segue aos painéis é o inversor que possui uma gama de tensões compatíveis, que ditaram como o arranjo fotovoltaico deve ser configurado.

As características de tensão e corrente de cada módulo dependem de como o mesmo é fabricado e conseqüentemente as configurações são diversas e visam a compatibilização das tensões dos inversores que são conectados a eles\_(Krinat Solar, 2017).

### 2.3.1. Ligação em série

Na Figura 9 a seguir, pode-se ver quatro módulos onde o terminal negativo de cada um é conectado ao terminal positivo do módulo subsequente. A este tipo de ligação, negativo para o positivo entre os módulos dá o nome de “conexão em série”. Dois ou mais módulos ligados desta forma, são chamados comumente de “*String* Série” ou “Circuito Fonte fotovoltaicos”.

Figura 9: Esquema de ligação de módulos fotovoltaicos em série.



Fonte: Eduardo Aquino.

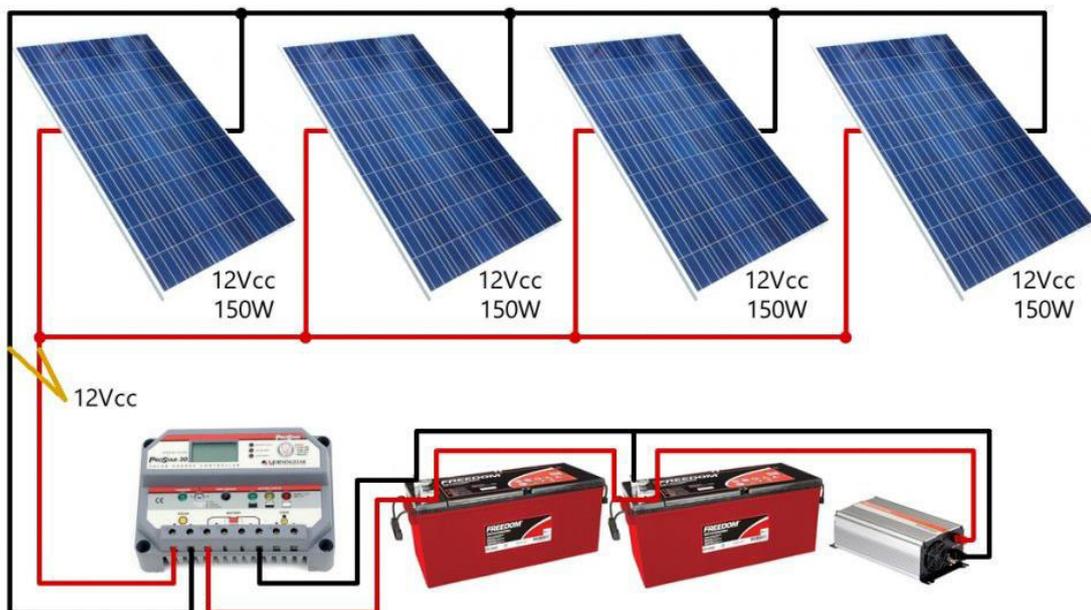
Nas conexões em série, as tensões dos módulos se somam e as correntes permanecem constantes. Feitas as conexões, os terminais permanecem abertos, o positivo de um módulo e o negativo de outro módulo, serão os conectores que eventualmente ligarão o painel fotovoltaico a uma combo box e daí ao inversor. (Krinat Solar, 2017).

Neste arranjo onde cada módulo tem 12 V de tensão e 5 A de corrente. Se os quatro módulos estão conectados em série, tem-se uma tensão total de 48 V (4 x 12 V) com uma corrente total de 5 A. Desta forma, este arranjo nos fornece uma potência total de 240 W, ou seja, 48 V x 5 A que é igual a 240 W.

### 2.3.2. Ligação em paralelo

Na Figura 10, pode-se observar os módulos ligados em paralelo onde o terminal positivo de um módulo, em vermelho, é conectado ao terminal positivo do outro módulo e o terminal negativo em preto, é ligado ao terminal negativo do outro módulo.

Figura 10: Esquema de ligação de módulos fotovoltaicos em paralelo.



Fonte: Eduardo Aquino

Quando conectados em paralelo, as correntes dos módulos se somam e as tensões permanecem constantes. Supondo que os módulos sejam os mesmos da ligação em série, cada um tem uma tensão de 12 V e uma corrente de 5 A. Como as correntes se somam, teremos uma corrente total de 20 A com uma tensão de 12 V o que fornece uma potência total de  $20 \text{ A} \times 12 \text{ V} = 240 \text{ W}$ .

Pode-se observar que tanto na ligação em série quanto na ligação em paralelo, a potência total do arranjo é de 240 W pois a tensão é a igual a um quarto da ligação em série enquanto que a corrente é 4 vezes maior na ligação em paralelo comparada com a ligação em série.

## 2.4. SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS

Os sistemas fotovoltaicos podem ser divididos em duas categorias: sistemas isolados (também chamados de *off grid*) e sistemas conectados à rede (*on grid*).

### 2.4.1. Sistemas isolados (*off grid*)

Os sistemas isolados, que não serão o foco deste estudo, para geração de energia solar fotovoltaica são caracterizados por não se conectar à rede elétrica. Este tipo de sistema abastece diretamente os aparelhos que utilizarão a energia e são geralmente construídos com um propósito local e específico. Esta solução é bastante utilizada em locais remotos já que muitas vezes é o modo mais econômico e prático de se obter energia elétrica nestes lugares. Exemplos de uso são sistemas de bombeamento de água, eletrificação de cercas, geladeiras para armazenar vacinas, postes de luz, estações replicadoras de sinal, etc. (NeoSolar, 2018). A energia produzida é armazenada em baterias que garantem o abastecimento em períodos sem sol.

Figura 11: Infográfico do funcionamento de um sistema *off grid*.



Fonte: Enel X

Os sistemas isolados de geração de energia solar fotovoltaica, de maneira simplificada, são compostos de seis componentes:

1. Painéis solares (módulos);
2. Controladores de carga;
3. Inversores *grid-tie*;
4. Baterias;
5. Estruturas de fixação;
6. Cabeamento.

#### 2.4.2. Sistemas conectados à rede (*on grid*)

Os sistemas conectados à rede elétrica, distribuem o excedente de energia gerada pela captação da luz solar, gerando descontos na conta de energia da

unidade consumidora independentemente do período do dia. Se a energia gerada não for suficiente, a rede elétrica da distribuidora de energia compensa o que faltar. No fim das contas, o que é pago para a distribuidora é a energia consumida da rede elétrica menos o que foi produzida pelo sistema.

Os principais componentes desse tipo de sistema são:

1. Painéis fotovoltaicos (módulos);
2. Inversores *grid-tie*;
3. Estrutura de fixação
4. Cabeamento;
5. Quadro de proteção;
6. Medidor bidirecional.

Figura 12: Infográfico do funcionamento de um sistema *on grid*.



Fonte: Enel X.

### 2.4.3. Inversor *grid-tie*

Inversores *grid-tie* são inversores de corrente utilizados em sistemas fotovoltaicos não conectados à rede (*off grid*). A função do inversor *grid tie* é transformar a energia solar produzida pelos painéis fotovoltaicos – Corrente

Continua (CC) – em energia elétrica na forma convencional que utilizamos, ou seja, Corrente Alternada (CA) 110/220V. Como o sistema fotovoltaico funciona em paralelo com a rede pública, ele também garante que não haja conflitos entre as duas fontes de energia, através de uma precisa sincronização e proteções elétricas necessárias.

Além da função básica de um inversor ou conversor CC/CA, os inversores para conexão à rede também fazem a sincronização com a rede pública de eletricidade, ou seja, garantem que a energia solar produzida seja fornecida exatamente como aquela que recebemos da rede elétrica (NeoSolar, 2018).

#### **2.4.4. Quadro de proteção**

O quadro de proteção foi desenvolvido para garantir a proteção do circuito entre o módulo fotovoltaico e o inversor, cumprindo com todas as indicações de um quadro elétrico de proteção em corrente contínua. Então, nas instalações elétricas, o quadro de proteção é o componente responsável por abrigar um ou mais dispositivos de proteção (e/ou de manobra) e a conexão de condutores elétricos interligados a estes elementos, com a finalidade de distribuir a energia aos diversos circuitos do sistema.

Esse quadro elétrico é composto por dispositivos de proteção dimensionados para intervir em casos de distúrbios elétricos no sistema. Normalmente incluem proteção contra surtos - DPS; fusíveis CC para isolar e proteger o quadro; chave seccionadora CC; caixa com grau de proteção IP66; disjuntor termomagnético e dispositivo diferencial residual (Gomes, 2017).

O quadro é fundamental para a proteção do sistema de energia solar, pois realiza o seccionamento sob carga e permite o isolamento elétrico do restante da instalação para uma manutenção segura.

#### 2.4.5. Medidor bidirecional

O medidor bidirecional é responsável por medir continuamente o consumo de energia elétrica. Em uma instalação solar, é necessária a troca do medidor para um modelo com leitura bidirecional, pois quando o sistema de energia solar produz mais energia do que é necessário, o ponteiro gira para trás indicando a geração de energia. Só assim é possível garantir a compensação dos créditos na conta de energia elétrica.

A concessionária de energia, por exigência da ANEEL, é responsável por definir e trocar o medidor mediante uma solicitação. Após isso, é possível dar continuidade na instalação do sistema de energia solar conectado à rede elétrica.

Existe ainda a possibilidade para consumidores conectados em baixa tensão usar em dois medidores unidirecionais: um para aferir a energia consumida e outro, a gerada. Novamente, a concessionária de energia deve orientar qual será a melhor opção para cada caso. A distribuidora também é responsável pela operação e manutenção, incluindo todos os custos relacionados a esses processos (Enel X, 2016).

### **3. A EMPRESA**

Para obtermos o melhor projeto de um sistema fotovoltaico, é primordial levantar todos os dados de forma assertiva sobre o local da instalação e sobre o cliente. A visita técnica ao local da instalação possibilitou efetuar uma avaliação prévia acerca das condições em que seria instalado o sistema, o que levou ao indicativo favorável sobre a implantação de um sistema fotovoltaico.

