

## **A ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E A APLICAÇÃO NA USINA SOLAR DE TAUÁ.**

Bruno Boaventura Beigelman

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos à obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Sebastião Ércules Melo de Oliveira, D.Sc.

Rio de Janeiro

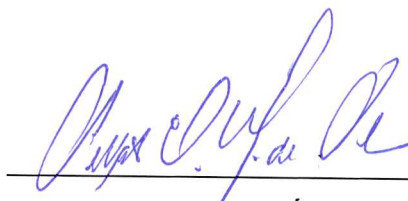
Agosto de 2013

**A ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E A APLICAÇÃO  
NA USINA SOLAR DE TAUÁ.**

Bruno Boaventura Beigelman

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE  
ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO  
RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO  
DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA

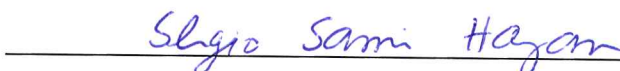
Examinado por:



Sebastião Ércules Melo de Oliveira, D.Sc.  
(Orientador)



Antonio Sérgio Corrado, Eng. Eletricista.  
(Co-Orientador)



Sergio Sami Hazan, Ph.D.  
(Examinador)

Rio de Janeiro, RJ – Brasil.

Agosto de 2013

Beigelman, Bruno Boaventura

A Energia Solar Fotovoltaica e a Aplicação na Usina Solar de Tauá/ Bruno Boaventura Beigelman. – Rio de Janeiro: UFRJ / Escola Politécnica, 2013.

xiii, 61 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Sebastião Ércules Melo de Oliveira.

Projeto de Graduação – UFRJ / Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Elétrica, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 60-61.

1. Efeito Fotovoltaico. 2. Energia Solar Fotovoltaica. 3. Usina Solar de Tauá. I. Oliveira, Sebastião Ércules Melo de. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Elétrica. III. Título.

## Agradecimentos

Gostaria de agradecer primeiramente aos meus pais, Ricardo Campos Beigelman e Iracema Maria Corrêa Boaventura, pelo amor incondicional e confiança depositada em mim.

Ao meu pai, pois sempre se esforçou para me disponibilizar as ferramentas necessárias para construir tudo aquilo o que eu almejo. Sempre me incentivou a buscar os meus objetivos, com honestidade, sabedoria e força de vontade, para que eu pudesse atingir a vitória passo a passo. À minha mãe, pois me doutrinou com muito carinho e desde cedo me ensinou a ter disciplina e a conciliar o meu tempo de estudo com o tempo de lazer, de forma a obter a combinação mais produtiva possível. Se hoje estou completando esta etapa e traçando o meu futuro, devo agradecer muito pela confiança deles em meu potencial, já que não seria possível ter traçado esta trajetória sem o apoio que me concederam.

Um agradecimento especial à minha avó, Maria Helena Campos Beigelman, que me motivava a cada vez que se referia a mim com tom de orgulho. Apesar de não estar mais entre nós, estará sempre em meu coração e guardo com muito carinho seus ensinamentos, fundamentais para a minha formação. Sempre foi e sempre será uma grande fonte de inspiração para mim.

Agradeço ao meu tio e padrinho Dirceu Boaventura que sempre me apoiou em todos os momentos que precisei, sempre elogiou o meu modo de conduzir a vida, servindo como grande motivação para que eu seguisse em frente.

Agradeço a todos os meus familiares, tios e tias, primos e primas, e em grande parte aos meus grandes amigos que ao longo dessa etapa estiveram sempre do meu lado, me dando suporte para que eu pudesse vencer cada uma das minhas batalhas.

Ao meu co-orientador, Antonio Sérgio Corrado, que me ajudou na obtenção das informações e detalhamento do projeto e que, sempre atencioso, dedicou parte do seu valioso tempo a me ajudar para que eu pudesse obter o maior êxito possível.

Ao professor e orientador, Sebastião Ércules Melo de Oliveira, por confiar em mim para a realização deste trabalho e pelos ensinamentos passados em aula. Agradeço ainda a todos os professores da UFRJ que contribuíram para a minha formação.

**Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.**

A Energia Solar Fotovoltaica e a Aplicação na Usina Solar de Tauá

Bruno Boaventura Beigelman

Agosto 2013

Orientador: Sebastião Ércules Melo de Oliveira

Curso: Engenharia Elétrica

Energia solar fotovoltaica é a energia obtida através da conversão da radiação solar em eletricidade pelo intermédio de materiais semicondutores, em um fenômeno conhecido como efeito fotovoltaico.

A experiência com a energia solar fotovoltaica no Brasil até hoje ocorreu por meio da instalação de pequenas unidades produtoras, com o objetivo de fornecer energia para regiões isoladas do Sistema Interligado Nacional (SIN). A MPX, empresa de energia do grupo EBX, projetou a primeira usina solar em escala comercial da América Latina, chamada de Usina Solar de Tauá. Esta usina tem uma potência nominal de 1 MW e está localizada no município de Tauá, no estado do Ceará.

Diante da necessidade da inserção do uso de energias renováveis no cenário mundial, o principal objetivo deste projeto é fornecer uma visão ampla acerca das características do processo de geração de energia elétrica a partir da energia solar fotovoltaica, bem como de sua aplicação na Usina Solar de Tauá, para que o Brasil intensifique a sua participação na corrida mundial por um mercado competitivo de energia complementar.

Palavras Chave: Efeito Fotovoltaico, Energia Solar Fotovoltaica, Usina Solar de Tauá.

**Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Electrical Engineer.**

Photovoltaic Solar Energy and Application in Tauá Solar Power Plant

Bruno Boaventura Beigelman

August 2013

Advisor: Sebastião Ércules Melo de Oliveira

Course: Electrical Engineering

Photovoltaic solar energy is the energy obtained through the conversion of solar radiation into electricity by means of semiconductor materials, in a phenomenon known as photovoltaic effect.

The experience with photovoltaic solar energy in Brazil today occurred through the installation of small production units, in order to supply power to regions isolated from National Interconnected System (SIN). MPX, the energy company of the EBX Group, designed the first solar power plant in commercial scale in Latin America, called Tauá Solar Power Plant, which has a nominal power of 1 MW and is located in the city of Tauá, in the state of Ceará.

Faced with the need to insert the use of renewable energy on the world scene, the main objective of this project is to provide a broad understanding about the characteristics of the generating of electrical energy from the photovoltaic solar energy process, as well as its application in Tauá Solar Power Plant, for Brazil to intensify its participation in the global race for a competitive market of complementary energy.

Keywords: Photovoltaic effect, Photovoltaic Solar Energy, Tauá Solar Power Plant.

# Sumário

Lista de Figuras .....	ix
Lista de Siglas e Abreviações .....	xii
1    Introdução e Objetivos.....	1
1.1   Introdução .....	1
1.2   Objetivos .....	2
2    Energia Solar Fotovoltaica .....	3
2.1   O Efeito Fotovoltaico.....	4
2.2   A Célula Fotovoltaica .....	7
2.2.1   Célula de Silício Monocristalino .....	7
2.2.2   Célula de Silício Policristalino .....	9
2.2.3   Célula de Silício Amorfo .....	10
2.3   Módulos Fotovoltaicos.....	11
2.3.1   Conexão em Paralelo .....	11
2.3.2   Conexão em Série .....	12
2.3.3   Características Elétricas do Módulo .....	12
2.4   Inversores .....	17
2.5   Energia Solar no Mundo Atual .....	19
3    Usina Solar de Tauá (1MW).....	21
3.1   Introdução .....	21
3.2   Localização da Usina .....	23
3.3   Estruturação do Projeto.....	26
3.3.1   Diagrama Unifilar.....	28
3.3.2   Painéis Solares .....	30
3.3.3   String Control Boxes (Caixas de Controle).....	33

3.3.4	Inversores.....	35
3.3.5	QGBT (Quadro Geral de Baixa Tensão) .....	38
3.3.6	Transformador Elevador .....	40
3.3.7	Cubículo de Média Tensão .....	42
3.3.8	Disposição dos Equipamentos .....	44
3.4	Regime de Operação da Usina .....	47
4	Futuras Expansões .....	51
4.1	Expansão para + 1MW (2º MW) .....	51
4.2	Expansão para 50 MW .....	56
5	Conclusão .....	58
6	Bibliografia .....	60

## Lista de Figuras

Figura 2.1 - Bandas de condução e valência em materiais condutores, semicondutores e isolantes.....	4
Figura 2.2 - Corte transversal de uma célula fotoelétrica mostrando a junção PN [3].....	5
Figura 2.3 - Exemplo de uma célula solar fotovoltaica [5] .....	7
Figura 2.4 - Célula solar fotovoltaica de silício monocristalino [6].....	8
Figura 2.5 - Célula solar fotovoltaica de silício policristalino [7].....	9
Figura 2.6 - Painel fotovoltaico a partir de células de silício amorfo [8] .....	10
Figura 2.7 - Conexão de células fotovoltaicas em paralelo .....	11
Figura 2.8 - Conexão de células fotovoltaicas em série .....	12
Figura 2.9 - Curva Característica $I \times V$ típica de uma célula de silício monocristalino [2] .....	13
Figura 2.10 - Curva $P \times V$ típica para uma célula de silício monocristalino [2] .....	14
Figura 2.11 - Parâmetros de Potência Máxima [2].....	14
Figura 2.12 - Efeito causado na curva $V \times I$ pela variação da Intensidade Luminosa [2].....	15
Figura 2.13 - Efeito causado na curva $V \times I$ pela variação da temperatura na célula .....	16
Figura 2.14 - Principais recursos presentes nos inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica [10].....	17
Figura 2.15 - Evolução da capacidade instalada de energia solar no mundo em MW ao longo dos últimos anos [11] .....	19
Figura 2.16 - Capacidade instalada de energia solar em 2011, dividida pelos países nos quais se encontram [11].....	20
Figura 3.1 - Vista geral da Usina Solar de Tauá (1 MW).....	21
Figura 3.2 - Localização do município de Tauá em território nacional .....	23
Figura 3.3 - Fontes Normais Climatológicas do INMET, referentes ao município de Tauá [13] .....	24
Figura 3.4 - Características geográficas e área limite do terreno do empreendimento [12].....	25
Figura 3.5 - Princípio de funcionamento da energia solar fotovoltaica e principais equipamentos utilizados [12] .....	26
Figura 3.6 - Fluxo de geração de energia dentro da Usina Solar de Tauá.....	27
Figura 3.7 - Diagrama Unifilar Geral da Usina Solar de Tauá.....	28

Figura 3.8 - Pannel solar fotovoltaico da fabricante Kyocera - Modelo: KD215GW-2PU [14]	30
Figura 3.9 - Características técnicas do pannel fotovoltaico Kyocera [14].....	31
Figura 3.10 - Caixa de Controle e Monitoramento ( <i>String Control Box</i> ) da fabricante Ingeteam [15] .....	33
Figura 3.11 - Especificação técnica da Caixa de Controle - String Control Box [15] .....	34
Figura 3.12 - Inversor Ingecon Sun 100 TL, da fabricante INGETEAM .....	35
Figura 3.13 - Características técnicas do Inversor Ingecon Sun 100 TL [16] .....	36
Figura 3.14 - Representação do quadro geral de baixa tensão no diagrama unifilar.....	38
Figura 3.15 - Características Gerais do Quadro Geral de Baixa Tensão (QGBT) .....	39
Figura 3.16 - Quadro Geral de Baixa Tensão (QGBT) instalado na usina.....	39
Figura 3.17 - Placa de dados com as características elétricas do transformador elevador .....	40
Figura 3.18 - Transformador Elevador ZILMER - 1250 kVA - 220 V / 13,8 kV .....	41
Figura 3.19 - Características elétricas do Disjuntor, TC's e TP's, presentes no cubículo de MT	42
Figura 3.20 - Características elétricas da Chave Seccionadora e do Medidor Digital .....	42
Figura 3.21 - Cubículo de Média Tensão da fabricante EFACEC, montado pela INGETEAM	43
Figura 3.22 - Disposição das três edificações presentes no site .....	44
Figura 3.23 - Local de instalação das String Control Boxes .....	44
Figura 3.24 - Planta baixa da Sala dos Inversores e Transformador .....	45
Figura 3.25 - Vista em corte da Sala dos Inversores apresentando em detalhe os equipamentos instalados.....	45
Figura 3.26 - Sala dos Inversores, Transformador Elevador e Poste para o escoamento da potência gerada .....	46
Figura 3.27 - Gráfico típico da potência gerada na usina em kWp pela hora do dia.....	47
Figura 3.28 - Geração de Energia Líquida e Projetada de Julho/2011 até Setembro/2012 .....	49
Figura 3.29 - Fator de Capacidade Real em relação ao Projetado.....	50
Figura 4.1 - Localização da área aproximada onde será instalado o 2º MW da Usina Solar de Tauá.....	51
Figura 4.2 - Pannel Solar de Filme Fino (GE-CIGS150) e suas principais características elétricas e mecânicas [18] .....	52

Figura 4.3 - Inversor GE - 1.000 kW e suas principais características técnicas [19] .....	53
Figura 4.4 - <i>Array Combiner Box</i> da Fabricante GE e suas principais características técnicas [20] .....	54
Figura 4.5 - Tabela comparativa com as principais características do 1º MW e do 2º MW ....	54
Figura 4.6 - Área ocupada pela Usina Solar Tauá por etapas de sua expansão para até 50 MW .....	56

## Lista de Siglas e Abreviações

<b>A</b>	Ampère
<b>AM</b>	Massa de Ar*
<b>ANEEL</b>	Agencia Nacional de Energia Elétrica
<b>APAC</b>	<i>Asia Pacific</i>
<b>BIN</b>	Banco Interamericano de Desenvolvimento
<b>CA</b>	Corrente Alternada
<b>CC</b>	Corrente Contínua
<b>Chesf</b>	Companhia Hidro Elétrica do São Francisco
<b>CIGS</b>	Selenato de Cobre Gálio Índio
<b>COELCE</b>	Companhia Energética do Ceará
<b>EPIA</b>	<i>European Photovoltaic Industry Association</i>
<b>eV</b>	elétron Volts
<b>EVA</b>	Etil Vinil Acetato
<b>FC</b>	Fator de Capacidade
<b>FP</b>	Fator de Potência
<b>GWh</b>	Gigawatt hora
<b>h</b>	Hora
<b>IEA</b>	Agencia Internacional de Energia*
<b>IGBT</b>	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
<b>I<sub>MP</sub></b>	Corrente de Máxima Potência
<b>INMET</b>	Instituto Nacional de Meteorologia
<b>I<sub>sc</sub></b>	Corrente de Curto Circuito
<b>km</b>	Quilômetros
<b>kV</b>	KiloVolt
<b>kWh</b>	Kilowatt hora
<b>kWp</b>	Kilowatt pico
<b>LI</b>	Licença de Instalação
<b>LP</b>	Licença Prévia
<b>LT</b>	Linha de Transmissão
<b>m</b>	Metro
<b>MEA</b>	<i>Middle East and Africa</i>
<b>mm</b>	Milímetro
<b>MPPT</b>	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
<b>MT</b>	Média Tensão
<b>MW</b>	Megawatt
<b>MWp</b>	Megawatt de pico
<b>°C</b>	Graus Celsius
<b>OMM</b>	Organização Meteorológica Mundial
<b>ONAN</b>	Óleo Natural Ar Natural

<b>PET</b>	Politereftalato de etileno
<b>P<sub>M</sub></b>	Potência Máxima
<b>QGBT</b>	Quadro Geral de Baixa Tensão
<b>ROW</b>	<i>Rest Of World</i>
<b>SC</b>	<i>String Control Box</i>
<b>SCR</b>	Retificador Controlado de Silício*
<b>SE</b>	Subestação
<b>SEMACE</b>	Superintendência Estadual do Meio Ambiente do Ceará
<b>SF<sub>6</sub></b>	Hexafluoreto de Enxofre
<b>SIN</b>	Sistema Interligado Nacional
<b>STC</b>	<i>Standard Test Conditions</i>
<b>TC</b>	Transformador de Corrente
<b>TP</b>	Transformador de Potencial
<b>UECE</b>	Universidade Estadual do Ceará
<b>V</b>	Volts
<b>V<sub>MP</sub></b>	Tensão de Máxima Potência
<b>V<sub>OC</sub></b>	Tensão de Circuito Aberto
<b>W</b>	Watt
<b>Wp</b>	Watt de pico
<b>*</b>	Tradução da Sigla em Português

# **1 Introdução e Objetivos**

## **1.1 Introdução**

A geração solar compõe o grupo das energias complementares, ao lado das usinas eólicas, usinas à biomassa, geotérmicas e maremotriz. Este grupo deverá ganhar maior participação na matriz energética mundial nas próximas décadas, visto que contribui para um futuro de geração sustentável e que oferece menos impactos ao meio ambiente.