A empresa ABC da educação (nome fictício) é uma companhia cearense que atua oferecendo soluções educacionais para escolas de todos os estados do Brasil, com mais de 700 mil alunos que utilizam alguma solução educacional da empresa. Esta empresa conta com uma sede própria instalada em uma área de 5,6 mil metros quadrados no município de Fortaleza, Ceará. Atualmente, cerca de 300 funcionários trabalham nesse local, com outros 150 funcionários em outras filiais espalhadas pelo País.

Nessa sede, não ficam instalados nenhuma máquina para produção de conteúdo pedagógico, como impressoras industriais. Toda a produção é tocada por pessoas e impressa em companhias parceiras. Os únicos equipamentos que consomem bastante energia são os ares-condicionados e os computadores pessoais, que ficam ligados das 7:30 às 18:00.

Devido ao crescimento exponencial nos últimos anos, a empresa demonstrou interesse em realizar a implantação de um eventual sistema solar fotovoltaico sem o uso de financiamento externo, caso o sistema fosse avaliado como vantajoso para o futuro da companhia.

## 4. METODOLOGIA

A primeira etapa de desenvolvimento de um projeto de sistema solar fotovoltaico é o dimensionamento. Para isso, o principal critério a ser considerado é a quantidade de energia que o sistema precisará gerar.

Essa quantidade de energia precisa ser calculada de modo que traga o melhor retorno financeiro para a parte envolvida e que caiba dentro do orçamento da contratante. Em extraordinários, quando a instalação do sistema fotovoltaico causa outros custos relacionados ao projeto de sustentação do sistema ou sistema elétrico, como o reforço do telhado ou aumento da potência do transformador de alimentação da unidade consumidora, a maximização do retorno financeiro não ocorre necessariamente quando o sistema é dimensionado para compensar toda a energia consumida pelo cliente.

Além disso, há os dados solarimétricos que precisam ser considerados e que podem ser obtidos por meio de equipamentos de medição no local, tabelas provenientes de programas computacionais ou mapas solarimétricos. Assim, a melhor forma de garantir que os dados serão realistas é utilizar adequadamente os instrumentos e especificar o local corretamente nos programas computacionais, com o objetivo de diminuir os possíveis prejuízos financeiros ou geração de energia insuficiente.

No final, o dimensionamento irá indicar:

1. A quantidade de módulos fotovoltaicos necessária;
2. O valor total do investimento;
3. O tempo de retorno esperado do sistema.

## 4.1. LEVANTAMENTO DE DADOS

### 4.1.1. Área do telhado disponível:

A área disponível no telhado para instalação dos painéis fotovoltaicos foi obtida com o auxílio do programa Google Earth, prática comum no mercado para obtenção da área disponível. Entretanto, alguns fatores devem ser considerados para a área total:

- Sombras proporcionadas por objetos no telhado ou por edifícios adjacentes;
- Peso total suportado pelo telhado;
- Inclinação e orientação da estrutura do telhado;
- Formato do telhado

Assim, levando em consideração a sombra proporcionada pela caixa d'água durante alguns períodos do ano e como margem de segurança, foi utilizado 90% da área total do telhado como sendo a área máxima disponível para implantação do sistema.

### 4.1.2. Irradiação solar local

A quantidade e a intensidade de energia solar que irradia a superfície terrestre são diretamente relacionadas com a relação geométrica entre o Sol e a Terra, a qual varia em função de fatores como: data, estação do ano, latitude e longitude do local, posição do sol e hora do dia.

A irradiação solar foi obtida por meio de pesquisa em atlas solarimétrico disponível para público acesso na internet. Assim, é preciso apenas especificar a latitude e longitude do local, no caso as coordenadas do município de Fortaleza.

### 4.1.3. Faturamento de energia elétrica da empresa

Na metodologia apresentada nesse trabalho, o faturamento de energia elétrica configura-se como o único dado imprescindível para o dimensionamento do sistema que requisitamos ao cliente. Essa fatura é muito importante porque contém as informações do consumo de energia em kWh, o histórico mês a mês do consumo de energia e as tarifas cobradas pela distribuidora de energia elétrica.

Além disso, deve ser considerado também a variação dele ao longo do tempo. Então, a tarifa deve ser ajustada com base na expectativa de variação da própria tarifa de energia elétrica ao longo do tempo. Deve ser procurado base histórica também para comparação.

## 4.2. POTÊNCIA DO SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO

Para calcular a potência necessária do sistema solar fotovoltaico, pode ser utilizada a equação abaixo:

$$POT = \frac{E_{compensada}}{ISM} \quad (1)$$

Em que:

**POT** é a potência do sistema fotovoltaico;

**Ecompensada** é a energia compensada por dia;

**ISM** é o valor médio de irradiação solar por dia

Observando o faturamento de energia elétrica, é possível perceber que, de acordo com o consumo de energia e as informações especificadas, a empresa opera como alta tensão. Sendo assim, para este tipo de grupo, a energia de compensação (Ecomp) é considerado como sendo igual a energia consumida, conforme a energia total indicada na **Erro! Fonte de referência não encontrada..** D essa forma, para alta tensão, podemos escrever a Equação 2 como sendo:

$$POT = \frac{E_{consumida}}{ISM} \quad (2)$$

Em que:

**POT** é a potência do sistema fotovoltaico;

**Econsumida** é a energia consumida mensal média por dia;

**ISM** é o valor médio de irradiação solar por dia

### 4.3. MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Após o cálculo da potência do sistema solar fotovoltaico, é preciso saber as especificações do módulo que será utilizado para, então, dimensionar o número de módulos necessários, como será o arranjo (associação) e os inversores a serem utilizados. A Equação 3 abaixo indica o cálculo para o número de módulos a ser utilizado no sistema:

$$N_{mod} = \frac{POT}{P_{max.mod}} \quad (3)$$

Em que:

**Nmod** é o número de módulos que compõe o sistema.

**POT** é a potência do sistema fotovoltaico;

**Pmax.mod** é a potência nominal máxima do módulo utilizado.

### 4.4. ÁREA DOS MÓDULOS E ÁREA DISPONÍVEL PARA INSTALAÇÃO

A área total que os módulos irão ocupar podem ser calculados simplesmente multiplicando a área dos módulos pelo número de módulos, conforme a equação abaixo:

$$A_{total} = A_{mod} \times N_{mod} \quad (4)$$

Em que:

**A<sub>total</sub>** é a área total destinada aos módulos fotovoltaicos;

**A<sub>mod</sub>** é a área ocupada de um módulo fotovoltaico;

**N<sub>mod</sub>** é o número de módulos que compõe o sistema.

Já a área disponível para instalação pode ser calculada com o auxílio de geoferramentas *online* que disponibilizem o recurso de cálculo de área e a fotografia aérea do local. No caso desse trabalho, foi utilizado o programa Google Earth.

#### 4.5. DIMENSIONAMENTO DO INVERSOR

Para fazer a ligação dos módulos fotovoltaicos com a rede elétrica instalada na cidade, é necessário o inversor. Este funciona corretamente quando os seus parâmetros são dimensionados para serem compatíveis com a rede elétrica. São parâmetros de saída do inversor:

- Frequência;
- Corrente;
- Tensão.

Para calcular a potência do inversor, é preciso considerar o fator de dimensionamento de inversor (FDI), que representa a relação entre a capacidade do inversor e a potência nominal do gerador fotovoltaico.

A eficiência de transferência de potência a partir da célula solar depende tanto da quantidade de luz solar como do incide de radiação sobre os painéis solares. Ou seja, as perdas de potência entre módulos e inversores também podem ser por

acumulo de sujeira, cabeamento, incompatibilidade elétrica e perdas por aquecimento. A porcentagem de perda por acumulo de sujeira pode ser de até 8%, perda no cabeamento representa até 1%, incompatibilidade elétrica entre células e módulos dispersa até 2% de potência, e a grande vilã é a perda por aquecimento que pode chegar até 18%, totalizando em condições bem extremas até 29% de energia que não chega aos inversores (Felipe, 2018).

Ou seja, se o um sistema fotovoltaico tem 36 os módulos de 270W totalizando 10 kW mas estima-se que essa instalação terá até 25% de perda de energia, então ao invés de dimensionar um inversor de 10 kW, dimensiona-se para o sistema inversores com 7,5 kW ou valores bem próximo disso, sendo um inversor de 7,5 kW mais barato do que um de 10 kW. Dessa maneira há então uma economia no custo na conversão de corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA).

Nas regiões próximas à Linha do Equador, como o local considerado nesse trabalho, a radiação apresenta picos frequentes, o que faz com que o gerador fotovoltaico opere mais próximo de sua potência nominal, exigindo maior potência de operação dos inversores. Dessa forma, não é recomendável limitar a potência do sistema solar por meio dos inversores em locais de alto nível de irradiação porque resulta em diminuição considerável da potência.

Assim, a potência do inversor pode ser calculada como sendo:

$$POT_{inv} = POT \times FDI \quad (5)$$

Em que:

**POT<sub>inv</sub>** é a potência do inversor;

**POT** é a potência calculada do sistema fotovoltaico;

**FDI** é o fator de dimensionamento de inversor.

O inversor convencional trabalha em "faixas de voltagem" e tem limites de corrente e potência também. Caso esses limites sejam respeitados, é possível fazer sistemas de diferentes tamanhos, usando o mesmo inversor. Entretanto, essa

configuração não é otimizada, pois o inversor teria o mesmo custo mesmo com número menor de painéis.

Além dos inversores normais, existe a opção de usar microinversores para o sistema fotovoltaico. Nessa configuração, os painéis operariam de forma independente, 1 microinversor por painel, garantindo modularidade ao sistema já que não seria preciso mudar o inversor sempre que precisasse aumentar o número de painéis. Apesar de poder se configurar como problema por aumentar o custo sistema, é importante pontuar que os microinversores do mercado apresentam vida útil cerca de duas vezes maior que os inversores, com microinversores chegando a 25 anos de garantia apenas.

#### 4.6. VIABILIDADE ECONÔMICA

Após realizado o dimensionamento do sistema de geração fotovoltaica e definidas as quantidades de cada componente, é necessário analisar o investimento que será feito pela empresa. A análise é feita pelo balanço econômico do quanto seria investido e o valor ganho com a economia que o sistema gerará no período de 25 anos, tempo de garantia normalmente oferecido pelas fabricantes dos módulos fotovoltaicos.

Para estimar o balanço econômico é preciso o valor do produto da quantidade de energia gerada pelas tarifas de energia elétrica estimada ano a ano. No final, com esse balanço, é possível visualizar o total investido no projeto do sistema, os custos de operação e manutenção e o tempo final de retorno do investimento (*payback*). Uma planilha construída para os 25 anos com todos os balanços anuais, é um modo simples de fazer o estudo financeiro, mas é a análise de investimento mais comum e prático de comparar investimentos distintos.

#### **4.6.1. Custos totais do sistema**

Os custos diretos totais englobam todas as despesas ao longo da vida útil do sistema. Nesse trabalho, os fatores considerados na viabilidade econômica são:

- Gastos com equipamentos principais e secundários;
- Custos totais para instalar todo o sistema solar fotovoltaico, incluindo ferramentas, utensílios e mão de obra;
- Custos de manutenções preventivas e corretivas;
- Valor dos equipamentos ao final do período da garantia.

Os valores foram estimados de acordo com o valor de mercado atual de cada componente.

#### **4.6.2. Custos de manutenção**

Os gastos com manutenção preventiva consistem na verificação de todos os componentes do sistema, incluindo os painéis, os inversores, os cabos e as estruturas de fixação, com o objetivo de otimizar a eficiência do sistema, prevenindo problemas como acúmulo de sujeira, perda no cabeamento, incompatibilidade elétrica, e aquecimento, que podem provocar perdas na produção de energia elétrica. O valor mais utilizado para estimar as despesas com manutenção preventiva anual varia entre 0,5% e 1% do custo total do SF instalado.

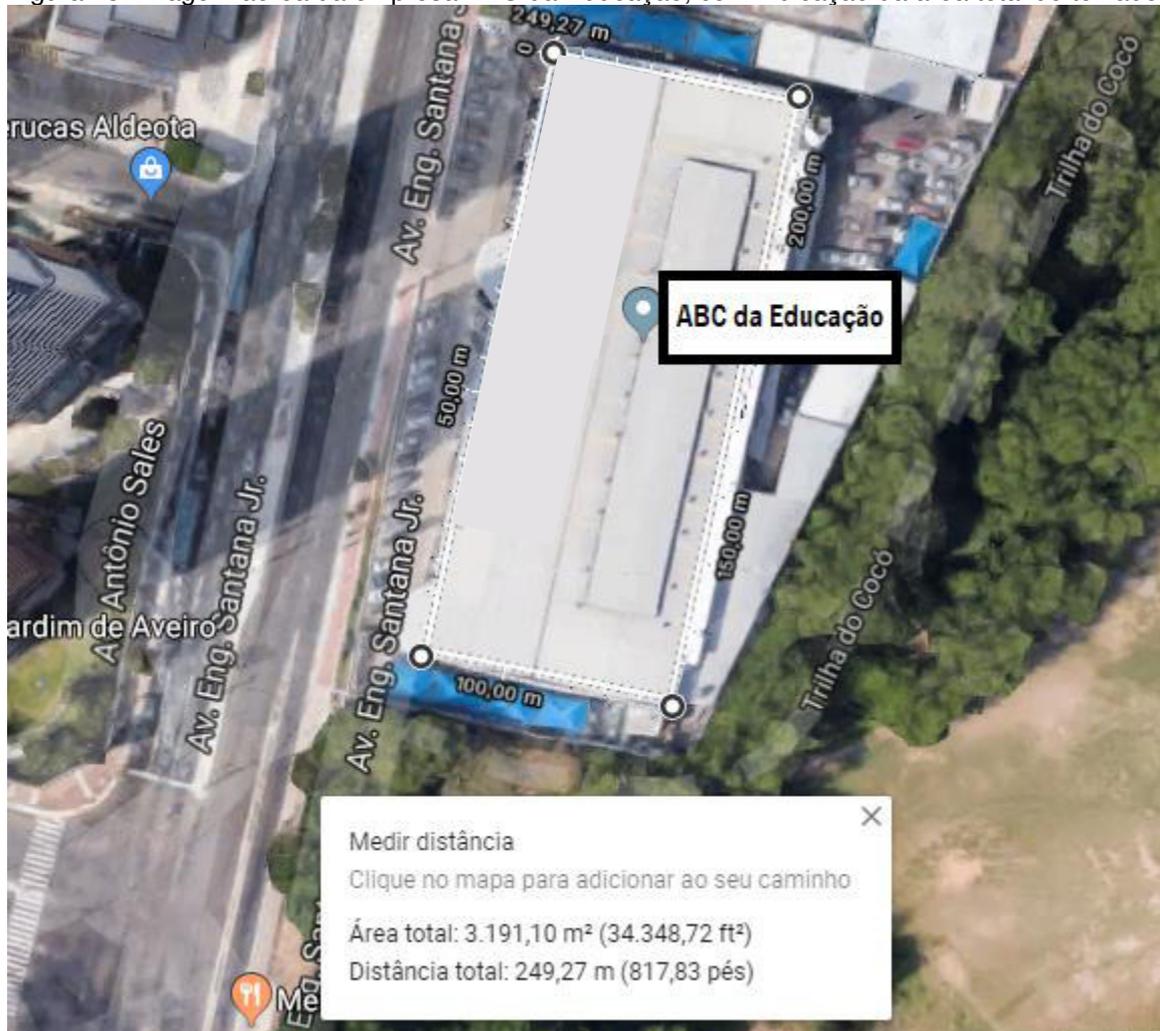
A manutenção corretiva, no caso de um sistema solar fotovoltaico, consiste basicamente na troca dos equipamentos principais. Normalmente, os inversores apresentam vida útil de 10 anos, alguns com possibilidade de estender a garantia para equiparar à garantia dos painéis de 25 anos, com um custo extra.

## 5. RESULTADOS E ANÁLISE

### 5.1. POTÊNCIA NECESSÁRIA DO SISTEMA

A empresa estudada possui uma área disponível para implantação dos sistemas solares fotovoltaicos de cerca de 3 mil metros quadrados, conforme a Figura 13 a seguir obtida pelo programa Google Earth:

Figura 13: Imagem aérea da empresa ABC da Educação, com indicação da área total do telhado.



Fonte: Google.

Em visita técnica à sede da empresa, pôde ser constatado que não há prédios ao redor do estabelecimento e nenhuma árvore que possa projetar sombra no

telhado. Além disso, segundo a lei complementar nº 236, de 11 de agosto de 2017, em que regulamenta o Plano Diretor da Cidade de Fortaleza, a zona em que está instalada a empresa é considerada uma zona de interesse ambiental (ZIA) e o uso e ocupação do solo é limitado. Ou seja, a construção de prédios altos é proibida, o que garante que no futuro o sistema não seja bloqueado pela sombra de algum prédio adjacente.

Mesmo com pouquíssima sombra adjacente, considerando o formato, a inclinação e a orientação do telhado, foi considerado 80% do telhado como disponível. Então:

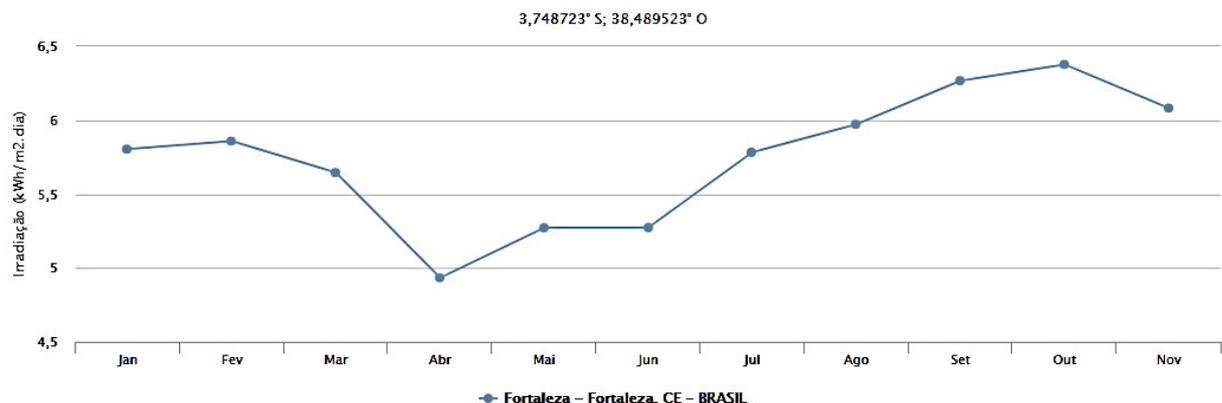
$$A_{total} = A_{telhado} * Aproveitamento = 3191,10 \text{ m}^2 * 0,8 = 2552,88 \text{ m}^2$$

A irradiação solar no município de Fortaleza, próxima a localidade onde serão instaladas as placas apresentam as seguintes coordenadas:

- Latitude: 3,701° S
- Longitude: 38,449° O

Conforme as coordenadas citadas, podemos representar a irradiação solar ao longo dos meses de acordo com o gráfico abaixo:

Gráfico 1: Irradiação solar para o município de Fortaleza, próximo ao local de instalação.



Fonte: Dados do Atlas solarimétrico do Brasil, elaborado pelo CRESESB.