A conversão direta da energia solar em energia elétrica ocorre através da conversão de energia luminosa, radiação solar emitida pelo sol, em eletricidade, por intermédio de materiais semicondutores. Este fenômeno é conhecido como efeito fotovoltaico.

A experiência com a energia solar fotovoltaica no Brasil ocorreu, até hoje, por meio da instalação de pequenas unidades produtoras, com o objetivo de fornecer energia para regiões isoladas do Sistema Interligado Nacional.

Neste cenário, a MPX, empresa de energia do grupo EBX, projetou a primeira usina solar em escala comercial da América Latina, chamada de Usina Solar de Tauá, instalada no município de Tauá, no estado do Ceará, a 360 quilômetros da capital Fortaleza.

Trata-se de um projeto pioneiro que está atualmente em operação. Possui uma potência instalada de aproximadamente 1MWp, contando com a presença de 4.860 painéis solares, passível de expansão para até 50 MWp. A usina é diretamente conectada ao sistema elétrico através de uma rede de 13,8 kV conectada à Subestação de Tauá (69 kV/ 13,8 kV), pertencente à concessionária de distribuição de energia do estado do Ceará (COELCE).

A usina utiliza uma área de 12 mil metros quadrados para a sua instalação e é capaz de gerar energia suficiente para abastecer 1.500 residências, produzindo cerca de 1,56 GWh por ano.

## 1.2 Objetivos

As fontes renováveis de energia têm, como um todo, despertado o interesse da sociedade em todos os continentes do planeta. O constante crescimento do número de habitantes e o consumo intensivo de combustíveis fósseis ressaltam a preocupação com a sua natureza finita. Este fato serve como fonte inspiradora para que se busquem novos meios de geração de energia que exerçam menor agressão ao ambiente em que vivemos.

A procura por um modelo de produção de energia baseado no desenvolvimento sustentável em longo prazo tem motivado o interesse crescente por alternativas de energia mais limpas e renováveis, buscando a satisfação das condições energéticas sem alterar de maneira acentuada as condições de vida no planeta.

Apesar dos custos de uma tecnologia mais cara, quando comparada a outras fontes de energia renovável, a geração solar fotovoltaica emite sinais nítidos de viabilidade, com uma queda de quase à metade de seus custos de produção nos últimos dez anos.

É importante uma maior participação da energia solar fotovoltaica na matriz energética brasileira para intensificar a participação do Brasil na corrida mundial por um mercado competitivo de energia complementar, contribuindo para o futuro do país no que diz respeito às fontes de energia sustentáveis.

Este projeto tem como objetivo, portanto, fornecer uma visão ampla acerca das características do processo da geração de energia solar fotovoltaica, bem como sua aplicação na Usina Solar de Tauá, que é a única usina a ter geração fotovoltaica em escala comercial no Brasil e que já está em processo de expansão.

## 2 Energia Solar Fotovoltaica

A energia solar fotovoltaica é proveniente da conversão da radiação solar, energia radiante emitida pelo sol, em eletricidade. Para alcançar este objetivo são utilizados materiais semicondutores em um fenômeno conhecido como efeito fotovoltaico.

O efeito fotovoltaico consiste na criação de tensão ou corrente elétrica em um material, após a sua exposição à luz. Os elétrons são transferidos das bandas de valência para as bandas de condução do material após a exposição à radiação com energia suficiente para transferi-los.

Este efeito foi observado pela primeira vez em 1839 por Edmond Becquerel, quando o físico francês notou o aparecimento de uma tensão entre os eletrodos de uma solução condutora enquanto esta era iluminada pela luz solar. A primeira célula fotovoltaica foi construída em 1880 com uma eficiência na faixa de 2% e utilizava o selênio como material condutor.

Em 1954 a primeira célula fotovoltaica de silício de junção PN foi produzida no laboratório Bell nos Estados Unidos da América para a implementação de sistemas de alimentação de satélites. Com a crise mundial de energia de 1973/1974, surgiu a preocupação em estudar novas formas de geração de energia, fazendo com que a utilização de células fotovoltaicas fosse estudada e implantada no meio terrestre para o suprimento de energia elétrica.

A energia solar fotovoltaica é considerada uma tecnologia promissora. As células solares convertem diretamente a mais abundante forma de energia renovável, a energia solar, em eletricidade. Uma vez que o processo de geração é executado por dispositivos semicondutores, não há produção de resíduos ou gases tóxicos que possam alterar o equilíbrio do ecossistema [1].

Os sistemas implantados são modulares, de forma que os módulos especificados para a potência necessária de geração de energia elétrica podem ser rapidamente instalados. A ampliação da potência é obtida simplesmente pela adição de módulos. Nos países em desenvolvimento as aplicações ideais encontram-se em áreas isoladas e distantes das redes de distribuição de energia, sendo utilizados em sistemas de comunicação, refrigeração, processamento de alimentos, sinalização automática, entre outros.

## 2.1 O Efeito Fotovoltaico

O efeito fotovoltaico é o aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, esta diferença de potencial sendo produzida pela absorção da luz solar. O efeito fotovoltaico ocorre em dispositivos conhecidos como células fotovoltaicas que são componentes opto-eletrônicos capazes de converter diretamente a radiação solar em eletricidade. Estas células são constituídas de materiais semicondutores, tendo como o material mais empregado o silício [2].

O material semicondutor, material em que ocorre o efeito fotovoltaico, conduz eletricidade de forma mais efetiva que os isolantes e menos efetiva que os condutores. Este material se caracteriza pela presença de faixas de energia em que se permite a presença de elétrons, denominada banda de valência, e outra completamente vazia, denominada banda de condução. Entre estas duas bandas existe um gap, conhecido como faixa proibida ou intervalo de energia, que determina se o material é um condutor, semicondutor ou isolante.

Os materiais isolantes tem um intervalo de energia da ordem de 6 eV, enquanto os semicondutores apresentam um intervalo de energia da ordem de 1 eV. Deste modo, fótons com energia superior ao intervalo de energia do material são capazes de excitar elétrons da banda de valência para a banda de condução. A Figura 2.1 apresenta as bandas de condução e de valência, bem como a diferença entre os intervalos de energia nos materiais condutores, semicondutores e isolantes.

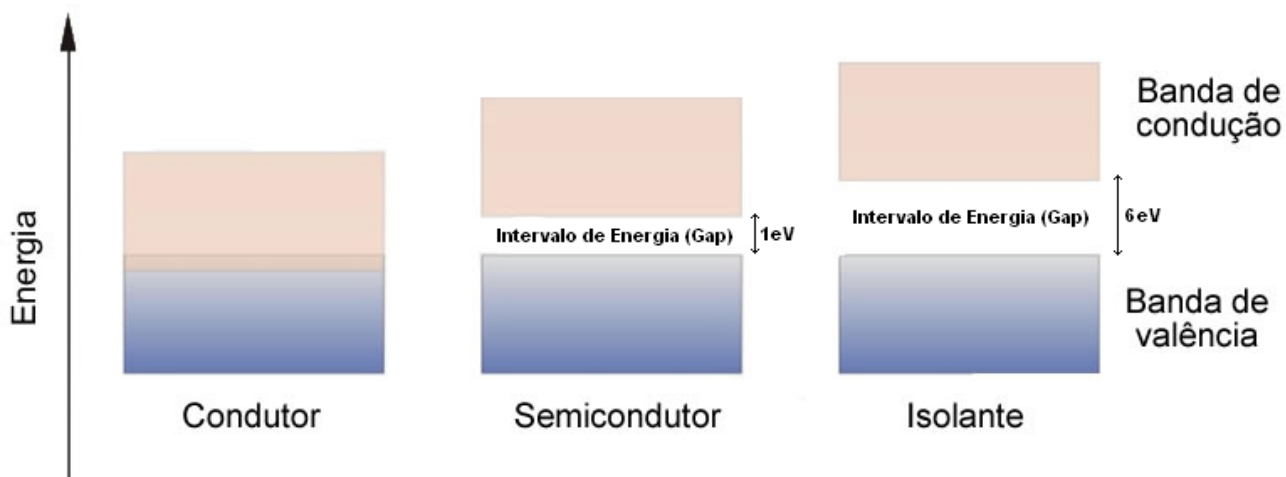


Figura 2.1 - Bandas de condução e valência em materiais condutores, semicondutores e isolantes

O material semicondutor mais utilizado para aplicações fotovoltaicas é o silício, seus átomos possuindo quatro elétrons que se ligam aos vizinhos formando uma rede cristalina. Adicionando-se um átomo de cinco elétrons de ligação como o fósforo, por exemplo, haverá um elétron “sobrando”, fracamente ligado ao seu átomo de origem. Deste modo o fósforo é um dopante doador de elétrons, um dopante N.

Ao adicionar-se um átomo com três elétrons de ligação como o boro, por exemplo, haverá uma “lacuna” e, com pouca energia térmica, um elétron pode passar de um sítio vizinho para esta posição, fazendo com que a “lacuna” se desloque. Deste modo o boro é um receptor de elétrons, um dopante P.

Partindo de um átomo de silício puro e introduzindo em uma metade átomos de boro e na outra metade átomos de fósforo, será formada uma junção denominada junção PN. Nesta junção, elétrons livres do lado N passam para as lacunas do lado P, ocasionando um acúmulo de elétrons do lado P e uma redução de elétrons do lado N. Isto torna o lado P negativamente carregado e o lado N eletricamente positivo. A Figura 2.2 mostra um corte transversal de uma célula fotovoltaica indicando as regiões tipo P, tipo N e a junção PN.

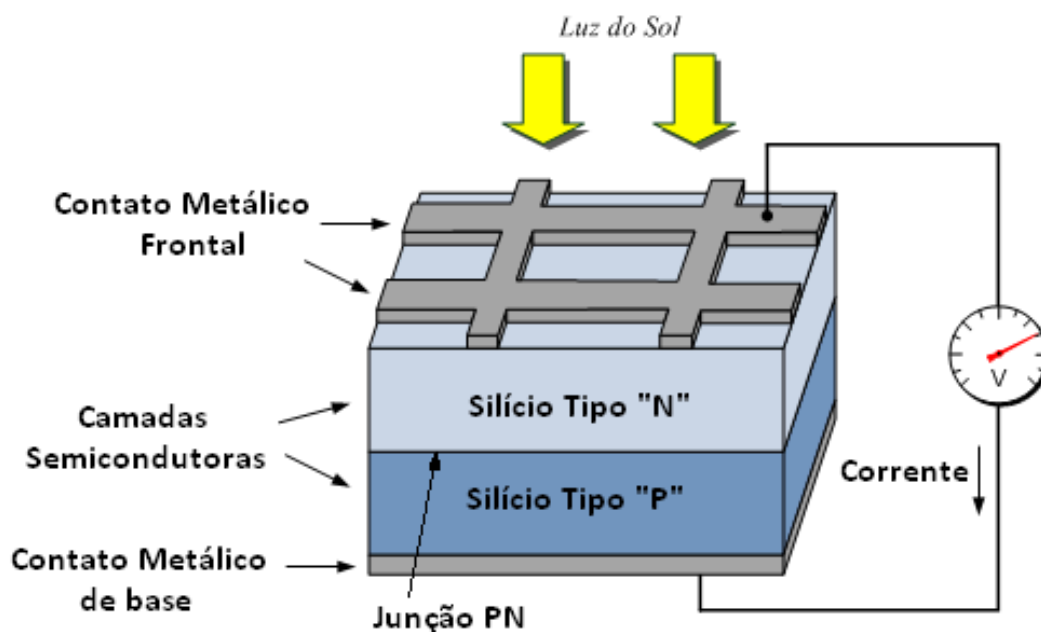


Figura 2.2 - Corte transversal de uma célula fotoelétrica mostrando a junção PN [3]

As cargas aprisionadas geram um campo elétrico que dificulta a passagem de mais elétrons do lado N para o lado P e o processo alcança um equilíbrio quando forma uma barreira capaz de barrar os elétrons que ainda restavam no lado N.

Quando a junção PN é exposta a fótons com energia maior que o gap, ocorre a geração de pares elétron/lacuna. Se isto ocorrer na região onde o campo elétrico é diferente de zero, as cargas serão aceleradas, gerando uma corrente através da junção. Este deslocamento de cargas dá origem a uma diferença de potencial neste processo denominado Efeito Fotovoltaico.

Quando se conecta um fio às duas extremidades do pedaço de silício, há circulação de elétrons. Este é o princípio de funcionamento das células fotovoltaicas.

## 2.2 A Célula Fotovoltaica

A célula fotovoltaica é um dispositivo elétrico de estado sólido que tem a capacidade de converter a luz diretamente em energia elétrica através do efeito fotoelétrico. Também pode ser chamada de célula solar. Os conjuntos de células solares utilizados na captura da energia da luz solar são conhecidos como painéis solares.

As primeiras células fotovoltaicas apresentavam baixo rendimento, em torno de 2%, e alto custo, em torno de U\$600,00/W. Hoje em dia apresentam um rendimento da ordem de 16%, com um custo médio de U\$6,00/W, cem vezes mais barato do que as primeiras células. Atualmente existem células com rendimento capaz de chegar até 28% fabricadas com arsenato de gálio, porém estas possuem alto custo, limitando sua produção [4].

As células mais utilizadas são as fabricadas a partir do silício e podem ser classificadas de acordo com a sua estrutura molecular: monocristalinas, policristalinas e silício amorfo. A Figura 2.3 mostra um exemplo de uma célula solar fotovoltaica.



Figura 2.3 - Exemplo de uma célula solar fotovoltaica [5]

### 2.2.1 Célula de Silício Monocristalino

A célula de silício monocristalino é a mais usada e comercializada, do ponto de vista histórico, como conversor de energia solar em eletricidade. A tecnologia para sua fabricação é bem constituída e trata-se de um processo básico.