Com o gráfico acima, além de verificar os dados da irradiação mês a mês, é possível visualizar os meses de maior e menor índice de radiação local. Para facilitar

a utilização desses dados, foi elaborada uma tabela que contém a informação de cada ponto do gráfico:

Tabela 1: Irradiação solar próximo ao local de implantação, na cidade de Fortaleza, CE.

| Irradiação solar próximo ao local de implantação |              |
|--|--------------|
| Local  | Fortaleza    |
| Latitude:  | 3,748723° S  |
| Longitude:                                       | 38,489523° O |
| Irradiação (kWh/m <sup>2</sup> dia)              |              |
| Jan  | 5,8          |
| Fev  | 5,86         |
| Mar  | 5,65         |
| Abr  | <b>4,93</b>  |
| Mai  | 5,27         |
| Jun  | 5,27         |
| Jul  | 5,45         |
| Ago  | 5,78         |
| Set  | 5,97         |
| Out  | 6,27         |
| Nov  | <b>6,38</b>  |
| Dez  | 6,08         |
| <b>Média</b>                                     | <b>5,73</b>  |

Fonte: Elaborada pelo autor, dados do Atlas solarimétrico do Brasil

Com os dados dessa tabela, podemos concluir que a média de irradiação anual para o local é:

$$ISM = 5,73 \text{ kWh/m}^2\text{dia}$$

A fatura de energia elétrica é fornecida pela distribuidora de energia ENEL e foi disponibilizada pela empresa. A figura abaixo mostra o documento digitalizado, que foi utilizado neste trabalho:

Figura 14: Conta de energia elétrica fornecida pela empresa referente ao mês de maio de 2018.



**Companhia Energética do Ceará**  
Rua Padre Veloso, 150  
CEP 60706-040 Fortaleza CE  
CNPJ 02042291000170  
CPF 06.135.946/3  
www.enelce.com.br

**NOTA FISCAL - CONTA DE ENERGIA ELÉTRICA | GRUPO A | SÉRIE B-2 FATURA Nº**  
**CONTROLE FISCAL** C01F.2802.D3AD.6013.8809.325A.770C.397E 1131941

**Esta é a sua fatura de Mai 2018**

**VENCIMENTO** 07/06/2018  
**TOTAL A PAGAR (R\$)** \*\*\*\*\*32.742,75

**Nº DO CLIENTE** 9010040  
Último dígito do lado direito  
da conta é o número da fatura

**ADOS DO CLIENTE**  
**ESTIMATIVO**

**ITULAR**

**DATAS**  
Leitura Anterior: 27/04/2018  
Leitura Atual: 26/05/2018  
Período Fornecido: 30/05/2018  
Previsão Próx. Leitura: 27/06/2018  
Agrupamento: 31 Dias

**MODALIDADE TARIFÁRIA**  
HOROSAZONAL Verde  
SECO  
COM SERV. OUT. ATIV  
HS DEM CLAS VERDE13,8KV - A

**Nº DOS MEDIDORES**  
5398346

| GRANDEZAS MEDIDAS | CONSUMO EM KWh |            |           | DEMANDA EM KW |            |           | ENERGIA REATIVA UFPR/KWh |            |           | DEMANDA REATIVA DMCR |            |           | CONSTANTES DE MEDIÇÃO |   |   |
|-------------------|----------------|------------|-----------|---------------|------------|-----------|--------------------------|------------|-----------|----------------------|------------|-----------|-----------------------|---|---|
|                   | HFR/Único      | Fora Ponta | Reservado | HFR/Único     | Fora Ponta | Reservado | HFR/Único                | Fora Ponta | Reservado | HFR/Único            | Fora Ponta | Reservado | 1                     | 1 | 1 |
| Leitura Anterior  | 132644         | 114485     | 0         | 5831          | 3834       | 2438      | 19                       | 0          | 0         | 3508                 | 3233       | 0         |                       |   |   |
| Leitura Atual     | 173787         | 119636     | 0         | 6039          | 3871       | 2453      | 19                       | 0          | 0         | 6705                 | 3356       | 0         |                       |   |   |
| Total Medido      | 41143          | 5145       | 0         | 208           | 136        | 25        | 0                        | 0          | 0         | 197                  | 124        | 0         |                       |   |   |
| Contratado        | 0              | 0          | 0         | 150           | 150        | 0         | 0                        | 0          | 0         | 0                    | 0          | 0         |                       |   |   |
| Dem. Ultrapass.   | 0              | 0          | 0         | 56            | 0          | 0         | 0                        | 0          | 0         | 0                    | 0          | 0         |                       |   |   |

**PERDAS DE TRANSFORMAÇÃO (%)**: 0,8

**FATOR POTÊNCIA**: 0,00  
**FATOR CARGA**: 57,32

| VALORES DE FATURAMENTO                    | TOTAL MÊNDO | TARIFA (R\$) | VALORES (R\$) |
|---|-------------|--------------|---------------|
| (A) Contrato de Energia                   | 5,145       | 1,80134      | 9.267,81      |
| Consumo Faturado Ponta                    | 41.143      | 9,43493      | 17.067,32     |
| Consumo Faturado Fora Ponta               | 75          | 1,35719      | 5,34          |
| Consumo Realivo Excedente Fora de Ponta   | 0           |              | 0             |
| Demanda Faturada Fora de Ponta            | 208         | 19,72600     | 4.103,04      |
| Demanda Faturada Ultrapassag Fora Ponta   | 56          | 39,47009     | 2.289,24      |
| Subtotal(A)                               |             |              | 32.737,37     |
| (B) Outros Encargos                       |             |              |               |
| Iluminação Pública Capital                |             |              | 348,65        |
| Indenização Mensal DMIC                   |             |              | -343,14       |
| Adicional Bandeira Amarela ( R\$ 607,29 ) |             |              | 5,44          |
| Subtotal(B)                               |             |              | 0,95          |

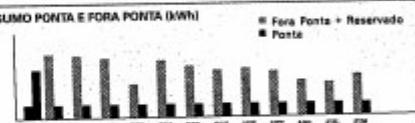
**ICMS BASE DE CÁLCULO (R\$)**: 32.737,31  
**ALÍQUOTA (%)**: 27,00%  
**VALOR (R\$)**: 8.838,07

**TIPO DE FATURAMENTO**: 00 Normal

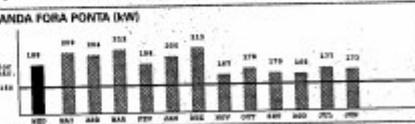
| HISTÓRICO DE CONSUMO (ÚLTIMOS 12 MESES) | PERÍODO (MÊS/ANO) | DEMANDA (KW) | CONSUMO (KWh) |
|---|-------------------|--------------|---------------|
|   |                   | HORA PONTA   | FORA PONTA    |
| 06/18                                   | 136               | 208          | 5.145         |
| 04/18                                   | 127               | 204          | 5.256         |
| 03/18                                   | 130               | 212          | 4.818         |
| 02/18                                   | 132               | 186          | 3.839         |
| 01/18                                   | 131               | 200          | 4.623         |
| 12/17                                   | 131               | 213          | 4.687         |
| 11/17                                   | 99                | 167          | 3.450         |
| 10/17                                   | 114               | 178          | 3.668         |
| 09/17                                   | 125               | 170          | 3.900         |
| 08/17                                   | 112               | 168          | 3.254         |
| 07/17                                   | 119               | 177          | 3.454         |
| 06/17                                   | 100               | 173          | 3.564         |

| DEMONSTRATIVO DE ULTRAPASSAGEM DE DEMANDA | DESCRIÇÃO DA ULTRAPASSAGEM       | DEMANDA (KW) | DATA | HORA |
|---|----------------------------------|--------------|------|------|
|   | Ultrapassagem Demanda Ponta      | 58,00        |      |      |
|   | Ultrapassagem Demanda Fora Ponta | 0,00         |      |      |
|   | Ultrapassagem Demanda Reservada  | 0,00         |      |      |

**CONSUMO PONTA E FORA PONTA (KWh)**



**DEMANDA FORA PONTA (KW)**



| VALORES CONTRATADOS / REGISTRADOS | VALOR | VALOR                            |     |
|-----------------------------------|-------|----------------------------------|-----|
| Demanda Contratada Ponta          | 150   | Demanda Faturada Ponta           | 0   |
| Demanda Contratada Fora Ponta     | 150   | Demanda Faturada Fora Ponta      | 258 |
| Demanda Registrada Ponta          | 136   | Demanda Ultrapassagem Ponta      | 0   |
| Demanda Registrada Fora Ponta     | 208   | Demanda Ultrapassagem Fora Ponta | 56  |
| Consumo Contratado Ponta          | 0     | Uso do Sistema Ponta             | 0   |
| Consumo Contratado Fora Ponta     | 0     | Uso do Sistema Fora Ponta        | 0   |

**TENSÃO CONTRATADA**: 13,8 KV

**INDICADORES DE QUALIDADE DO FORNECIMENTO**  
Mês Mar 2018 DICP=0,00 P EUSD 7,496,95

| Período    | Meta Individual | Valor Aparente Individual |
|------------|-----------------|---------------------------|
| Mensal     | 0,25            | 2,00                      |
| Trimestral | 6,71            | 4,13                      |
| Anual      | 13,43           | 8,27                      |

**COMPOSIÇÃO DO VALOR DE CONSUMO**

**ENERGIA**

**DISTRIBUIÇÃO**

**TRANSMISSÃO**

**ENCARGOS SETORIAIS**

**TREBUTOS**

**CONSUMO CONSCIENTE - EMISSÕES DE CO<sub>2</sub> (kg/kWh)**

Compensação baseada pelo consumo de energia elétrica

Emissão (kgCO<sub>2</sub>) | Compensado (kgCO<sub>2</sub>) | Carbonilidade Equivalente (kg CO<sub>2</sub>)

1000 | 0,00 | 0,00

**ATENÇÃO**

**IMPORTANTE**

**INFORM. COMPLEMENTARES**

Fonte: Fornecida pela empresa

De forma resumida, podemos ver o consumo de energia como o somatório da média do consumo hora ponta e da média do consumo fora ponta. Esses dados podem ser coletados mais facilmente da tabela abaixo:

Tabela 2: Histórico de consumo de energia elétrica da empresa

|              | DEMANDA (kW) |              | CONSUMO (kWh) |               |
|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|
|              | HORA PONTA   | FORA PONTA   | HORA PONTA    | FORA PONTA    |
| mai/18       | 136          | 208          | 5.145         | 41.143        |
| abr/18       | 127          | 204          | 5.256         | 40.545        |
| mar/18       | 136          | 212          | 4.818         | 39.617        |
| fev/18       | 132          | 188          | 3.889         | 31.213        |
| jan/18       | 123          | 200          | 4.693         | 38.937        |
| dez/17       | 131          | 210          | 4.097         | 37.059        |
| nov/17       | 99           | 167          | 3.450         | 35.634        |
| out/17       | 114          | 178          | 3.868         | 36.029        |
| set/17       | 105          | 170          | 3.800         | 35.159        |
| ago/17       | 112          | 168          | 3.284         | 31.950        |
| jul/17       | 119          | 177          | 3.454         | 31.246        |
| jun/17       | 100          | 173          | 3.554         | 33.733        |
| <b>MÉDIA</b> | <b>120</b>   | <b>188</b>   | <b>4.109</b>  | <b>36.022</b> |
|              |              | <b>TOTAL</b> | <b>40.131</b> |               |

Fonte: Elaborada pelo autor, com dados fornecidos pela empresa

Assim, o consumo total médio mensal é:

$$E_{cons} = \frac{40.131 \text{ kWh}}{30 \text{ dias}} = 1337,7 \text{ kWh/dia}$$

Com os dados de energia consumida e o valor médio de horas solares, a potência do sistema solar fotovoltaico é dada por:

$$POT = \frac{1337,7}{5,73} = 233,46 \text{ KWp}$$

A potência calculada acima é maior que a demanda contratada, o que será um fator limitante para o sistema. Para o caso de clientes em AT, a potência disponibilizada é equivalente à demanda contratada, logo, o aumento deste valor implica um aumento no montante contratado pelo cliente, e conseqüentemente, proporciona um valor maior de custo mínimo para o cliente a ser pago.

Caso o incremento resulte em potência cujo valor exceda a capacidade do transformador da unidade, a troca e adequação do equipamento deverá ser realizada pelo cliente, ocasionando em mais custos para o mesmo.

Como a empresa indicou que gostaria de testar o sistema solar fotovoltaico antes de compensar a maior parte da conta de energia elétrica por meio da geração do sistema, foi acordado que o dimensionamento deveria ter 50% do valor. Então:

$$POT = 233,46 \times 0,5 = 116,73 \text{ KWp}$$

## 5.2. POTÊNCIA DO INVERSOR

Como o local a ser instalado os painéis apresenta baixo grau de sombreamento, com ampla ventilação que diminui o aquecimento das placas, foi considerado o fator de dimensionamento de inversores como sendo de 85%. Assim, podemos calcular a potência do inversor como sendo:

$$POT_{inv} = 116,73 * 0,85 = 99,2 \text{ kVA}$$

Como margem de segurança, precisamos de potência total dos inversores como sendo superior a 100 kVA:

$$POT_{inv. \text{mín}} = 100 \text{ kVA}$$

Então, o modelo escolhido foi o inversor INGECON SUN 100TL IS 3PLAY, da empresa Ingeteam. O modelo apresenta alta potência de saída, de até 110, permite uma drástica redução do número de inversores requeridos para a montagem de uma instalação fotovoltaica. Assim, minimiza a despesa total em mão de obra e cabos. Além disso, com este inversor FV é possível poupar até 20% em cablagem AC, já que não requer cabo neutro.

Assim, 1 inversor desse tipo seria suficiente para o projeto. Entretanto, ainda poderia ser outro modelo, a depender das propostas comerciais das empresas que atuam no local da sede da empresa.

### 5.3. PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

No mercado, existem muitos tipos de painéis e diversas marcas para serem usadas. Com base nas especificações do dimensionamento e na disponibilidade da marca, foi avaliado um módulo da empresa Sunlight, modelo SL – 275P – 18/BB de 270W. Os módulos desse modelo oferecem alto rendimento das células, mesmo em espaços reduzidos. No apêndice A, é possível ver as especificações completas do sistema.

Com base nos parâmetros do modelo, o número de painéis necessário seria:

$$N_{mod} = \frac{POT}{POT_{painel}} = \frac{116,73}{0,270} \approx 429 \text{ painéis}$$

Como cada painel ocupa uma área de 1,65m<sup>2</sup>, temos que:

$$A_{total} = N_{mod} \times A_{painel} = 429 \times 1,65 = 707,85 \text{ m}^2$$

Portanto, o local da empresa apresenta área disponível para instalação de todo o sistema necessário. Além da área, é importante pontuar que a inclinação sugerida para a latitude do município de Fortaleza é de 10º, com o objetivo de aumentar a eficiência dos painéis solares e reduzir o acúmulo de sujeira nas células e diminuir o custo com a manutenção.

Os dados do sistema necessários para esse projeto podem ser vistos na tabela abaixo:

Tabela 3: Dados preliminares do sistema solar fotovoltaico.

| <b>RESUMO DOS DADOS DO SISTEMA</b>            |        |
|---|--------|
| <b>Quantidade de painéis</b>                  | 429    |
| <b>Quantidade de inversores</b>               | 1      |
| <b>Potência do painel (Wp)</b>                | 270    |
| <b>Potência do inversor (kVA)</b>             | 100    |
| <b>Potência total do sistema (kWp)</b>        | 115,83 |
| <b>Área total dos painéis (m<sup>2</sup>)</b> | 707,85 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 5.4. PROPOSTA COMERCIAL

Após definido o sistema que deveria ser implantado, é necessário ajustar o sistema com base nas práticas do mercado de energias renováveis no município de Fortaleza. Então, a proposta comercial utilizada nesse trabalho foi a da empresa Fênix Solar. Nessa proposta, foi negociado o valor em duas etapas: a dos componentes do sistema e a da instalação com o projeto elétrico.

Em resumo, a proposta comercial foi da empresa pode ser vista na tabela abaixo:

Tabela 4: Proposta comercial feita pela empresa Fênix Solar.

## 1. COMPONENTES DO SISTEMA

KIT #22

| GERADOR FOTOVOLTAICO 108 kWp |   |                       |
|------------------------------|---|-----------------------|
| ITEM                         | PRODUTO   | QUANTIDADE            |
| 1                            | Painel Sunlight 270W ULTRA                        | 400                   |
| 2                            | Microinversor Trifásico AP System 1000W (220V)    | 100                   |
| 3                            | Perfil suporte de Alumínio (6,30M) - Solar Group  | 132                   |
| 4                            | Perfil suporte de Alumínio (4,20M) - Solar Group  | 2                     |
| 5                            | Grampo Intermediario (35/40 MM) - Solar Group     | 766                   |
| 6                            | Grampo Terminal (35 MM) - Solar Group             | 68                    |
| 7                            | Kit Prisioneiro M10x200 - Solar Group             | 534                   |
| 8                            | Junção U suporte modulo para Perfil - Solar Group | 100                   |
| 9                            | Frete   | 1                     |
| <b>VALOR</b>                 |   | <b>R\$ 357.370,76</b> |

| 2. INSTALAÇÃO E PROJETO ELÉTRICO |                                    |               |
|----------------------------------|------------------------------------|---------------|
| ITEM                             | PRODUTO                            | QUANTIDADE    |
| 1.                               | Instalação do sistema              | R\$ 82.600,00 |
| 2.                               | Projeto elétrico                   | R\$ 30.000,00 |
| 3.                               | Garantia estendida dos componentes | R\$ 50.000,00 |

Fonte: Fênix Solar.

Com a proposta, algumas mudanças deveriam ser feitas em relação ao projeto original, pois os inversores oferecidos pela empresa foram microinversores da marca AP Systems. Nessa configuração, cada microinversor daria suporte a quatro painéis fotovoltaicos, o que seria suficiente para o projeto. No total, a potência dos microinversores totalizam 100 kVA, da mesma forma como foi calculado anteriormente.

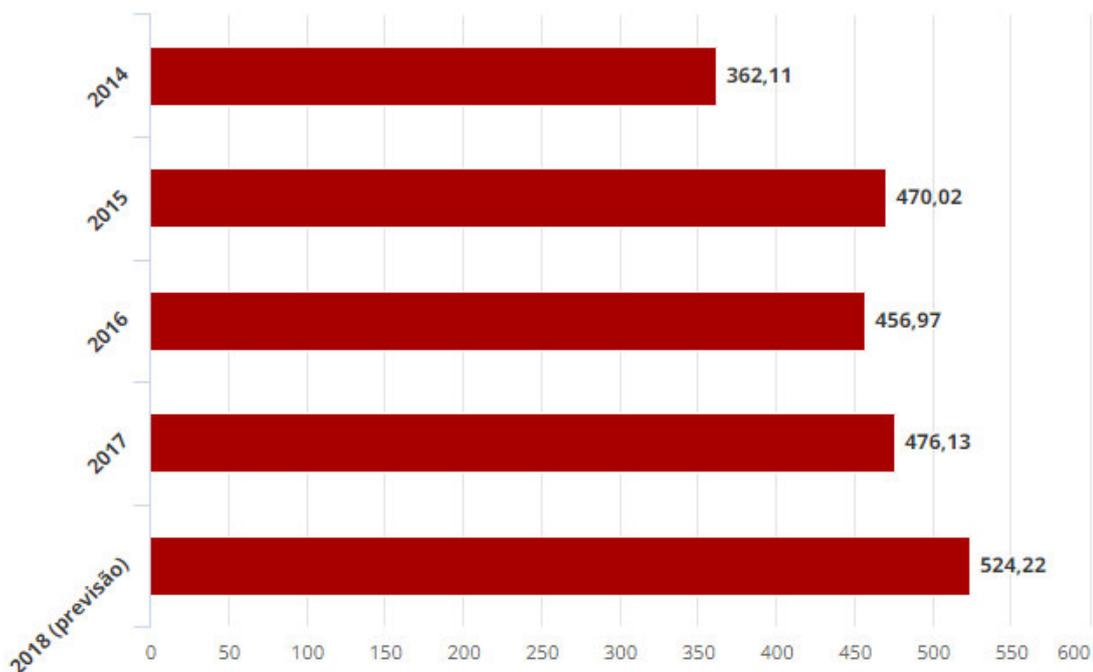
Assim, a mudança de inversor para microinversor possibilita um desenvolvimento modular do projeto, ideal para a empresa que tem interesse testar inicialmente o modelo de geração distribuída e ir aumentando a geração conforme os testes iriam se confirmando. Assim, a mudança foi considerada benéfica para a empresa.

## 5.5. VIABILIDADE ECONÔMICA

O estudo da viabilidade econômica desses painéis requer algumas considerações quanto ao período e utilização do sistema.

A primeira delas é o período de análise do estudo. Foi escolhido 25 anos por ser equivalente ao tempo em que os componentes estarão em garantia. A segunda é de que o consumo médio da empresa permanecerá constante durante todo o período de análise. A terceira premissa é a variação da tarifa de energia ao longo dos anos. Historicamente, a tarifa de energia aumenta ao longo dos anos com a tendência, segundo especialistas, é de aumentar ao longo dos anos (Zanlorenssi, 2017). Podemos observar a variação ao longo dos últimos anos para diferentes categorias no gráfico abaixo:

Gráfico 2: Valor Médio da Tarifa de Energia no Brasil, em R\$ por megawatt-hora, para consumidores residenciais.



Fonte: Dados da Abrace, elaborado por G1.

Assim, foi considerado o aumento de 11% nos próximos dois anos, 9% nos três anos seguintes e 5% a partir de então, conforme a tabela abaixo:

Tabela 5: Aumento da tarifa de energia utilizado nos cálculos de viabilidade econômica

| <b>Aumento da tarifa de energia</b> |              |
|-------------------------------------|--------------|
| <b>Anos</b>                         | <b>Valor</b> |
| 1 e 2                               | 10%          |
| 3 a 5                               | 8%           |
| 6 a 25                              | 5%           |

Fonte: Elaborado pelo autor

Outro importante fator a ser considerado é o desgaste anual dos painéis, que é o quanto de energia a menos o sistema vai deixar de produzir em um ano. O desgaste anual considerado foi de 0,75%, o recomendado pela fabricante. Com essas considerações, foi possível construir uma tabela que indicasse a produção anual líquida, considerando os gastos com manutenção do sistema e perda de eficiência da geração de energia, como mostra a tabela abaixo:

Tabela 6: Economia acumulada por ano, no período de 25 anos.

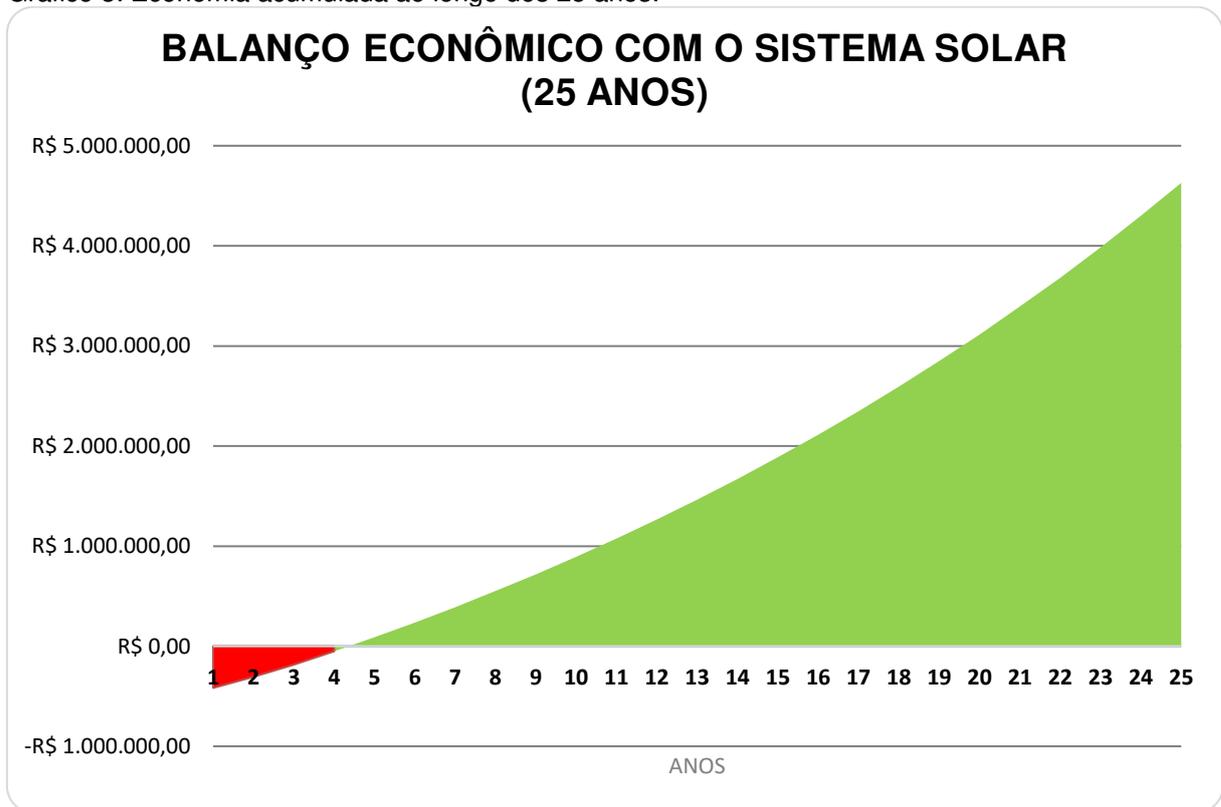
| ANO | INFLAÇÃO | PRODUÇÃO (kWh) | TARIFA DE ENERGIA MÉDIA | ENTRADA ANUAL LÍQUIDO | ECONOMIA ACUMULADA      |
|-----|----------|----------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|
| 1   | -        | 151000         | R\$ 0,71                | R\$ 101.788,71        | <b>-R\$ 417.211,29</b>  |
| 2   | 10%      | 149868         | R\$ 0,78                | R\$ 111.586,57        | <b>-R\$ 305.624,72</b>  |
| 3   | 10%      | 148743         | R\$ 0,86                | R\$ 122.283,39        | <b>-R\$ 183.341,32</b>  |
| 4   | 8%       | 147628         | R\$ 0,92                | R\$ 131.435,07        | <b>-R\$ 51.906,26</b>   |
| 5   | 8%       | 146521         | R\$ 1,00                | R\$ 141.244,75        | <b>R\$ 89.338,49</b>    |
| 6   | 8%       | 145422         | R\$ 1,05                | R\$ 147.405,31        | <b>R\$ 236.743,80</b>   |
| 7   | 5%       | 144331         | R\$ 1,10                | R\$ 153.825,38        | <b>R\$ 390.569,19</b>   |
| 8   | 5%       | 143249         | R\$ 1,16                | R\$ 160.515,90        | <b>R\$ 551.085,09</b>   |
| 9   | 5%       | 142174         | R\$ 1,21                | R\$ 167.488,26        | <b>R\$ 718.573,35</b>   |
| 10  | 5%       | 141108         | R\$ 1,27                | R\$ 174.754,33        | <b>R\$ 893.327,68</b>   |
| 11  | 5%       | 140050         | R\$ 1,34                | R\$ 182.326,48        | <b>R\$ 1.075.654,16</b> |
| 12  | 5%       | 138999         | R\$ 1,40                | R\$ 190.217,61        | <b>R\$ 1.265.871,76</b> |
| 13  | 5%       | 137957         | R\$ 1,47                | R\$ 198.441,15        | <b>R\$ 1.464.312,91</b> |
| 14  | 5%       | 136922         | R\$ 1,55                | R\$ 207.011,11        | <b>R\$ 1.671.324,02</b> |
| 15  | 5%       | 135895         | R\$ 1,63                | R\$ 215.942,07        | <b>R\$ 1.887.266,10</b> |
| 16  | 5%       | 134876         | R\$ 1,71                | R\$ 225.249,26        | <b>R\$ 2.112.515,35</b> |
| 17  | 5%       | 133864         | R\$ 1,79                | R\$ 234.948,51        | <b>R\$ 2.347.463,86</b> |
| 18  | 5%       | 132860         | R\$ 1,88                | R\$ 245.056,34        | <b>R\$ 2.592.520,21</b> |
| 19  | 5%       | 131864         | R\$ 1,98                | R\$ 255.589,96        | <b>R\$ 2.848.110,17</b> |
| 20  | 5%       | 130875         | R\$ 2,08                | R\$ 266.567,32        | <b>R\$ 3.114.677,49</b> |
| 21  | 5%       | 129893         | R\$ 2,18                | R\$ 278.007,09        | <b>R\$ 3.392.684,58</b> |
| 22  | 5%       | 128919         | R\$ 2,29                | R\$ 289.928,76        | <b>R\$ 3.682.613,34</b> |
| 23  | 5%       | 127952         | R\$ 2,40                | R\$ 302.352,64        | <b>R\$ 3.984.965,98</b> |
| 24  | 5%       | 126993         | R\$ 2,52                | R\$ 315.299,87        | <b>R\$ 4.300.265,84</b> |
| 25  | 5%       | 126040         | R\$ 2,65                | R\$ 328.792,50        | <b>R\$ 4.629.058,34</b> |

Fonte: Elaborado pelo autor

Na Tabela 6, a coluna de entrada anual líquida informa o valor que seria economizado menos as despesas de manutenção do sistema. Pode-se observar que, mesmo com a diminuição da produção de energia ao longo dos anos, a entrada anual líquida aumenta. Isso ocorre devido a expectativa da sociedade de que o aumento da tarifa de energia elétrica será expressivo nos próximos anos.