Uma célula de silício começa a ser fabricada com a extração do cristal de dióxido de silício. Este material é desoxidado em grandes fornos, purificado e solidificado. O processo atinge um grau de pureza de 98 a 99%, razoavelmente eficiente do ponto de vista energético e custo. Para ser utilizado como célula fotovoltaica, este silício precisa de um grau de pureza mais elevado, da ordem de 99,9999%, bem como a utilização de outros materiais semicondutores.

O silício utilizado na indústria eletrônica deve ter, além do grau elevado de pureza, uma estrutura monocristalina e baixa densidade de defeitos na rede. O “Processo Czochralski” é o mais utilizado para se conseguir as qualificações desejadas.

O silício é fundido junto a uma pequena quantidade de dopante, geralmente o boro, do tipo P. Estando o fragmento de cristal devidamente orientado e sob rígido controle de temperatura, é extraído um grande cilindro de silício monocristalino, levemente dopado, do material fundido. Este cilindro é então cortado em fatias da ordem de 0,3 milímetros.

Após o corte e a limpeza de impurezas das fatias, deve-se introduzir impurezas do tipo N, de modo a se obter a junção PN. Este processo é feito através da difusão controlada, onde as fatias de silício são expostas a vapor de fósforo em um forno onde a temperatura varia de 800 a 1000°C.

As células monocristalinas são as que apresentam, em geral, a maior eficiência dentro das células fotovoltaicas feitas à base de silício. Atingem uma eficiência de 15 a 18% nas células obtidas a partir do processo acima citado. A Figura 2.4 apresenta uma célula fotovoltaica de silício monocristalino.

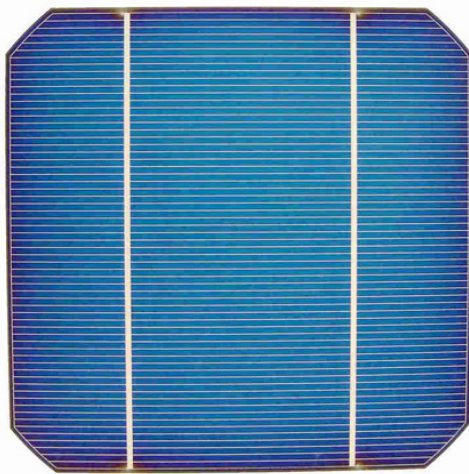


Figura 2.4 - Célula solar fotovoltaica de silício monocristalino [6]

### 2.2.2 Célula de Silício Policristalino

As células de silício policristalino, também conhecido como silício multicristalino, são mais baratas quando comparadas com às de silício monocristalino pelo fato de exigirem um processo menos rigoroso de preparação das células. A eficiência em contrapartida cai um pouco em comparação as células de silício monocristalino. A Figura 2.5 apresenta uma célula fotovoltaica de silício policristalino.

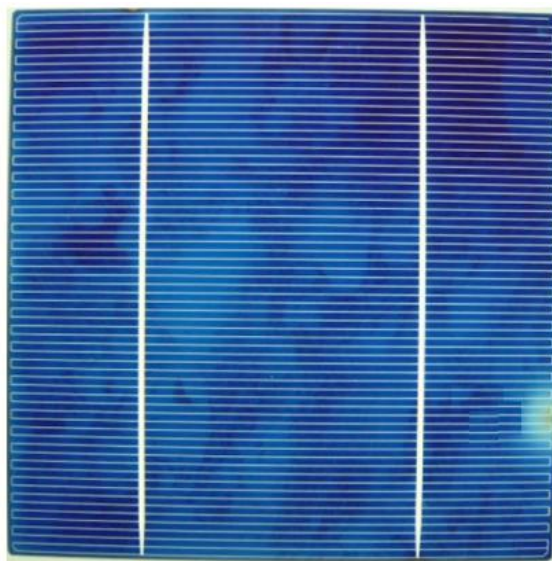


Figura 2.5 - Célula solar fotovoltaica de silício policristalino [7]

O processo de pureza adotado é similar ao do silício monocristalino, e as técnicas de fabricação das células são as mesmas, porém com menor rigor de controle.

As células podem ser preparadas através do corte de fitas, ou depositando um filme num substrato, tanto por transporte de vapor quanto por imersão. Nos dois últimos casos apenas o silício policristalino pode ser obtido. Cada técnica produz cristais com características específicas, no que diz respeito ao tamanho, morfologia e concentração de impurezas.

Ao longo dos anos, o processo de fabricação tem alcançado uma eficiência para este tipo de material em torno de 12,5%.

### 2.2.3 Célula de Silício Amorfo

A célula de silício amorfo se diferencia das demais estruturas cristalinas pelo fato de apresentar um alto grau de desordem na estrutura dos átomos. A utilização de silício amorfo para a fabricação de células fotovoltaicas apresenta grandes vantagens tanto no processo de fabricação quanto nas propriedades elétricas.

Como apresenta uma absorção da radiação solar na faixa do visível e pode ser fabricado mediante deposição de diversos tipos de substratos, o silício amorfo apresenta-se como uma tecnologia para aplicação em sistemas fotovoltaicos de baixo custo.

O silício amorfo apresenta duas desvantagens:

- A baixa eficiência de conversão quando comparado com as células de silício mono ou policristalino;
- As células são afetadas por um processo de degradação logo nos primeiros meses de operação, diminuindo a eficiência ao longo da sua vida útil.

Em contrapartida, as vantagens que compensam às deficiências acima citadas são:

- Processo de fabricação relativamente simples e barato;
- Possibilidade de fabricação de células com grandes áreas;
- Baixo consumo de energia na produção.
- Menor perda na eficiência para operação em altas temperaturas, quando comparado aos painéis de silício.

A Figura 2.6 mostra um painel fotovoltaico feito a partir de células de silício amorfo.



Figura 2.6 - Painel fotovoltaico a partir de células de silício amorfo [8]

## 2.3 Módulos Fotovoltaicos

Um módulo fotovoltaico, ou painel fotovoltaico, é o agrupamento de várias células fotovoltaicas. Este agrupamento é necessário uma vez que uma única célula apresenta baixa corrente e tensão de saída.

O número de células a serem agrupadas e a escolha das suas conexões, em série ou em paralelo, dependerá da tensão e da corrente que se deseja obter. Geralmente os fabricantes de módulos fotovoltaicos produzem módulos com um agrupamento de 54 e 60 células.

### 2.3.1 Conexão em Paralelo

A conexão de células em paralelo consiste em conectar os terminais de duas ou mais células em um ponto comum, de forma que os terminais positivos sejam ligados em um ponto e os negativos em outro ponto.

A corrente final é a soma das correntes individuais de cada célula, porém a tensão final é a mesma de uma única célula, em torno de 0,7 V, o que inviabiliza a utilização deste arranjo em alguns casos. A Figura 2.7 mostra a conexão de células fotovoltaicas em paralelo.

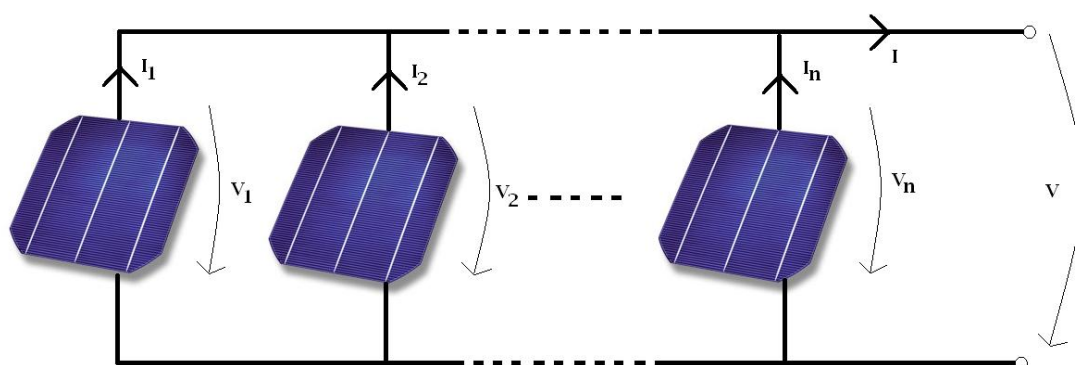


Figura 2.7 - Conexão de células fotovoltaicas em paralelo

### 2.3.2 Conexão em Série

A conexão de células em série consiste em ligar o terminal positivo de uma no negativo da outra e assim sucessivamente. Neste caso, a corrente será igual à corrente de cada módulo individual, mas a tensão total será igual ao somatório das tensões de cada módulo. A corrente de uma única célula tem valor em torno de 6,0 A, sendo este arranjo mais comumente utilizado. A Figura 2.8 mostra a conexão de células fotovoltaicas em série.

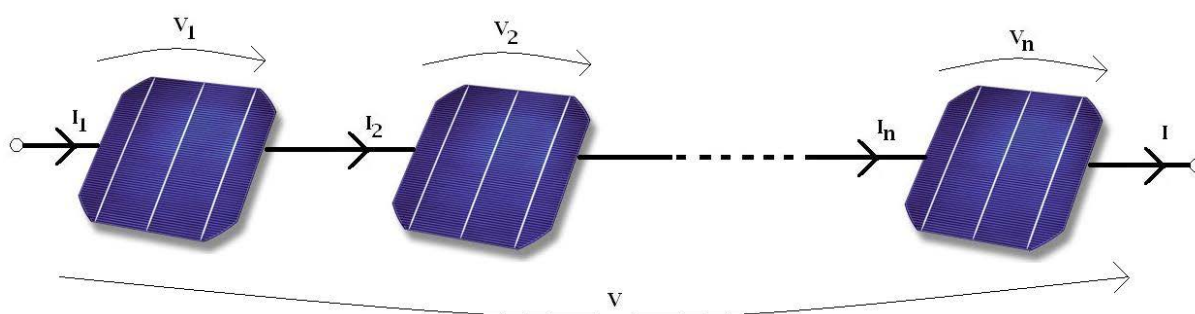


Figura 2.8 - Conexão de células fotovoltaicas em série

### 2.3.3 Características Elétricas do Módulo

Ao tratar de energia solar fotovoltaica, geralmente a potência dos módulos é dada pela potência de pico, sendo expressa em watt pico (Wp). Além deste, existem alguns parâmetros importantes para caracterizar a funcionalidade do módulo fotovoltaico. São eles:

- ✓ Tensão de Circuito Aberto ( $V_{OC}$ ):

Tensão medida, quando o módulo está posicionado na direção do sol, sob determinadas condições de radiação e temperatura, sem nenhuma conexão de qualquer equipamento ao módulo, o que corresponde à passagem de corrente nula.

- ✓ Corrente de Curto Circuito ( $I_{SC}$ ):

Corrente medida, quando o módulo está posicionado na direção do sol, sob determinadas condições de radiação e temperatura, sem nenhuma conexão de qualquer equipamento ao módulo, com os terminais em curto circuito, o que corresponde à tensão nula.

✓ Potência Máxima ( $P_M$ ):

É o valor máximo de potência que o dispositivo pode entregar, corresponde ao ponto na curva onde o produto  $V \times I$  é máximo.

✓ Tensão de Máxima Potência ( $V_{MP}$ ):

É a tensão específica para a qual a potência máxima poderá ser extraída.

✓ Corrente de Máxima Potência ( $I_{MP}$ ):

É a corrente que o dispositivo entrega sob condições de potência máxima.

### 2.3.3.1 Curva Característica $I \times V$

Ao obter as medidas de corrente e tensão, variando as condições de carga de forma que novos valores de corrente e tensão sejam coletados, é possível plotar um gráfico unindo todos os pontos através de uma linha, o que dá origem à Curva Característica  $I \times V$  que pode ser observada na Figura 2.9.

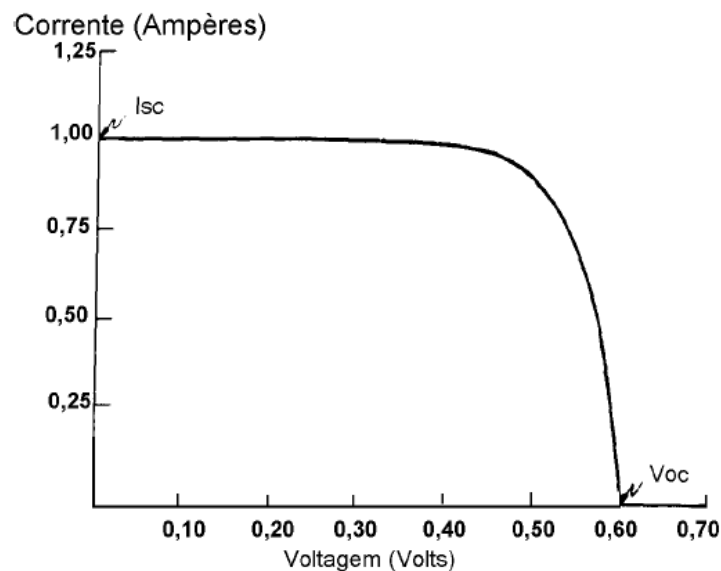


Figura 2.9 - Curva Característica  $I \times V$  típica de uma célula de silício monocristalino [2]

Na curva característica  $I \times V$ , cada ponto representa a potência gerada para determinadas condições de operação. É importante ressaltar que não existe geração de potência para as condições de circuito aberto e curto circuito, já que em cada um a corrente ou a tensão é igual à zero.

Na Figura 2.10 pode-se observar que existe apenas um valor de tensão e outro de corrente correspondente que resultam na potência máxima. Estes valores são tensão de máxima potência ( $V_{MP}$ ) e corrente de máxima potência ( $I_{MP}$ ).

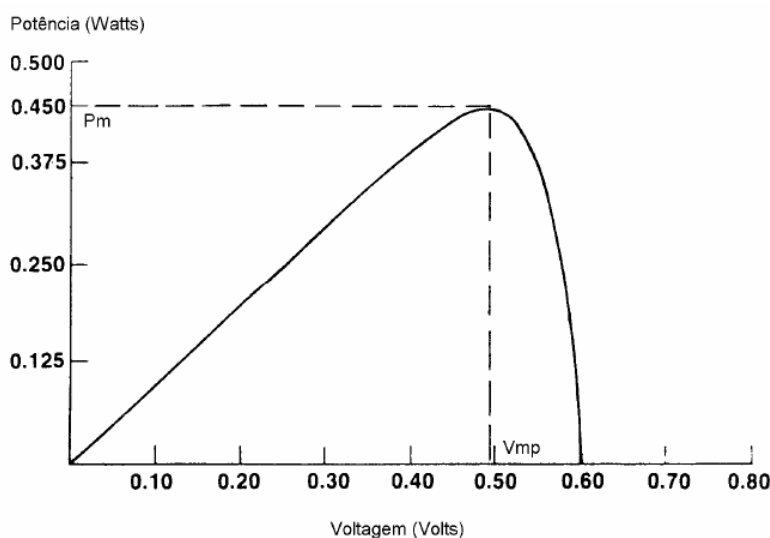


Figura 2.10 - Curva  $P \times V$  típica para uma célula de silício monocristalino [2]

A Figura 2.11 apresenta a curva característica  $I \times V$  superposta à curva de potência, para observação dos parâmetros de potência máxima.