Outro detalhe importante a ser observado é que, entre 4 e 5 anos, o balanço começa a ficar positivo. Assim, podemos concluir que o tempo de retorno do investimento é de até 5 anos, considerado um investimento muito bom a longo prazo. Essa informação também pode ser visualizada no gráfico abaixo, feito a partir da Tabela 6:

Gráfico 3: Economia acumulada ao longo dos 25 anos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Embora o resultado tenha indicado que o investimento seja classificado como muito bom para a empresa, isso não será uma realidade para todas, pois nem todas as empresas tem disponibilidade de desembolsar quantia significativa de dinheiro para instalar o sistema solar fotovoltaico sem recorrer a financiamento externo. Dito isso, a expansão do crédito para o financiamento de sistemas solares fotovoltaicos e a consequente diminuição dos juros cobrados, fazem dessa alternativa uma boa opção também para empresas que não possuem fluxo de caixa suficiente.

Em geral, podemos resumir os gastos como descritos na tabela abaixo:

Tabela 7: Resumo geral do balanço econômico do sistema solar fotovoltaico.

| <b>Entradas e saídas</b>                           | <b>Valor unitário</b> | <b>Valor por ano</b> | <b>Valor após 25 anos</b> |
|--|-----------------------|----------------------|---------------------------|
| Aquisição dos componentes principais e secundários | -R\$ 357.330,76       | R\$ -                | -R\$ 357.330,76           |
| Instalação do sistema                              | -R\$ 82.600,00        | R\$ -                | -R\$ 82.600,00            |
| Projeto elétrico                                   | -R\$ 30.000,00        | R\$ -                | -R\$ 30.000,00            |
| Garantia estendida dos componentes                 | -R\$ 50.000,00        | R\$ -                | -R\$ 50.000,00            |
| Manutenção preventiva e corretiva                  | R\$ -                 | -R\$ 5.000,00        | -R\$ 170.919,00           |
| <b>Subtotal</b>                                    |                       |                      | <b>-R\$ 690.849,76</b>    |
| Economia de energia                                | R\$ -                 | R\$ 118.516,11       | R\$ 5.148.748,34          |
| <b>Subtotal</b>                                    |                       |                      | <b>R\$ 5.148.748,34</b>   |
| <b>ECONOMIA TOTAL (25 ANOS)</b>                    |                       |                      | <b>R\$ 4.457.898,58</b>   |
| <b>TEMPO DE RETORNO</b>                            |                       |                      | <b>5 ANOS</b>             |

Fonte: Elaborado pelo autor

Diante dos resultados obtidos, o investimento foi comparado com outros para favorecer ainda mais o argumento de que seria vantajoso o investimento em energia solar. Então, o investimento foi comparado com poupança e um investimento em tesouro direto com 9% ao ano.

É importante notar que, os dados para a economia acumulada ao longo dos 25 anos excluem o valor de mercado do sistema solar fotovoltaico. Ou seja, na prática, após esses 25 anos, ainda seria possível vender o sistema para outro comprador, pois a vida útil dos painéis é de até 40 anos. Além disso, o investimento em um fundo ou qualquer outro que apresente altos rendimentos anuais, como ações na bolsa de valores, estarão sujeitos a cobrança de impostos ou outros encargos. Tais impostos não foram considerados nessa conta, o que diminuiria significativamente o rendimento do investimento.

Mesmo com essas considerações, é possível perceber que o investimento no sistema apresentou alto desempenho, trazendo retorno financeiro superior às outras alternativas de investimento, como pode ser visto na Tabela 8 abaixo, de até R\$ 2,2 milhões:

Tabela 8: Comparação ano a ano do balanço econômico entre o investimento no sistema solar fotovoltaico, na poupança e em um fundo de investimento com retorno bruto de 9% a.a.

| ANO | ECONOMIA ACUMULADA | POPUANÇA         | FUNDO DE INVESTIMENTO (9% a.a) |
|-----|--------------------|------------------|--------------------------------|
| 1   | -R\$ 417.211,29    | R\$ 519.000,00   | R\$ 519.000,00                 |
| 2   | -R\$ 305.624,72    | R\$ 553.254,00   | R\$ 565.710,00                 |
| 3   | -R\$ 183.341,32    | R\$ 589.768,76   | R\$ 616.623,90                 |
| 4   | -R\$ 51.906,26     | R\$ 628.693,50   | R\$ 672.120,05                 |
| 5   | R\$ 89.338,49      | R\$ 670.187,27   | R\$ 732.610,86                 |
| 6   | R\$ 236.743,80     | R\$ 714.419,63   | R\$ 798.545,83                 |
| 7   | R\$ 390.569,19     | R\$ 761.571,33   | R\$ 870.414,96                 |
| 8   | R\$ 551.085,09     | R\$ 811.835,04   | R\$ 948.752,30                 |
| 9   | R\$ 718.573,35     | R\$ 865.416,15   | R\$ 1.034.140,01               |
| 10  | R\$ 893.327,68     | R\$ 922.533,62   | R\$ 1.127.212,61               |
| 11  | R\$ 1.075.654,16   | R\$ 983.420,83   | R\$ 1.228.661,75               |
| 12  | R\$ 1.265.871,76   | R\$ 1.048.326,61 | R\$ 1.339.241,30               |
| 13  | R\$ 1.464.312,91   | R\$ 1.117.516,17 | R\$ 1.459.773,02               |
| 14  | R\$ 1.671.324,02   | R\$ 1.191.272,23 | R\$ 1.591.152,59               |
| 15  | R\$ 1.887.266,10   | R\$ 1.269.896,20 | R\$ 1.734.356,33               |
| 16  | R\$ 2.112.515,35   | R\$ 1.353.709,35 | R\$ 1.890.448,40               |
| 17  | R\$ 2.347.463,86   | R\$ 1.443.054,17 | R\$ 2.060.588,75               |
| 18  | R\$ 2.592.520,21   | R\$ 1.538.295,74 | R\$ 2.246.041,74               |
| 19  | R\$ 2.848.110,17   | R\$ 1.639.823,26 | R\$ 2.448.185,50               |
| 20  | R\$ 3.114.677,49   | R\$ 1.748.051,59 | R\$ 2.668.522,19               |
| 21  | R\$ 3.392.684,58   | R\$ 1.863.423,00 | R\$ 2.908.689,19               |
| 22  | R\$ 3.682.613,34   | R\$ 1.986.408,92 | R\$ 3.170.471,22               |
| 23  | R\$ 3.984.965,98   | R\$ 2.117.511,91 | R\$ 3.455.813,62               |
| 24  | R\$ 4.300.265,84   | R\$ 2.257.267,69 | R\$ 3.766.836,85               |
| 25  | R\$ 4.629.058,34   | R\$ 2.406.247,36 | R\$ 4.105.852,17               |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Portanto, com o saldo do investimento no sistema solar fotovoltaico quase R\$ 500.000,00 maior que no fundo de investimento, pode concluir que seria a melhor opção para empresa, dentre as alternativas apresentadas.

## 6. CONCLUSÃO

O trabalho desenvolvido possibilitou construir, com sucesso, o dimensionamento de um sistema fotovoltaico conectado à rede, conforme os objetivos estabelecidos. Dessa forma, foi verificado que existe disponibilidade para instalação do sistema e as condições são muito favoráveis na região de instalação. Assim, a aplicação do sistema fotovoltaico, atende satisfatoriamente às exigências propostas. A orientação dos telhados, a irradiação elevada presente em Fortaleza, o vento que favorece o resfriamento dos componentes e a falta de sombreamento adjacente foram fatores positivos para o aproveitamento da energia solar.

A potência utilizada para suprir metade da demanda da empresa por energia elétrica foi coberta usando menos da metade do telhado disponível. Apesar do investimento inicial elevado de quase R\$ 520.000,00, a análise econômica do projeto do sistema indicou que o tempo de retorno para o investimento necessário à sua instalação se daria entre o 4º e o 5º ano após a implantação.

Assim, é possível concluir que o investimento tornará a empresa mais financeiramente sustentável e proporcionará uma oportunidade de contribuir também com o meio ambiente, devido à redução da quantidade de poluentes que seriam inseridos na atmosfera, caso a energia consumida continuasse proveniente de combustíveis poluentes. Além disso, o cliente tem a oportunidade de utilizar-se desse cuidado com o meio ambiente para encantar e conquistar novos clientes.

Como sugestão para trabalhos futuros, é possível mencionar o desenvolvimento do projeto elétrico, pois assim, o projeto já poderia ser aceito na concessionária de energia elétrica.

## BIBLIOGRAFIA

- ASM Latin. (5 de Fevereiro de 2018). *Energia elétrica no Brasil em 2018: Panorama*. Acesso em 10 de Maio de 2018, disponível em Site da ASM Latin: <http://www.asmlatin.com/2018/02/energia-eletrica-no-brasil-em-2018-panorama/>
- Blue Sol. (23 de Fevereiro de 2017). *Célula Fotovoltaica – O Guia Técnico Absolutamente Completo*. Acesso em 20 de Maio de 2018, disponível em Site do Blue Sol: <http://blog.bluesol.com.br/celula-fotovoltaica-guia-completo/>
- Enel X. (15 de Fevereiro de 2016). *Tudo sobre energia solar: Medidor*. Acesso em 25 de Maio de 2018, disponível em Site da Enel X: <https://www.enelx.com.br/blog/2016/02/tudo-sobre-energia-solar-parte-3-medidor/>
- Fadigas, E. F. (2016). *Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos, Conversão e Viabilidade técnico-econômica*. Grupo de Energia da USP, 7.
- Felipe, A. (19 de Janeiro de 2018). *Entenda o que é Fator de Dimensionamento de Inversor*. Fonte: Site do Projeto Fotovolt: <https://projctofotovolt.com.br/blog/entenda-o-que-e-fator-de-dimensionamento-de-inversor/>
- First Solar. (20 de Março de 2017). *First Solar hails California sun*. Acesso em 20 de Maio de 2018, disponível em Renew: <http://renews.biz/106349/first-solar-hails-california-sun/>
- Gomes, F. V. (2017). *Quadro de distribuição pode garantir a segurança do circuito elétrico*. Acesso em 20 de Maio de 2018, disponível em Site da AECweb: [https://www.aecweb.com.br/cont/m/rev/quadro-de-distribuicao-pode-garantir-a-seguranca-do-circuito-eletrico\\_9209\\_0\\_1](https://www.aecweb.com.br/cont/m/rev/quadro-de-distribuicao-pode-garantir-a-seguranca-do-circuito-eletrico_9209_0_1)
- International Electrotechnical Commission. (9 de Junho de 2018). *IEC - Strategic importance of electrification*. Acesso em 10 de Maio de 2018, disponível em Site da International Electrotechnical Commission (IEC): <http://www.iec.ch/smartenergy/importance/>