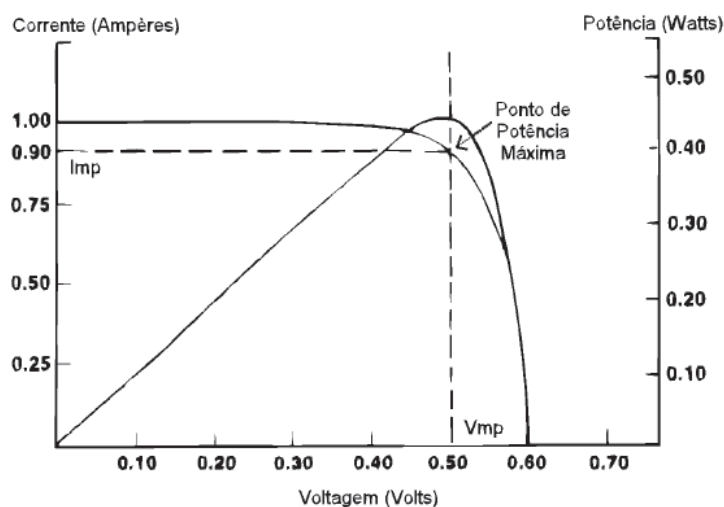


Figura 2.11 - Parâmetros de Potência Máxima [2]

### 2.3.3.2 Fatores que Afetam as Características Elétricas dos Módulos Fotovoltaicos

As características elétricas de um painel são influenciadas principalmente pelos seguintes fatores: a Intensidade Luminosa e a Temperatura das Células. A corrente gerada nos módulos aumenta linearmente com o aumento da Intensidade Luminosa, enquanto o aumento da temperatura na célula faz com que a eficiência do módulo caia, abaixando os pontos de operação para potência máxima gerada.

A condição padrão para a plotagem das curvas características, bem como a determinação das informações técnicas constantes na folha de dados dos módulos, é definida para uma radiação solar de  $1000 \text{ W/m}^2$  e temperatura de  $25^\circ \text{C}$  na célula.

#### I) Intensidade Luminosa

É importante lembrar que o sol possui movimento aparente no céu de acordo com a hora do dia e o dia do ano. Para a recepção de uma maior intensidade luminosa é necessário o acompanhamento deste movimento. Entretanto, os módulos são geralmente instalados em uma posição fixa, devido ao alto custo dos equipamentos que permitem a sua movimentação (seguidores ou *trackers*). Deste modo, é fundamental determinar a melhor inclinação para cada região, em função da latitude local e das características da demanda.

A Figura 2.12 mostra o fato de que a corrente gerada pelo módulo aumenta linearmente com o aumento da intensidade luminosa.

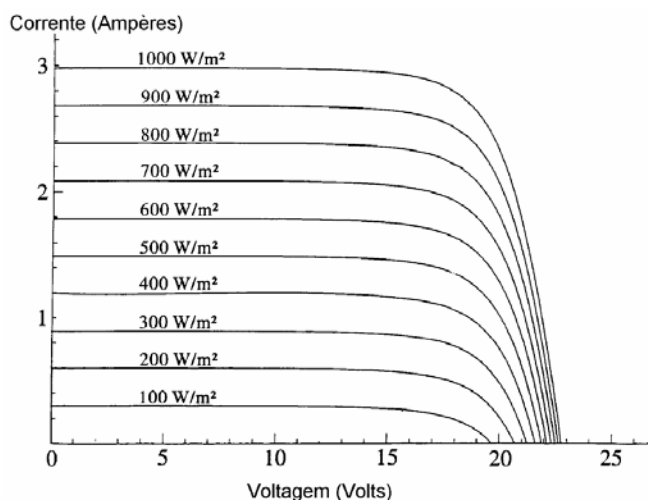
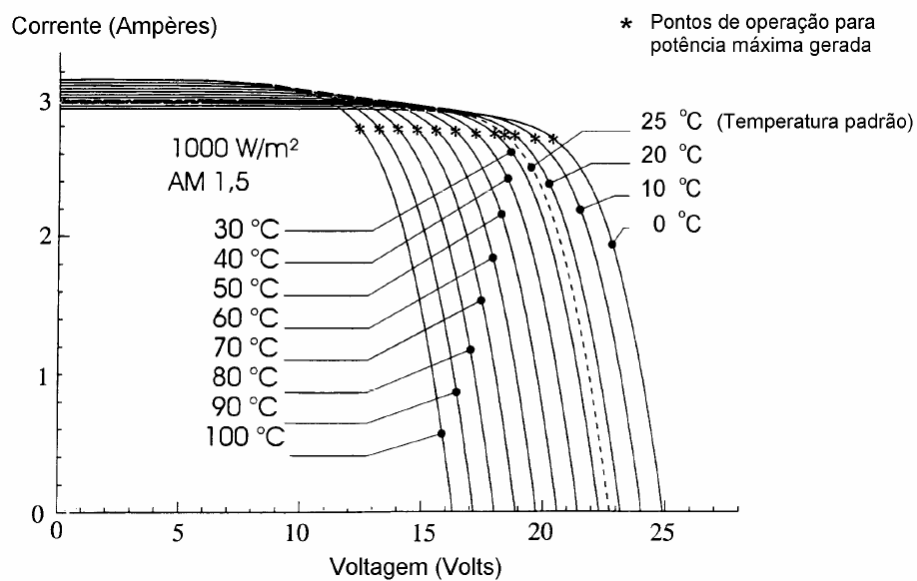


Figura 2.12 - Efeito causado na curva  $V \times I$  pela variação da Intensidade Luminosa [2]

## II) Temperatura das Células

A temperatura das células aumenta com o aumento do nível de insolação, o que consequentemente tende a reduzir a eficiência do módulo. Isto se deve ao fato de que a tensão diminui significativamente com o aumento da temperatura, enquanto a corrente sofre uma elevação muito pequena, quase desprezível. Este fato pode ser observado no gráfico da Figura 2.13.

É interessante ressaltar que os módulos de silício amorfo apresentam menor influência da temperatura na potência de pico, embora também sofram redução no seu desempenho.



**Figura 2.13 - Efeito causado na curva VxI pela variação da temperatura na célula**

## 2.4 Inversores

O componente responsável pela conversão de corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA) é comumente conhecido como inversor, ou mais genericamente como conversor CC-CA. O inversor deve dissipar o mínimo de potência, evitando perdas e produzindo uma tensão com baixo teor de harmônicos e em sincronismo caso o sistema seja interligado com a rede. É comum utilizar filtros para minimizar o conteúdo de harmônicos.

Os inversores utilizam um mecanismo de chaveamento para alternar o fluxo de corrente entre as direções positiva e negativa. Neste processo, são tipicamente utilizados como chaves semicondutoras os seguintes dispositivos: Transistores de Potência, Retificadores Controlados de Silício (SCR's), e mais recentemente os IGBT's – *Insulated Gate Bipolar Transistors* [9].

Devido à natureza unidirecional (Corrente CC) da energia elétrica gerada nos painéis solares fotovoltaicos, é necessária a utilização do conversor CC-CA para a conexão com a rede [3].

Além de fazer a conversão de energia e controlar a injeção de corrente elétrica na rede, o inversor incorpora diversas funções necessárias para o aproveitamento da energia elétrica fotovoltaica e a conexão segura com a rede, conforme mostra a Figura 2.14.

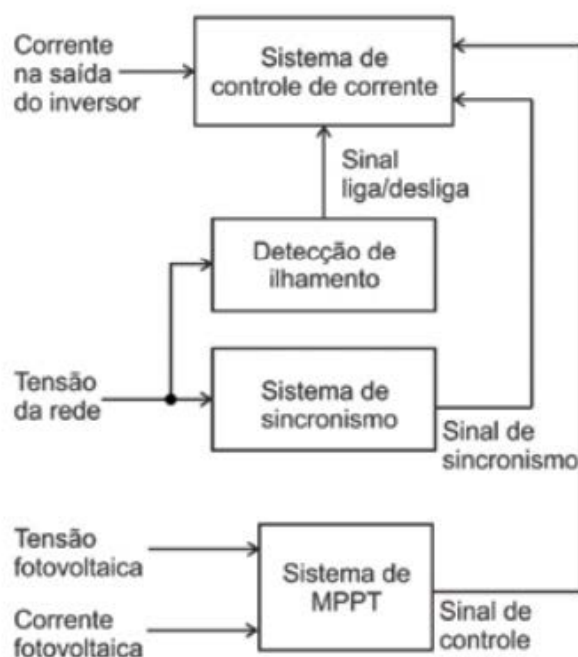


Figura 2.14 - Principais recursos presentes nos inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica [10]

Os principais inversores utilizados para a conexão de plantas solares ao sistema elétrico são os do tipo Grid Tie. Estes inversores são equipados com a função MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) capaz de obter a máxima potência possível dos painéis solares comandados por ele, bem como com a função de sincronismo, responsável por realizar o sincronismo da usina com a rede elétrica.

Outra função importante deste equipamento é a função anti-ilhamento, que garante que os inversores se desliguem em situações em que não haja detecção de tensão na rede elétrica.

A ocorrência destes ilhamentos poderia gerar sérios problemas relacionados à segurança de trabalhadores do sistema elétrico e aos consumidores a ele conectados. Deste modo, a função anti-ilhamento é de suma importância para a operação segura da planta solar fotovoltaica e deve estar incorporada ao sistema de controle dos inversores utilizados [3].

## 2.5 Energia Solar no Mundo Atual

Apesar de exigir a utilização de uma tecnologia mais cara, a geração solar emite sinais claros de viabilidade. Nos últimos dez anos estima-se uma queda de quase à metade dos custos de produção de energia solar. O gráfico da Figura 2.15 apresenta a evolução da capacidade instalada de energia solar no mundo ao longo dos últimos anos.

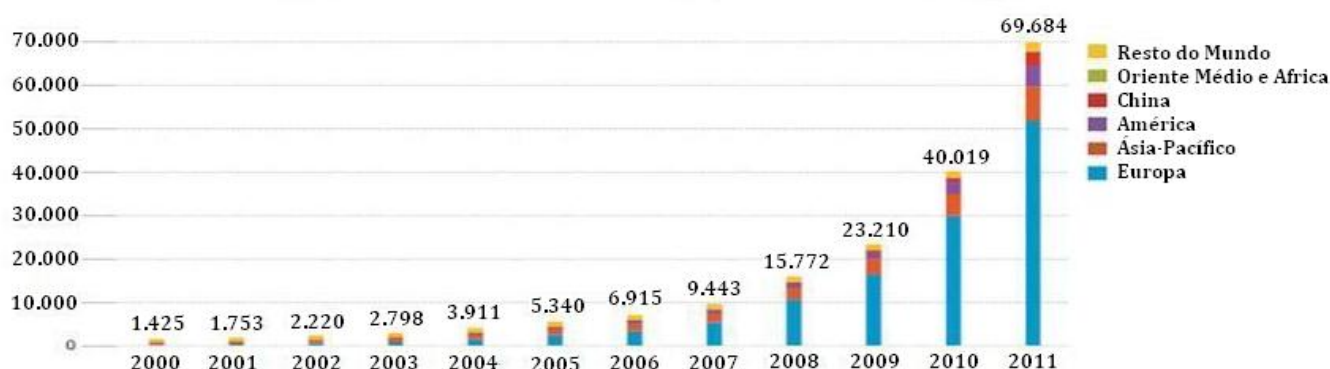


Figura 2.15 - Evolução da capacidade instalada de energia solar no mundo em MW ao longo dos últimos anos [11]

Ao lado das usinas eólicas, usinas à biomassa, geotérmicas e maremotriz, a geração solar compõe o grupo das energias complementares que devem ganhar maior participação na matriz energética mundial nas próximas décadas. Particularmente, a geração a partir da energia solar fotovoltaica deverá responder por 2% da produção global de eletricidade em cerca de duas décadas, segundo estimativa da Agencia Internacional de Energia (IEA, na sigla em inglês).

Países como Alemanha, Japão, Estados Unidos e Espanha, com políticas de incentivos, lideram o ranking de geração solar no mundo. O gráfico da Figura 2.16 apresenta a capacidade instalada de energia solar em 2011, dividida pelos países nos quais se encontram.

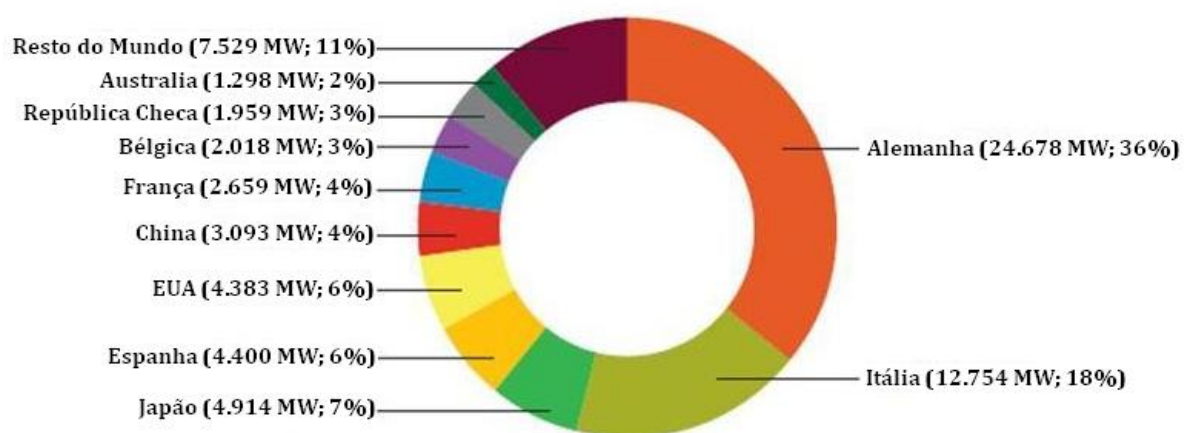


Figura 2.16 - Capacidade instalada de energia solar em 2011, dividida pelos países nos quais se encontram [11]

### 3 Usina Solar de Tauá (1MW)

#### 3.1 Introdução

A Usina Solar de Tauá é um empreendimento da MPX, empresa de energia do grupo EBX, que atua na área de geração e comercialização de energia.

A MPX, através do programa de pesquisa e desenvolvimento, projetou a primeira usina solar em escala comercial da América Latina, a Usina Solar de Tauá, instalada no município de Tauá, no estado do Ceará, a 360 quilômetros da capital Fortaleza. Ela é diretamente conectada ao sistema elétrico através de uma rede de 13,8 kV conectada à Subestação de Tauá (69 kV/ 13,8 kV), pertencente à concessionária local COELCE.

A Usina Solar de Tauá é um empreendimento pioneiro, principalmente considerando-se que a experiência com a geração solar fotovoltaica no Brasil, em grande parte até hoje, ocorreu por meio da instalação de pequenas unidades produtoras, com o objetivo de fornecer energia para regiões isoladas. A Figura 3.1 mostra uma vista geral do empreendimento.



Figura 3.1 - Vista geral da Usina Solar de Tauá (1 MW)

Inicialmente, a usina tem potencia nominal de aproximadamente 1 MWp, o suficiente para suprir 1.500 residências, gerando 1,56GWh por ano. Para isto estão instalados 4.680 painéis fotovoltaicos de alta tecnologia, em uma área de 12 mil metros quadrados. No futuro, a potência da usina poderá ser estendida até 5 MWp, já que possui autorização da Agencia Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e da Superintendência Estadual do Meio Ambiente do Ceará (SEMACE) para o aumento da capacidade instalada. E o projeto permite ainda, pelas características do terreno disponível, a ampliação gradual da usina para até 50 MWp [12].

O projeto teve um investimento inicial de R\$ 10 milhões, contando com apoio de U\$ 700 mil do Banco Interamericano de Desenvolvimento (BIN). O empreendimento é uma oportunidade para ser tomada como exemplo e intensificar a participação do Brasil na corrida mundial por um mercado competitivo de energia complementar.

### 3.2 Localização da Usina

Em meio ao clima semiárido do estado do Ceará, o município de Tauá foi escolhido para sediar a Usina Solar de Tauá por apresentar vantagens técnicas sobre os demais. A cidade, a cerca de 360 quilômetros da capital Fortaleza, passou por um processo seletivo rigoroso. A Figura 3.2 mostra a localização do município escolhido para a implantação da usina em território nacional.



Figura 3.2 - Localização do município de Tauá em território nacional

Tauá concorreu com outros dois municípios cearenses: Irauçuba e Sobral, ambos privilegiados por uma intensa radiação solar. Tauá foi o município escolhido, caracterizado por receber uma média de 177,7 horas de radiação solar, por mês, no primeiro semestre do ano, e 244,8 horas de radiação no segundo semestre.

Com base em dados históricos do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), desde 1961 até 1990, medidos através de uma estação meteorológica localizada no município de Tauá, chegamos à tabela presente na Figura 3.3, que apresenta as médias anuais de Temperaturas (mínima, média e máxima), bem como dados referentes à Irradiação Global Horizontal, Precipitação Total e Nebulosidade.

O município escolhido tem temperatura média anual de 26,6° C, irradiação global horizontal de 2105,5 kWh/m<sup>2</sup> ao ano e índice de nebulosidade de 4,7 em uma escala de 0 a 10.

ESTAÇÃO METEOROLÓGICA (TAUÁ)	FONTES NORMAIS CLIMATOLÓGICAS DO INMET (1961 - 1990)												
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	ANO
Temperatura													
Mínima (°C)	19.9	22.4	20.6	21.3	19.3	19.6	20.1	20.0	21.6	22.2	22.7	22.9	21.0
Média (°C)	27.0	26.9	26.4	26.0	24.8	24.6	24.6	25.8	26.8	27.3	27.8	27.7	26.8
Máxima (°C)	33.1	31.1	30.1	30.3	30.3	30.6	30.7	32.3	33.4	32.2	32.1	33.6	31.6
Irradiação Global Horizontal													
kWh/m2	179.2	175.8	184.8	166.3	160.9	146.7	159.7	182	194.1	199.3	179.4	178.3	2105.6
Precipitação Total													
(mm)	67.8	104.8	133.9	138.3	64.7	25.3	105.1	76.4	72.8	60.2	53.4	43.0	925.7
Nebulosidade													
(0-10)	6.0	6.0	6.0	6.0	5.0	4.0	4.0	3.0	3.0	4.0	4.0	5.0	4.7

**Figura 3.3 - Fontes Normais Climatológicas do INMET, referentes ao município de Tauá [13]**

A cidade conta ainda com infraestrutura viária instalada e com a proximidade de uma subestação da Eletrobrás/Chesf. Com o rótulo de município inovador, os seus programas de inclusão digital são amplamente conhecidos, capacitando moradores da área a utilizar equipamentos de informática e disponibilizando internet em locais de fácil acesso à população.

A usina vem despertando o interesse da comunidade acadêmica, com a tendência de que o turismo científico ganhe cada vez mais espaço entre as atividades econômicas. Já existe uma parceria com a Universidade Estadual do Ceará (UECE), no campus de Tauá, para o monitoramento dos dados obtidos na operação da Usina Solar. Desta forma, universitários serão capacitados na área de energia solar, realizando estudos que podem ajudar na evolução do conhecimento sobre a fonte no Brasil.

A área limite total do empreendimento, que possibilita no futuro uma ampliação para até 50 MW de potência instalada, é apresentada na Figura 3.4. A legenda mostra algumas características existentes: a presença de linhas de transmissão nas proximidades, dados relacionados às características geográficas, como latitude e longitude do território, bem como os nomes dos municípios adjacentes.

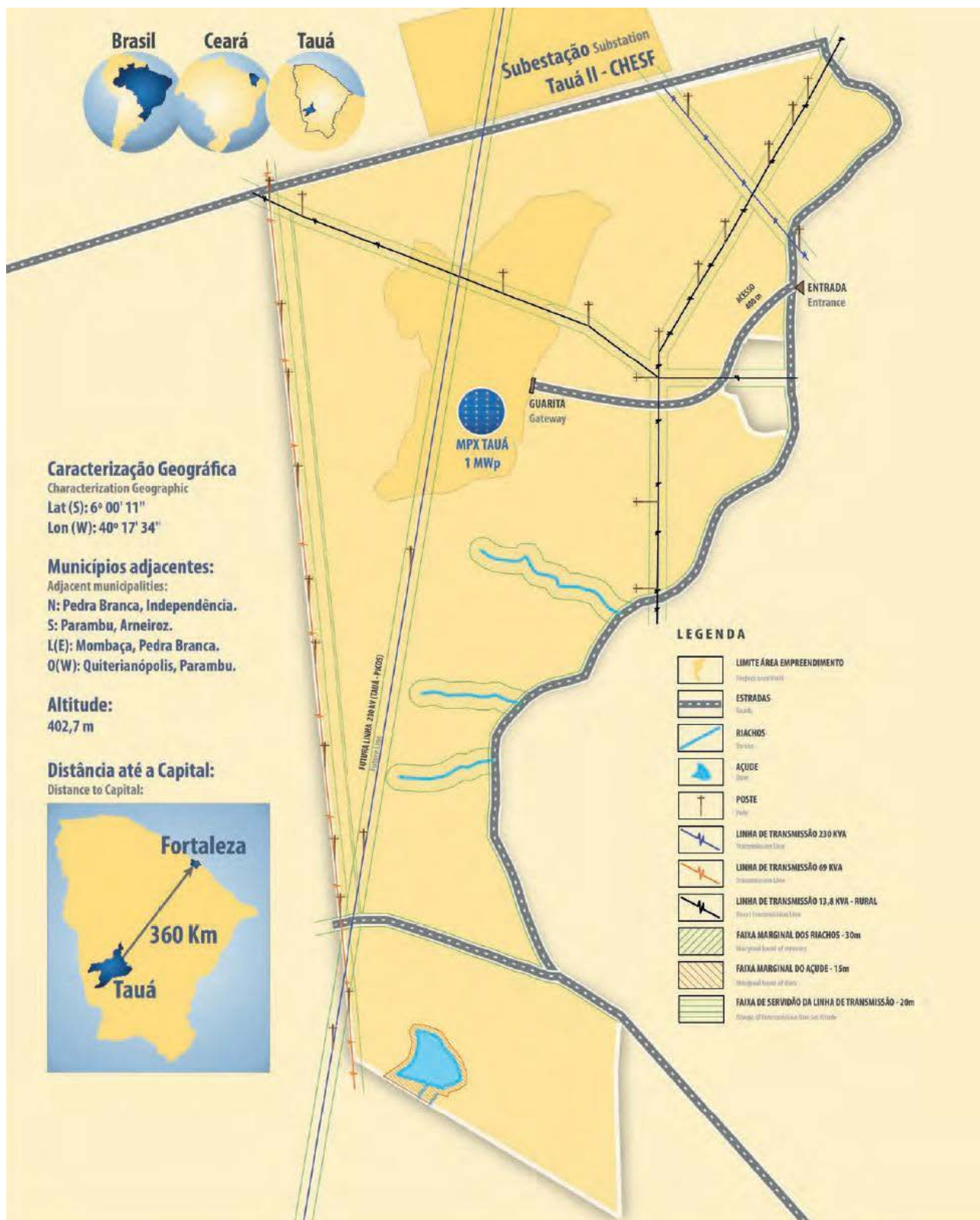


Figura 3.4 - Características geográficas e área limite do terreno do empreendimento [12]

### 3.3 Estruturação do Projeto

O trabalho de construção da primeira etapa da Usina Solar de Tauá, de 1 MW, envolveu preparação do terreno e instalação de 970 bases de concreto sobre as quais foram incluídas as estruturas de suporte e o conjunto de painéis fotovoltaicos. O projeto conta com três edificações: Guarita, Casa de Apoio e Sala dos Inversores.

O princípio de funcionamento da energia solar fotovoltaica conta com a utilização dos equipamentos dispostos na Figura 3.5, de forma que a corrente contínua gerada a partir da luz solar e captada pelos módulos fotovoltaicos seja transmitida para os inversores que a transformam em corrente alternada e a levam a um transformador para a elevação da tensão e transmissão da potência gerada.

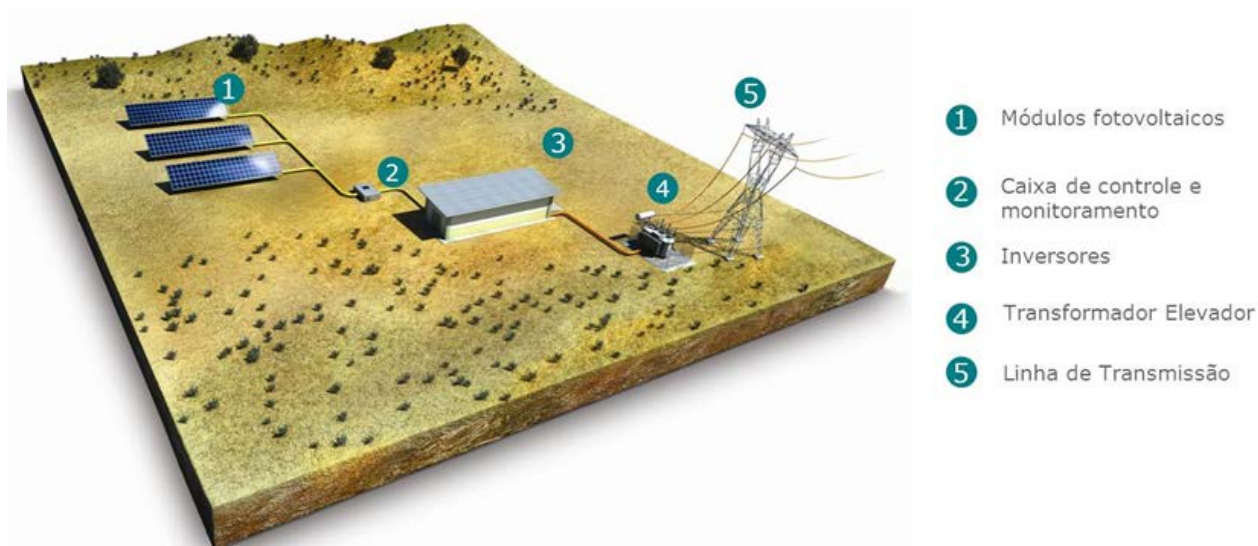
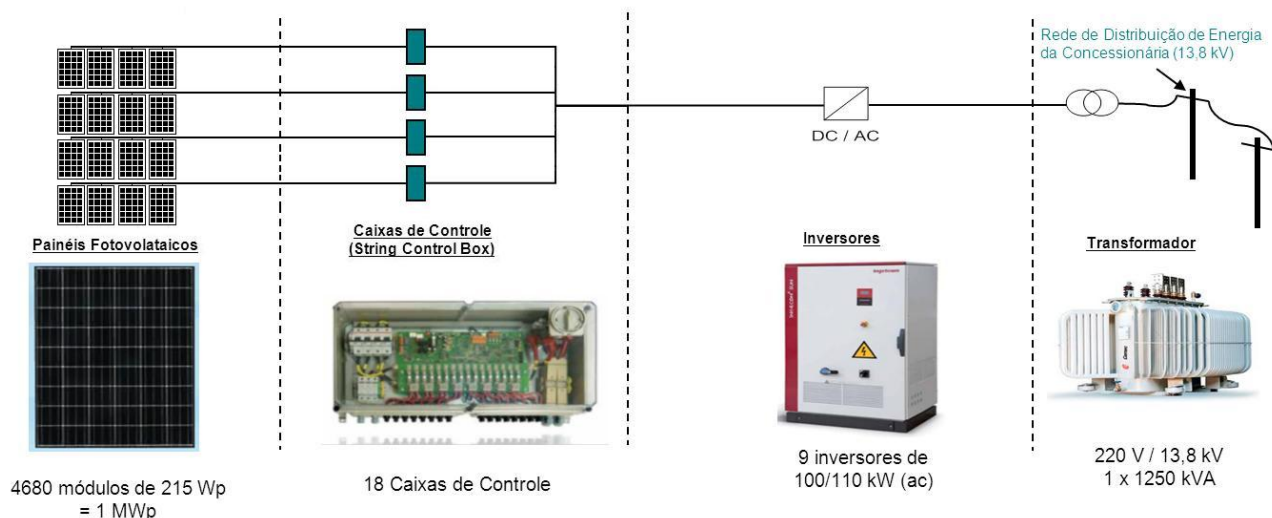


Figura 3.5 - Princípio de funcionamento da energia solar fotovoltaica e principais equipamentos utilizados [12]

Na Usina Solar de Tauá foram utilizados 4680 painéis da fabricante japonesa Kyocera, cada painel com a potência individual de 215 Wp, totalizando 1 MWp aproximadamente.

As ligações são feitas de modo que cada 20 painéis ficam ligados em série e 13 conjuntos de 20 em paralelo, acarretando em uma potência total de 55,9 kWp para um grupo de 260 painéis. Cada grupo de 260 painéis é conectado a uma Caixa de Controle nomeada *String Control Box*. Cada grupo de duas caixas de controle leva a potência de 111,8 kWp para um único inversor.

A sala dos inversores abriga nove inversores e equipamentos de comando e proteção. Um transformador de 1,25 MVA, com relação de tensão de 220 V / 13,8 kV, faz a conexão com a rede de distribuição da COELCE. A Figura 3.6 apresenta um desenho que ilustra a quantidade de equipamentos por etapa no fluxo de geração de energia dentro da usina.