- Krinat Solar. (4 de Outubro de 2017). *Ligações Série e Paralelo entre os módulos*. Acesso em 20 de Maio de 2018, disponível em Site da Krinat Solar: <https://krinatsolar.com.br/ligacoes-serie-e-paralelo-entre-os-modulos/>
- Lacroix, M. A. (21 de Junho de 2013). Uso de células fotovoltaicas de filmes finos para geração de energia elétrica em edifícios urbanos: estimativa de potencial.
- Ministério de Minas e Energia. (19 de maio de 2017). Acesso em 10 de Maio de 2018, disponível em Site do Ministério de Minas e Energia: [http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticias/-/asset\\_publisher/32hLrOzMKwWb/content/renovaveis-devemmanter-participacao-de-43-na-matriz-energetica-em-2017](http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticias/-/asset_publisher/32hLrOzMKwWb/content/renovaveis-devemmanter-participacao-de-43-na-matriz-energetica-em-2017)
- NeoSolar. (2018). *SISTEMAS ISOLADOS – OFF-GRID*. Acesso em 20 de Maio de 2018, disponível em Site da NeoSolar: <https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/sistemas-isolados-off-grid/>
- PagueVerde. (4 de Abril de 2017). *Como transformar energia solar em energia elétrica?* Acesso em 15 de Maio de 2018, disponível em Site da PagueVerde: <http://www.pagueverde.eco.br/index.php/2016/04/25/como-transformar-energia-solar-em-energia-eletrica/>
- Secretaria Municipal de Urbanismo e Meio Ambiente. (Agosto de 2017). *PARCELAMENTO, USO E OCUPAÇÃO DO SOLO*. Fortaleza, Ceará, Brasil.
- SunPower. (25 de Outubro de 2017). *What is Solar Energy and How Do Solar Panels Work?* Acesso em 15 de Maio de 2018, disponível em Site da SunPower: <https://us.sunpower.com/blog/2017/10/25/how-does-solar-energy-work/>
- Trina Solar. (5 de Maio de 2017). Trina Solar anuncia novo recorde de eficiência de 24,13% para célula solar de silício monocristalino IBC. *Publicação de PR Newswire*. Changzhou, China.
- U.S. Naval Observatory. (18 de Janeiro de 2008). *Equinoxes, Solstices, Perihelion, and Aphelion*. Acesso em 15 de Maio de 2018, disponível em Site da U.S. Naval Observatory: <http://aa.usno.navy.mil/data/docs/EarthSeasons.php>

Zanlorenssi, G. (6 de Outubro de 2017). *A trajetória das tarifas de energia nos últimos 14 anos*. Fonte: Site do Nexo Jornal: <https://www.nexojornal.com.br/grafico/2017/10/06/A-trajet%C3%B3ria-das-tarifas-de-energia-nos-%C3%BAltimos-14-anos>

# APÊNDICE A: ESPECIFICAÇÕES DO PAINEL SUNLIGHT SL - 275P – 18/BB

## SUNLIGHT ULTRA

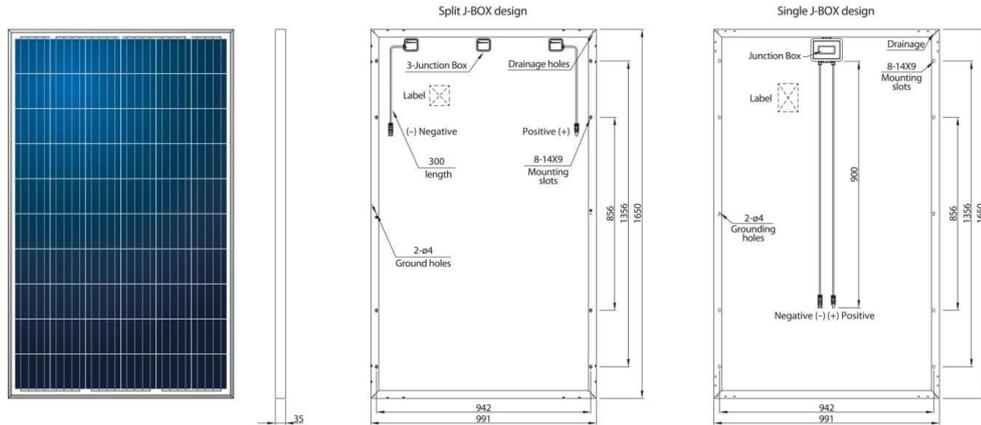
SL - 250P - 18/BB  
SL - 275P - 18/BB

• CÉLULAS MAIS EFICIENTES  
• MÁXIMO RENDIMENTO MESMO EM ESPAÇOS PEQUENOS





AV JOSÉ SOARES DE OLIVEIRA, 650 DISTRITO INDUSTRIAL  
CITY: SÃO GONÇALO DO AMARANTE STATE: CEARÁ  
CEP: 62.670-000 | [WWW.SUNLIGHTBRASIL.COM](http://WWW.SUNLIGHTBRASIL.COM)



Customized cable length available upon request

### ELECTRICAL PARAMETERS

| TYPE  | SL-250W                            | SL-255W    | SL-260W | SL-265W | SL-270W | SL-275W |       |
|---|------------------------------------|------------|---------|---------|---------|---------|-------|
| <b>STC</b><br>AM 1.5,<br>1000W/m <sup>2</sup> ,<br>Module<br>Temperature<br>25°C                      | Rated Max. Power at STC (W)        | 250        | 255     | 260     | 265     | 270     | 275   |
|   | Max. Power Voltage / Vmp (V)       | 29.98      | 30.25   | 30.51   | 30.71   | 30.82   | 30.94 |
|   | Max. Power Current / Imp (A)       | 8.34       | 8.43    | 8.52    | 8.63    | 8.76    | 8.89  |
|   | Open Circuit Voltage / Voc (V)     | 37.41      | 37.54   | 37.65   | 37.81   | 37.88   | 38.17 |
|   | Short Circuit Current / Isc (A)    | 8.79       | 8.94    | 9.09    | 9.24    | 9.38    | 9.48  |
|   | Module Efficiency (%)              | 15.28      | 15.59   | 15.90   | 16.20   | 16.51   | 16.81 |
| <b>NOCT</b><br>AM 1.5,<br>800W/m <sup>2</sup> ,<br>Ambient<br>Temperature<br>20°C, Wind<br>Speed 1m/s | Rated Max. Power at NOCT (W)       | 180.4      | 184.1   | 187.5   | 191.0   | 195.0   | 198.5 |
|   | Max. Power Voltage / Vmp (V)       | 27.70      | 27.80   | 27.90   | 28.00   | 28.10   | 28.20 |
|   | Max. Power Current / Imp (A)       | 6.51       | 6.62    | 6.72    | 6.82    | 6.94    | 7.04  |
|   | Open Circuit Voltage / Voc (V)     | 34.10      | 34.20   | 34.30   | 34.45   | 34.50   | 34.60 |
|   | Short Circuit Current / Isc (A)    | 7.11       | 7.23    | 7.35    | 7.47    | 7.57    | 7.69  |
|   | Module Efficiency (%)              | 13.79      | 14.07   | 14.33   | 14.60   | 14.90   | 15.17 |
|   | Temperature Coefficient of Pm      | -0.41%/°C  |         |         |         |         |       |
|   | Temperature Coefficient of Voc     | -0.327%/°C |         |         |         |         |       |
|   | Temperature Coefficient of Isc     | +0.064%/°C |         |         |         |         |       |
|   | Nominal Operating Cell Temperature | 45°C±3°C   |         |         |         |         |       |
|   | Output Tolerance                   | 0-5W       |         |         |         |         |       |

### PARAMETERS

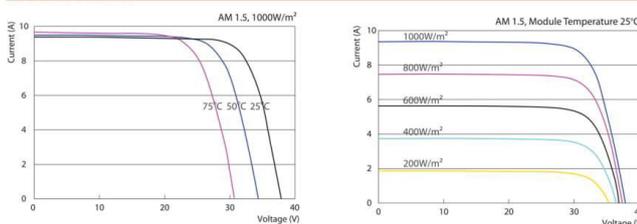
|   |  |
|---|--|
| Cell (mm)                                   | 156x156 Poly                               |
| Weight (kg)                                 | 18.6                                       |
| Dimensions (LxWxH) (mm)                     | 1650x991x35                                |
| Cable Cross Section Size (mm <sup>2</sup> ) | 4  |
| No. of Cells and Connections                | 60(6x10)                                   |
| No. of Diodes                               | 3  |
| Max. System Voltage                         | 1000V/1500V                                |
| Max. Series Fuse                            | 15 A                                       |
| Max. Wind Load / Max. Snow Load             | 4200Pa / 6000Pa                            |
| Hail Test                                   | 45mm diameter ice-ball<br>30.7m/s velocity |

### PRODUCT STANDARD

|  |                                  |
|--|----------------------------------|
| Product Performance                              | IEC61215                         |
| Product Safety                                   | IEC61730                         |
| Anti-PID & Salt Mist & Ammonia Corrosion Testing | IEC62804<br>IEC61701<br>IEC62716 |

PID FREE

### 270W CURVES



### LINEAR WARRANTY

Free from defects of materials and workmanship for  
**10 YEARS**