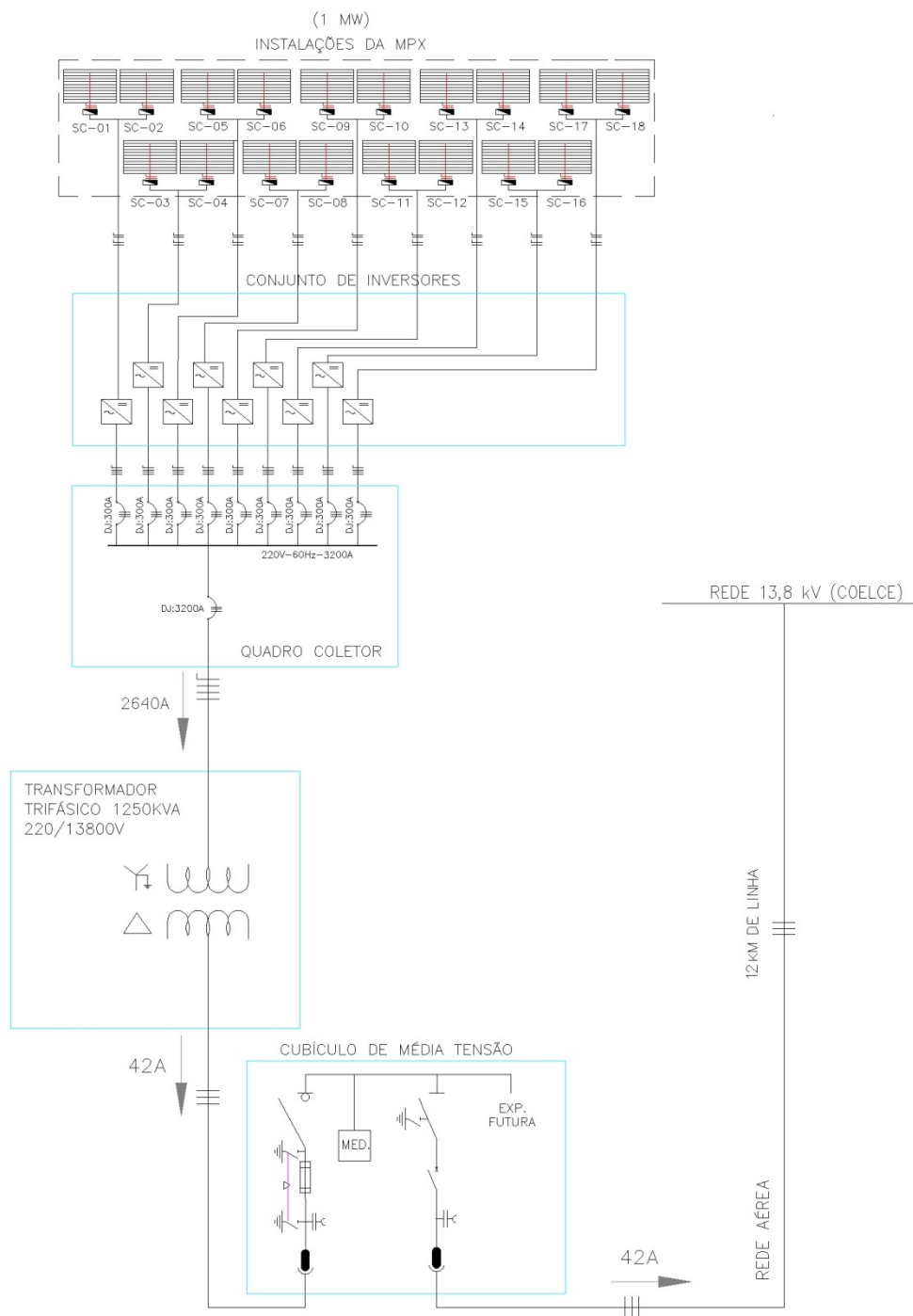


**Figura 3.6 - Fluxo de geração de energia dentro da Usina Solar de Tauá**

Para monitoramento dos dados climáticos, a usina conta com uma estação meteorológica própria, capaz de fornecer dados de radiação solar, temperatura ambiente e temperatura na superfície dos painéis solares. Esta instalação seguiu a padronização estabelecida pela Organização Meteorológica Mundial (OMM). A Casa de Apoio da usina é equipada com um auditório para receber visitantes que podem observar os painéis fotovoltaicos da perspectiva de um mirante.

### 3.3.1 Diagrama Unifilar

A Figura 3.7 apresenta o diagrama unifilar geral do projeto, mostrando as conexões de todas as etapas do projeto, desde a geração até a conexão com a rede.



**Figura 3.7 - Diagrama Unifilar Geral da Usina Solar de Tauá**

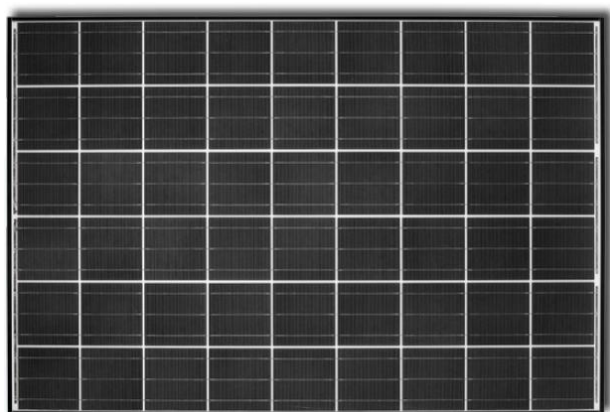
A potência gerada com os grupos de painéis solares passa pelas *String Control Boxes* (SC) que levam até os grupos de inversores de frequência. Um quadro geral de baixa tensão (QGBT) coleta a energia gerada nos nove inversores e direciona para o transformador elevador. Um cubículo de média tensão, com disjuntor SF<sub>6</sub>, é utilizado para fazer a interface entre o transformador elevador e a linha de transmissão. Após 12 quilômetros de linha a conexão é feita através de um bay de conexão ligado diretamente à rede de 13,8 kV da concessionária local COELCE.

Os principais equipamentos presentes na usina serão descritos a seguir para melhor entendimento do funcionamento do projeto.

### 3.3.2 Painéis Solares

Os painéis solares fotovoltaicos convertem a luz solar diretamente em eletricidade, mesmo em dias nublados, em que não haja incidência direta da luz solar. O fabricante japonês KYOCERA é o fornecedor dos painéis fotovoltaicos deste projeto e o modelo de painel utilizado é o KD215GH-2PU. O material utilizado nas células fotovoltaicas é o silício policristalino. As células têm dimensão básica de 156x156mm e apresentam uma eficiência de 16%, garantindo um elevado rendimento anual de energia.

Cada módulo ou painel é constituído de 54 células agrupadas, possuindo assim um tamanho total de 1,5m de comprimento por 0,99m de largura. Uma foto do painel supracitado pode ser vista na Figura 3.8.



**Figura 3.8 - Painel solar fotovoltaico da fabricante Kyocera - Modelo: KD215GW-2PU [14]**

Para proteção contra as condições climáticas mais agrestes, as células estão condicionadas entre uma cobertura de vidro endurecido e uma película de EVA e lacradas no verso com uma película de PET. A tomada de conexão do lado traseiro é equipada com diodos de by-pass, que evitam o risco de superaquecimento das células solares individuais.

As características técnicas do painel fotovoltaico utilizado são apresentadas na tabela da Figura 3.9.

**DADOS ELÉCTRICOS**

Tipo de módulo PV	KD215GH-2PU	
<b>A 1000 W/m<sup>2</sup> (STC)*</b>		
Potência nominal P	[W]	215
Tensão máx. do sistema	[V]	1000
Tensão à potência nominal	[V]	26,6
Corrente à potência nominal	[A]	8,09
Tensão de circuito aberto	[V]	33,2
Corrente de curto-circuito	[A]	8,78
<b>A 800 W/m<sup>2</sup> (NOCT)**</b>		
Potência nominal P	[W]	152
Tensão à potência nominal	[V]	23,6
Corrente à potência nominal	[A]	6,47
Tensão de circuito aberto	[V]	30,0
Corrente de curto-circuito	[A]	7,12
NOCT	[°C]	47,9
Tolerância de potência	[%]	+5 / -3
Carca de corrente de retorno I <sub>g</sub>	[A]	15
Protecção máx. de cordão	[A]	15
Coefficiente de temperatura da tensão de circuito aberto	[V/°C]	-1,20x10 <sup>-1</sup>
Coefficiente de temperatura da corrente de curto-circuito	[A/°C]	5,27x10 <sup>-3</sup>
Coefficiente de temperatura da potência à P <sub>max</sub>	[W/°C]	-9,91x10 <sup>-1</sup>
Redução do grau de actuação (1000 à 200 W/m <sup>2</sup> )	[%]	6,0

**DIMENSÕES**

Comprimento	[mm]	1500 (±2,5)
Largura	[mm]	990 (±2,5)
Espessura / inclusive tomada	[mm]	46
Peso	[kg]	18
Cabo	[mm]	(+950 / (-)750)
Tipo de conexão	MC PV-KBT3 / MC PV-KST3	
Tomada de conexão	[mm]	105x108x20
Código IP	IP65	

**DADOS GERAIS**

Garantia de desempenho	10*** / 20 anos****
Garantia	5 anos*****

**CÉLULAS**

Quantidade por módulo	54
Tecnologia da célula	policristalina
Tamanho da célula (quadrado)	[mm] 156x156
Contacto da célula	3-Barramento

\* Valores eléctricos sob condições de teste padrão (STC): irradiação de 1000 W/m<sup>2</sup>, massa de ar-AM 1,5 e temperatura da célula à 25 °C

\*\* Valores eléctricos sob temperatura de operação nominal das células (NOCT): irradiação de 800 W/m<sup>2</sup>, massa de ar-AM 1,5, velocidade do vento de 1 m/s e temperatura ambiente de 20 °C

\*\*\* 10 anos para 90% da potência P mínima especificada sob condições de teste padrão (STC)

\*\*\*\* 20 anos para 80% da potência P mínima especificada sob condições de teste padrão (STC)

\*\*\*\*\* Para o território europeu

**Figura 3.9 - Características técnicas do painel fotovoltaico Kyocera [14]**

São utilizados os valores eléctricos sob condições de teste padrão (STC), que contemplam uma irradiação de 1000 W/m<sup>2</sup>, temperatura da célula à 25° C e massa de ar (AM) 1,5 em uma escala de 0 a 1,5. Para estas condições verificamos que a potência nominal de cada painel é de 215 Wp, a tensão à potência nominal é de 26,6 V e a corrente à potência nominal é de 8,09 A.

Os painéis são agrupados em grupos de 20 módulos em série. Assim, com a soma das tensões, passam a ter como característica uma tensão, por grupo, de 20 x 26,6V = 532 V.

Cada 13 grupos destes são colocados em paralelo, com o auxílio de uma Caixa de Controle (*String Control Box*), formando assim um arranjo de 260 painéis, que possuem tensão de 532 V e corrente total de 13 x 8,09A = 105,2 A. Deste modo, as novas características de cada arranjo de 260 painéis passam a ser as seguintes.

➤ Arranjo de 260 Painéis Solares:

$$P = 260 \times 215 \text{ W} \rightarrow P = 55,9 \text{ kWp}$$

$$V = 532 \text{ V}; I = 105,2 \text{ A}$$

Os módulos possuem um limite de atuação de tensão máxima no sistema de 1000 V, o que é respeitado. Cada arranjo de 260 painéis é conectado a uma *String Control Box* de acordo com as conexões que serão descritas no item seguinte.

### 3.3.3 String Control Boxes (Caixas de Controle)

As caixas de controle e monitoramento, *String Control Boxes*, são os equipamentos que operam fazendo a interface entre os painéis fotovoltaicos e os inversores. O dispositivo permite medir e monitorar, com precisão, a corrente advinda das ligações em série dos painéis fotovoltaicos. O equipamento utilizado é da fabricante INGETEAM e é apresentado na Figura 3.10.

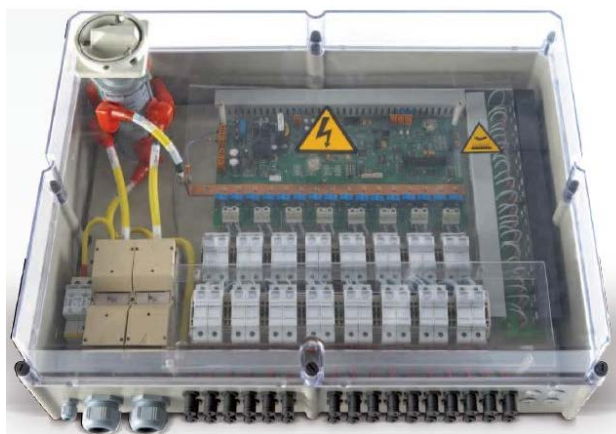


Figura 3.10 - Caixa de Controle e Monitoramento (*String Control Box*) da fabricante Ingeteam [15]

As principais funções e características inerentes ao equipamento são:

- ✓ Medição eletrônica de cada ligação em série de painéis fotovoltaicos.
- ✓ Detecção de corrente de defeito por ligação série de painéis.
- ✓ Fusível de proteção individual por ligação série de painéis.
- ✓ Funcionalidade de alarme para qualquer corrente defeituosa.
- ✓ Proteção IP65 para instalação ao ar livre.
- ✓ Possui descarregadores de sobretensão em CC e chave seccionadora CC.

Cada grupo de 20 painéis em série, conforme visto anteriormente, possui 532 V de tensão e corrente de 8,09 A, e é conectado a uma entrada do *String Control Box*, utilizando um total de 13 entradas do equipamento que tem até 16 entradas disponíveis.

Analisando a especificação técnica do equipamento presente na Figura 3.11, reparamos que a corrente por entrada não excede o limite de 10 A – CC e a tensão também está dentro do limite de tensão máxima do equipamento igual a 1000V – CC.

	String Control
Maximum number of connectable strings	16
Maximum number of measurable channels	16
Maximum current per string	10 Adc
Maximum total current	160 Adc
Number of protection fuses	16
Maximum voltage	1,000 Vdc
Communications	RS-485, GSM/GPRS, Ethernet, WIFI, fibre optics card
Ambient temperature	-20°C to +65°C
Protection class	IP65

**Figura 3.11 - Especificação técnica da Caixa de Controle - String Control Box [15]**

Assim é feita a conexão em paralelo de 13 módulos de 20 grupos de painéis série, totalizando um número de 260 painéis por cada *String Control Box*, com potência total de 55,9 kW e corrente total de 105,2 A. A corrente total também está dentro do limite especificado pelo equipamento (160A – CC).

Dando sequência à lógica do fluxo de energia, são utilizadas duas caixas de controle para levar a energia gerada a partir de 520 painéis fotovoltaicos até cada inversor, cuja especificação será apresentada a seguir.

### 3.3.4 Inversores

Os Inversores são os equipamentos responsáveis pela conversão da energia elétrica gerada nos painéis fotovoltaicos em corrente contínua para corrente alternada. O modelo dos inversores utilizados no projeto é o Ingecon Sun 100 TL, da fabricante INGETEAM, como pode ser visualizado na Figura 3.12.



Figura 3.12 - Inversor Ingecon Sun 100 TL, da fabricante INGETEAM

Estes inversores são do tipo Grid-Tie e são específicos para operarem conectados diretamente com a rede. Nesta usina são utilizados nove inversores de 100 / 110 kW (máximo). Um dos inversores assume o papel de mestre, checando as condições da energia gerada pelos painéis e realizando o sincronismo com a rede elétrica tão logo sejam satisfeitas as condições, tanto de entrada quanto de saída. Deste modo o inversor comanda a sincronização da usina com a rede elétrica.

Um importante dispositivo de proteção utilizado nesta tecnologia é a função anti-ilhamento (em inglês, *anti-islanding*) que garante que os inversores se desliguem em situações em que não haja detecção de tensão na rede elétrica. Deste modo, caso parte do sistema seja desligado após a detecção de um defeito, a usina deverá sair de operação através da percepção pela função citada. Assim, não colocará em risco a segurança dos trabalhadores do sistema elétrico que forem realizar a manutenção da linha.

Toda a sequência de entrada em operação e desligamento é feita de forma autônoma, sendo dispensada a presença de um operador para que a usina entre em funcionamento ou em processo de desligamento.

São apresentadas algumas características técnicas do equipamento na tabela da Figura 3.12.

100TL					
Input (DC)		Output (AC)		General Information	
Recommended PV array power range <sup>(1)</sup>	103 - 130 kWp	Rated power AC HT <sup>(3)</sup>	100 kW	Air cooling	2,600 m³/h
Voltage range MPP	405 - 820 V	Rated power AC HP <sup>(4)</sup>	110 kW	Stand-by consumption <sup>(7)</sup>	30 W
Maximum voltage DC <sup>(2)</sup>	900 V	Maximum current AC	326 A	Consumption at night	1 W
Maximum current DC	260 A	Rated voltage AC	220 V IT System	Ambient temperature	-20°C to +65°C
DC inputs	4	Frequency AC	50 / 60 Hz	Relative humidity	0 - 95%
MPPT	1	Phi Cosine <sup>(5)</sup>	1	Protection class	IP 20
<b>Efficiency</b>		Phi Cosine adjustable	±0.9 to Pnom		
Maximum efficiency	98.40%	THD <sup>(6)</sup>	<3%		

**Notes:** <sup>(1)</sup> Depending on the type of installation and geographical location <sup>(2)</sup> Must not be exceeded under any circumstances. Consider the voltage increase of the 'Voc' at low temperatures <sup>(3)</sup> Up to 45°C ambient temperature, Pmax= 110% Pnom for non permanent transients <sup>(4)</sup> Up to 40°C ambient temperature, Pmax = Pnom <sup>(5)</sup> For Pout > 25% of the rated power. Possibility to modify the Phi Cosine <sup>(6)</sup> For Pout > 25% of the rated power and voltage in accordance with IEC 61000-3-4 <sup>(7)</sup> Consumption from PV field.  
**HT Mode (high temperature)** Rated outputs at 45°C **HP Mode (high power)** Rated outputs at 40°C

Figura 3.13 - Características técnicas do Inversor Ingecon Sun 100 TL [16]

Este projeto conta com a utilização de nove inversores, sendo que cada inversor recebe a potência advinda de duas *String Control Boxes*, o que totaliza uma potência de 111,8 kW, com corrente de 210,4 A, a uma tensão de 532V por inversor.

Cada um dos inversores tem a capacidade de operar a uma potência máxima de 110 kW sem nenhuma perda de eficiência. Percebe-se que o valor da potência de projeto na entrada do inversor está ligeiramente acima do limite estabelecido em sua especificação. Porém, tal condição incorpora as perdas inerentes ao processo de geração, como as perdas por temperatura, que atuam diretamente nos painéis, bem como as perdas elétricas nos cabos, fora o fato da usina não atuar a todo momento com irradiação solar máxima. Deste modo, a potência está dentro de um limite suportável para a sua operação.

Os inversores são do tipo auto comutado a IGBT's e, após a conversão, oferecem uma tensão de saída de 220 V entre fases e 127 V entre fase e neutro, em corrente alternada e frequência de 60 Hz, para a sincronização com a rede. A saída dos inversores passa por um quadro geral de baixa tensão que faz a conexão com o transformador elevador.

Dentre outras características do equipamento, os inversores possuem ainda:

- ✓ Seccionadora CC com manopla na porta.
- ✓ Seccionadora CA com manopla na porta.
- ✓ Sistema de monitoramento por tela display com teclado.
- ✓ Registrador interno para armazenamento de dados durante três meses.
- ✓ Sistema reforçado de ventilação interna.
- ✓ Proteção com fusíveis em corrente contínua.
- ✓ Proteção com fusíveis em corrente alternada.
- ✓ Proteção contra sobre tensões atmosféricas em corrente contínua e alternada.
- ✓ Proteção contra sobre correntes e curto circuitos na saída (proteção termomagnética).
- ✓ Proteção contra tensões e frequências fora da faixa.
- ✓ Proteção contra inversão de polaridade.
- ✓ Botão de emergência na porta frontal.

### 3.3.5 QGBT (Quadro Geral de Baixa Tensão)

Um quadro geral de baixa tensão faz a interligação dos inversores com o transformador elevador, coletando a corrente de saída dos nove inversores e direcionando por um único caminho ao transformador. A representação no diagrama unifilar que ilustra esta ação do QGBT é apresentada na Figura 3.14.

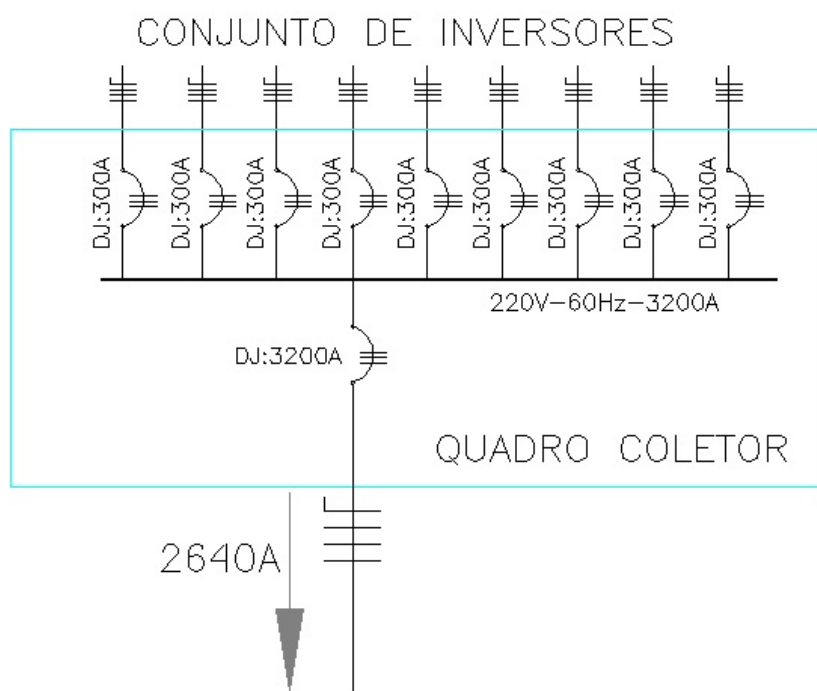


Figura 3.14 - Representação do quadro geral de baixa tensão no diagrama unifilar

A corrente de saída dos inversores é calculada conforme a formula abaixo:

$$P = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos \varphi;$$

$$P = 111,8 \text{ kW}; V = 220 \text{ V}; \cos \varphi = 1; \rightarrow \mathbf{I = 293,4 \text{ A}}$$

Para tal corrente, considerando que esta corrente é de projeto, um pouco acima da corrente real devido às perdas durante o processo de geração, foram dimensionados disjuntores de 300 A. Na saída do quadro a corrente é igual a  $9 \times 293,4 \text{ A} = 2640 \text{ A}$  aplicando-se assim um disjuntor geral dimensionado para 3200A. As características dos disjuntores utilizados no quadro são apresentadas a seguir:

- Para a chegada dos inversores – Disjuntores do tipo caixa moldada 300 A / 70 kA, provido de contatos auxiliares com um conjunto de conectores de força e comando.
- Para o Transformador elevador – Disjuntor do tipo caixa aberta 3200 A / 80 kA, comando motorizado, provido de bobinas de abertura e contatos auxiliares.

As principais características técnicas do QGBT podem ser vistas na tabela da Figura 3.15.

CARACTERÍSTICAS GERAIS - QUADRO GERAL DE BAIXA TENSÃO (QGBT)			
Características Principais		Características dos Barramentos	
Item	Descrição	Item	Descrição
Barramento Principal	3200 A	Material	Cobre Eletrolítico
		Conexões	Prateadas
Barramentos Verticais	400 A	Temperatura Máxima	105° C
		Revestimento	Cobre Nú
Tipo de Construção	Armário Auto-Portante, construção tipo 1; conforme NBR IEC 60439-1	Dispositivo de Manobra	Disjuntor Caixa Aberta
		Isolação	750 V em PVC
Uso	Abrigado	Tipo	Flexível, Anti-Chama
		Força	2,5mm <sup>2</sup>
Fixação	Pela Base	Controle e Iluminação	1,5mm <sup>2</sup>
		Circuitos Secundários	2,5mm <sup>2</sup>
Grau de Proteção	IP 4X	Entrada de Cabos	Parte Inferior do Painel
		Equipamentos Auxiliares	Tomadas Internas Tipo Universal

**Figura 3.15 - Características Gerais do Quadro Geral de Baixa Tensão (QGBT)**

A Figura 3.16 apresenta uma foto do Quadro Geral de Baixa Tensão descrito.




**Figura 3.16 - Quadro Geral de Baixa Tensão (QGBT) instalado na usina**

### 3.3.6 Transformador Elevador

Após a passagem pelo quadro geral, o fluxo de potência é levado a um transformador elevador para a conexão apropriada com a rede elétrica. Este transformador é da fabricante ZILMER e possui potência nominal 1250 kVA e relação de transformação 220 V / 13.800 V. Trata-se de um transformador trifásico à óleo com refrigeração ONAN (Óleo Natural Ar Natural). Os enrolamentos de baixa são ligados em estrela aterrado, enquanto os de alta são ligados em delta, para compatibilização com a rede de distribuição da concessionária local COELCE.

As demais características elétricas do transformador podem ser observadas na Figura 3.17 que apresenta a placa de dados do transformador.



**ZILMER INELTEC**  
CONSTRUÇÕES ELÉTRICAS LTDA

Rua São João Clímaco, nº315  
 CEP-04255-000-São Paulo-SP  
 Fone : (011) 6947-4988

## TRANSFORMADOR A ÓLEO

SÉRIE N° **138980** TIPO **TAO** POT.NOM. **1250** kVA REFR. **ONAN** NBI **110** kV

FREQ. **60** Hz FASES **3** ANO **2010** MANUAL INSTR. **ZI-MO95** NORMA **NBR 5356**

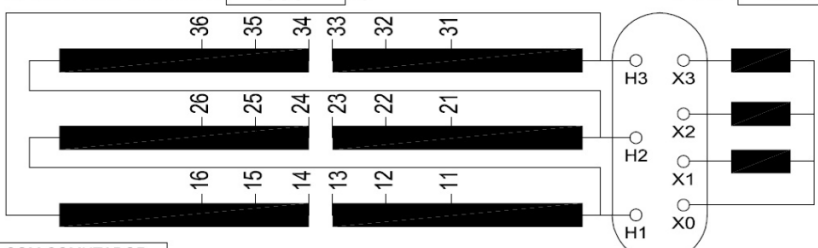
LIMITE ELEV. TEMP. ENROL. **65** °C NÍVEL A.T. B.T. TENSÃO SUPORTÁVEL A.T. B.T.

LIMITE ELEV. LIQ. ISOLANTE **65** °C ISOLAC. **1,2 15** kV FREQ. INDUSTRIAL **10 34** kV

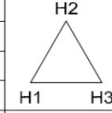
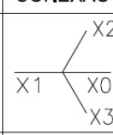
CORR. EXCIT.  % IMPED.  % TEMP. DE REF. **75** °C EM **60** Hz POS. **14,49** kV

NÚCLEO E ENROLAMENTO **1390** Kg ÓLEO **780** Kg ÓLEO TIPO: **A** ÓLEO **910** l

CAIXA E ACESSÓRIOS **980** Kg TOTAL **3150** Kg



COM COMUTADOR

LINHA A.T. : H1 - H2 - H3					B.T.:X0-X1-X2-X3		
TENSÃO (V)	CORRENTE (A)	COMUT	COMUTADOR CONECTA	CONEXÃO	CONEXÃO	TENSÃO (V)	
14490	49,8	1	13-14 / 23-24 / 33-34			220Y/127	
14145	51,0	2	12-14 / 22-24 / 32-34			CORRENTE (A)	
13800	52,3	3	12-15 / 22-25 / 32-35			ONAN	
13455	53,6	4	11-15 / 21-25 / 31-35				
13110	55,0	5	11-16 / 21-26 / 31-36				
					GRUPO DE CONEXÃO	D y n 1	3280,0

C.N.P.J. N° 60.618.428/0001-24 IND. BRASILEIRA

Figura 3.17 - Placa de dados com as características elétricas do transformador elevador

A corrente projetada para circular no lado de baixa do transformador, como previamente apresentado, é de 2640 A. Aplicando-se a relação de transformação, a corrente a circular no lado de alta é de  $2640 \times (220 / 13.800) = 42$  A. Analisando-se a placa de dados verificamos que ambas as correntes estão dentro do limite especificado pelo transformador. Na saída do transformador, com o nível de tensão em 13,8 kV, os cabos isolados são enterrados e levados através de canaletas para o cubículo de média tensão.

A Figura 3.18 apresenta uma foto do transformador elevador instalado.



**Figura 3.18 - Transformador Elevador ZILMER - 1250 kVA - 220 V / 13,8 kV**

### 3.3.7 Cubículo de Média Tensão

Após a passagem pelo transformador elevador, um cubículo de média tensão é instalado para fazer a interface entre o transformador e a linha de transmissão. O modelo utilizado é da fabricante EFACEC e foi montado também pela empresa INGETEAM. O cubículo é equipado com um disjuntor a gás SF<sub>6</sub> para extinção do arco elétrico, bem como com equipamentos como Transformadores de Potencial (TP's) e Transformadores de Corrente (TC's). Algumas das principais características elétricas destes equipamentos são apresentadas na tabela da Figura 3.19.

Disjuntor à Gás SF <sub>6</sub>			Transformador de Potencial		
Tensão nominal	V	15000	Tensão máxima	V	15000
Classe de tensão	V	24000	Relação nominal	kV	13,8/√3 - 0,115/√3
Tensão suportável à frequência industrial	kV	38	Classe de exatidão e carga nominal	-	0,6P75
Tensão suportável de impulso atmosférico	kV	95	Fator de sobretensão	-	1,15
Corrente nominal	A	630	Quantidade	-	3
Capacidade de interrupção em curto-circuito	kA	20	Transformador de Corrente Tipo Enrolado		
Ciclo de operações	-	O-0,3s-CO-3min-CO	Classificação (medição/ proteção)	-	Medição e proteção
Tensão nominal circuitos auxiliares e comando	V	125Vcc	Relação de transformação	-	50/5-5
Número de pólos	-	3	Classe de exatidão e carga nominal	-	0,3C25/10B100
			Fator térmico nominal	-	1,2
			Quantidade	-	3

**Figura 3.19 - Características elétricas do Disjuntor, TC's e TP's, presentes no cubículo de MT**

O cubículo conta ainda com a presença de Chave Seccionadora e de Aterramento com Lâmina de Terra e base para fusíveis, além de um Medidor Digital Multifunção, cujas principais características são descritas na tabela da Figura 3.20.

Chave Seccionadora e de Aterramento			Medidor Digital Multifunção		
Numero de pólos	-	3	Grandezas disponíveis	-	V, A, kW, kVA, kWh, kVar, FP
Lâmina de terra (sim/ não)	-	sim	Sinal de corrente	A	5
Base para fusíveis (sim/ não)	-	sim	Sinal de tensão	V	115 Vac
Mecanismo de comando (manual/ motorizado)	-	manual	Alimentação auxiliar	V	125 Vcc
Acionamento	-	Sob carga	Saída serial	-	sim
Classe de tensão	V	24000	Protocolo de comunicação em rede	-	Modbus RTU
Tensão nominal	V	13800			
Corrente nominal	A	630	Quantidade	-	1
Quantidade	-	1			

**Figura 3.20 - Características elétricas da Chave Seccionadora e do Medidor Digital**

A interligação entre o cubículo de média e o transformador elevador é feita por cabos isolados através de canaletas subterrâneas. A interligação da Usina Solar com a rede de distribuição da concessionária local (COELCE) é realizada por uma rede de doze quilômetros no padrão rural, transmitindo a potência a uma tensão de 13,8 kV. A Figura 3.21 apresenta uma foto do Cubículo de Média Tensão presente na usina.



**Figura 3.21 - Cubículo de Média Tensão da fabricante EFACEC, montado pela INGETEAM**

### 3.3.8 Disposição dos Equipamentos

Os equipamentos descritos anteriormente estão conectados segundo mostra o diagrama unifilar da Figura 3.7 e estão dispostos em locais específicos no site do empreendimento. Na área total destinada ao projeto existe um pátio geral e três edificações: a guarita, a casa de apoio e a sala dos inversores. As três edificações presentes no projeto estão indicadas na Figura 3.22.



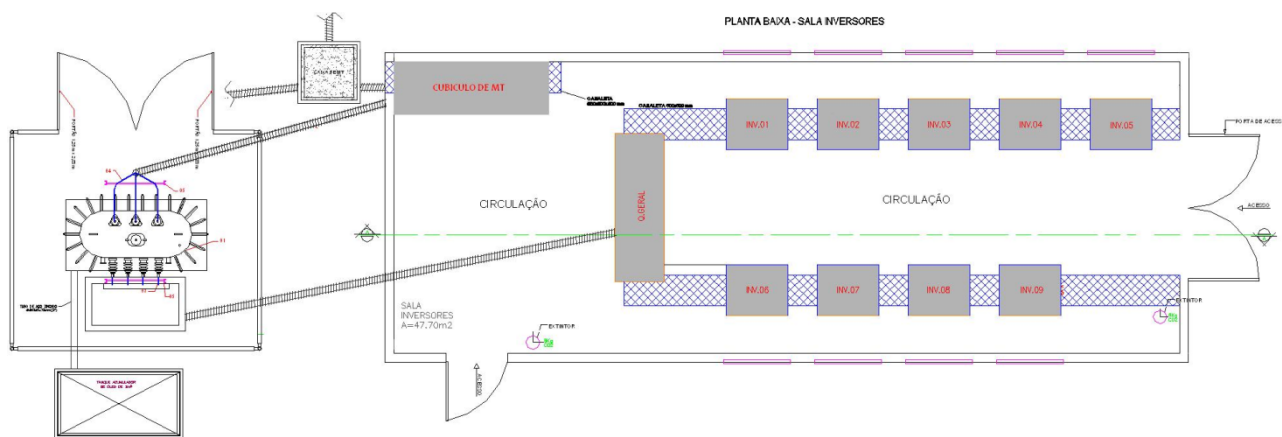
Figura 3.22 - Disposição das três edificações presentes no site

Os Painéis Solares estão dispostos no pátio geral, como pode se observar na Figura 3.22. As *String Control Boxes* estão instaladas junto às estruturas de suporte dos painéis, abaixo dos mesmos e também no pátio geral. A Figura 3.23 apresenta o local específico onde uma das caixas de controle está instalada, tendo as outras seguido a mesma linha de instalação.



Figura 3.23 - Local de instalação das String Control Boxes

Os Inversores, bem como o Quadro Geral de Baixa Tensão (QGBT) e o Cubículo de MT, têm instalação abrigada no interior da Sala dos Inversores e o Transformador Elevador é instalado ao tempo do lado da sala dos inversores. A Figura 3.24 mostra a vista em planta da Sala dos Inversores e a ligação com o transformador elevador do lado de fora da sala, especificando o local onde estão instalados os nove inversores, o QGBT, o Cubículo de Média Tensão e o Transformador Elevador.



**Figura 3.24 - Planta baixa da Sala dos Inversores e Transformador**

A Figura 3.25 apresenta o corte referente à Figura 3.24, em que é possível visualizar em detalhe a disposição dos equipamentos no interior da sala dos inversores.



**Figura 3.25 - Vista em corte da Sala dos Inversores apresentando em detalhe os equipamentos instalados**

Após a elevação da tensão no transformador e a passagem pelo cubículo de média tensão, os cabos de média são levados por canaletas subterrâneas até um poste que fica localizado a poucos metros da sala e do transformador. A foto da Figura 3.26 mostra a localização do poste.



**Figura 3.26 - Sala dos Inversores, Transformador Elevador e Poste para o escoamento da potência gerada**

Assim a potência é transmitida, em 13,8 kV, por meio de uma linha de cerca de 12 quilômetros até ser injetada na Subestação de Tauá (69 kV/ 13,8 kV) da COELCE.

### 3.4 Regime de Operação da Usina

Uma usina solar, com tecnologia fotovoltaica, necessita de irradiação solar para entrar em operação. A Usina Solar de Tauá não faz uso de banco de baterias ou algo similar para suprir a energia em períodos em que não houver insolação. Como a usina é diretamente conectada à rede elétrica, o objetivo é produzir o máximo de energia para a rede no período em que houver irradiação disponível e na sua ausência a usina desliga. De acordo com a localização e as características climáticas da região, o regime de operação diário é previsto de acordo com o formato de curva indicado no gráfico da Figura 3.27.

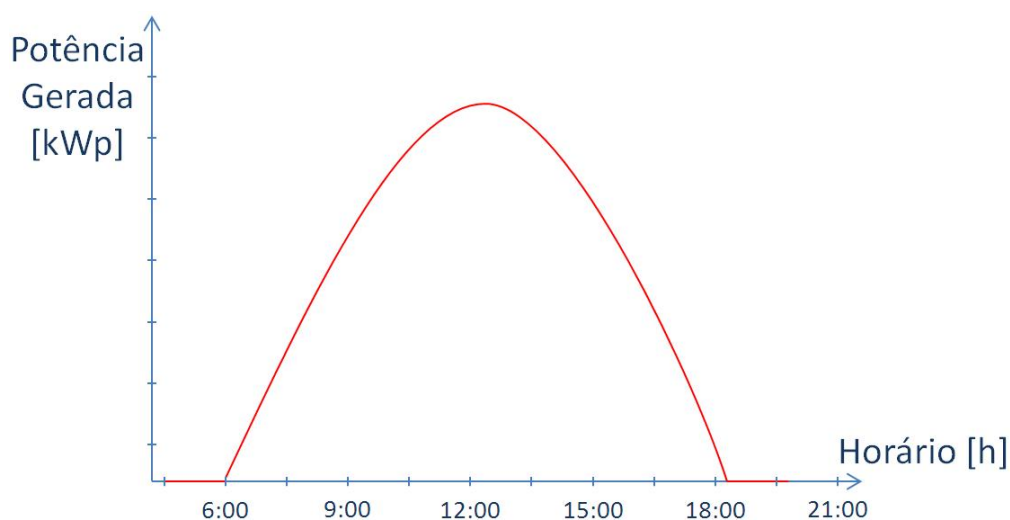


Figura 3.27 - Gráfico típico da potência gerada na usina em kWp pela hora do dia

A usina é regulada para operar com fator de potência unitário, o que faz com que não interaja com a rede elétrica em termos de consumo ou fornecimento de reativos. A potência instalada da usina é igual a 1.006.200 Wp, aproximadamente 1 MWp, que conta com a utilização de 4.680 painéis de 215 Wp cada. A potência nominal está relacionada à condição de STC – *Standard Test Conditions*, que corresponde a uma temperatura de 25° C, irradiação solar igual a 1.000 W/m<sup>2</sup> e massa de ar igual a 1,5 em uma escala de 0 a 1,5.

Alguns itens impactam negativamente na eficiência da operação do projeto como, por exemplo, as perdas por temperatura que atuam diretamente nos painéis e as perdas elétricas nos cabos, equipamentos e no processo de conversão dos inversores de corrente contínua para alternada.

Um fator importante a ser destacado na operação das usinas solares é o Fator de Capacidade. O Fator de Capacidade, também chamado de Fator de Carga de uma unidade de geração de energia, é a razão entre a produção efetiva da usina em um período de tempo e a produção máxima neste mesmo período de tempo [17].

Utilizando-se dados de projeto, citados anteriormente no item 3.1, a usina foi projetada para gerar efetivamente cerca de 1,56 GWh ao ano, sendo considerada a irradiação global incidente sob os painéis durante o período anual. Para o cálculo do fator de capacidade precisamos saber então qual a produção máxima no período de um ano. A produção máxima considera que a usina gera sua potência nominal, igual a 1006,2 kW, durante 24 horas por dia, no período de 365 dias. Efetuando a multiplicação obtemos aproximadamente 8,81 GWh para o período citado.

O cálculo do fator de capacidade é obtido a partir da seguinte conta:

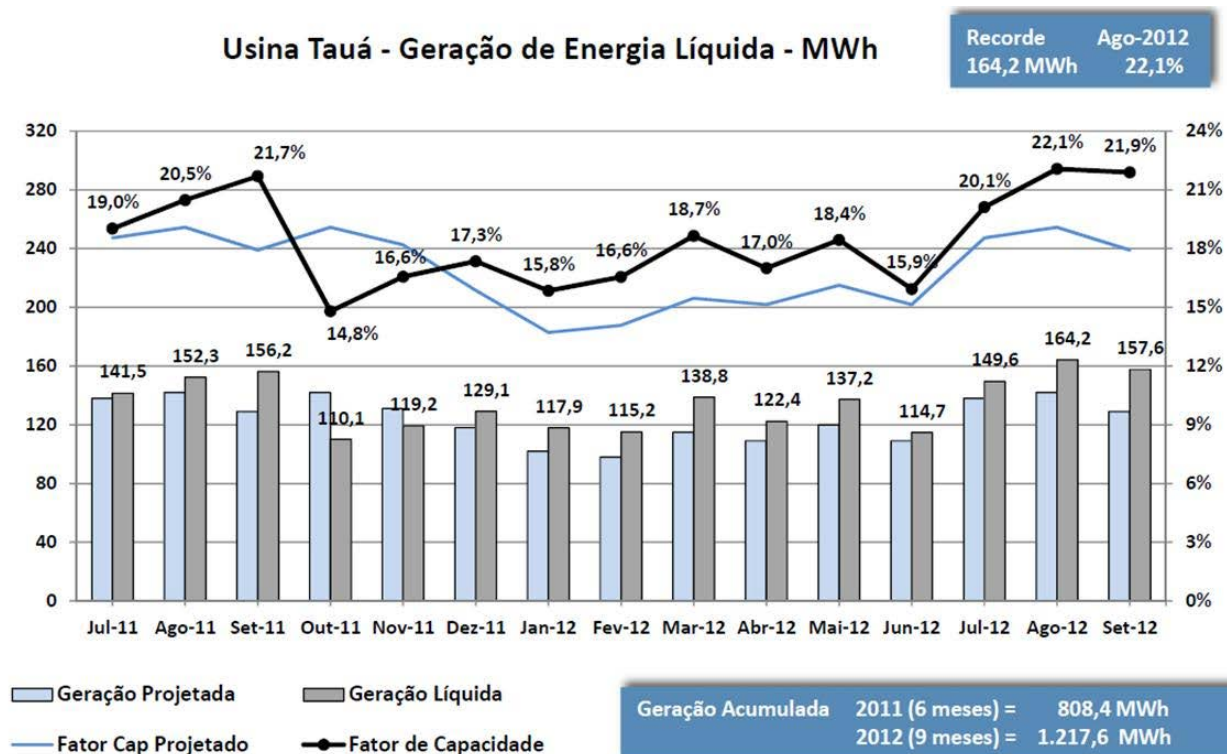
$$FC = \frac{\textit{Produção Efetiva em um ano}}{\textit{Produção Máxima em um ano}} = \frac{1,56 \textit{ GWh}}{8,81 \textit{ GWh}}$$

$$FC = 17,7 \%$$

Deste modo, levando-se em consideração uma estimativa de horas por dia e da potência de geração que totaliza 1,56 GWh ao ano para condições normais de operação, o fator de capacidade projetado para a operação da usina tem uma média anual de 17,7%.

A usina efetuou a etapa de sincronização com a rede elétrica ao final do mês de Maio de 2011, entrando em operação comercial. A partir do segundo mês de operação foi feito um levantamento dos dados da geração de energia para que se pudesse comparar o rendimento real da usina com o que era esperado. Os cálculos, anteriormente citados, referentes ao fator de capacidade projetado para a usina foram realizados utilizando-se as referências históricas de temperaturas médias, nebulosidade, entre outras características ao longo dos meses do ano para assim obter um maior detalhamento da energia que seria gerada, bem como os fatores de capacidade projetados por mês.

Após um ano e três meses de geração, de Julho de 2011 até Setembro de 2012, o gráfico da Figura 3.28 apresenta os principais dados comparativos entre a geração projetada e a geração líquida da usina.



**Figura 3.28 - Geração de Energia Líquida e Projetada de Julho/2011 até Setembro/2012**

Após os quinze (15) meses de geração, percebe-se que apenas em dois meses (Outubro e Novembro de 2011) a geração líquida da usina ficou abaixo do seu valor previamente estimado. No entanto, nos outros treze meses a usina apresentou o fator de capacidade superior ao projetado, superando as expectativas da geração e trazendo grandes benefícios ao empreendimento através da concretização do sucesso de sua implantação.

O recorde de geração de energia da usina ocorreu em Agosto de 2012, em que a usina gerou 164,2 MWh, com um fator de capacidade de 22,1%, bem acima do esperado para este mês.

A tabela da Figura 3.29 apresenta a comparação entre o fator de capacidade projetado e o real, mostrando o aumento da capacidade de geração em todos os meses exceto nos dois meses citados anteriormente.

	Fator de Capacidade Projetado (%)	Fator de Capacidade Real (%)
2011-07	18,8	19,0
2011-08	19,1	20,5
2011-09	17,9	21,7
2011-10	19,0	14,8
2011-11	18,2	16,6
2011-12	16,0	17,3
2012-01	13,8	15,8
2012-02	14,1	16,6
2012-03	15,5	18,7
2012-04	15,1	17,0
2012-05	16,2	18,4
2012-06	15,0	15,9
2012-07	18,6	20,1
2012-08	19,0	22,1
2012-09	18,0	21,9
<b>Média</b>	<b>17,0</b>	<b>18,4</b>

**Figura 3.29 - Fator de Capacidade Real em relação ao Projetado**

No ano de 2011, o fator de capacidade real superou o projetado, atingindo uma média de 18,3% contra 18,2% projetado. Em contínua evolução, a usina apresentou em 2012 um fator de capacidade real maior do que o projetado e também maior do que o real em 2011, totalizando 18,5% real contra 16,1% projetado. A média total nestes 15 meses superou em 1,4% o valor de projeto, atingindo um fator de capacidade real total de 18,4% contra 17,0% projetado para este período.

A geração acumulada da usina neste período ultrapassou 2 GWh, com um total de geração de 808,4 MWh no ano de 2011, mais 1.217,6 MWh de janeiro à setembro de 2012, totalizando 2.026,0 MWh. Estes dados mostram nitidamente o sucesso na implantação do empreendimento da Usina Solar de Tauá que contou, em menos de um ano de operação, com a presença de mais de 1.000 visitantes em seu auditório para conhecimento do processo de geração solar fotovoltaica e para despertar o interesse dos jovens pelos estudos nesta área de atuação.

## 4 Futuras Expansões

### 4.1 Expansão para + 1MW (2º MW)

A Usina Solar de Tauá já possui autorização da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), bem como da Superintendência Estadual do Meio Ambiente do Ceará (SEMACE) para o aumento da sua capacidade, com Licença de Instalação emitida para uma potência de até 5 MW.

A expansão da usina para mais 1 MW, com o objetivo de atingir o seu 2º MW de potência instalada, está em fase de preparação. A área de instalação do 2º MW pode ser vista na Figura 4.1, e fica localizada em frente ao pátio já existente.

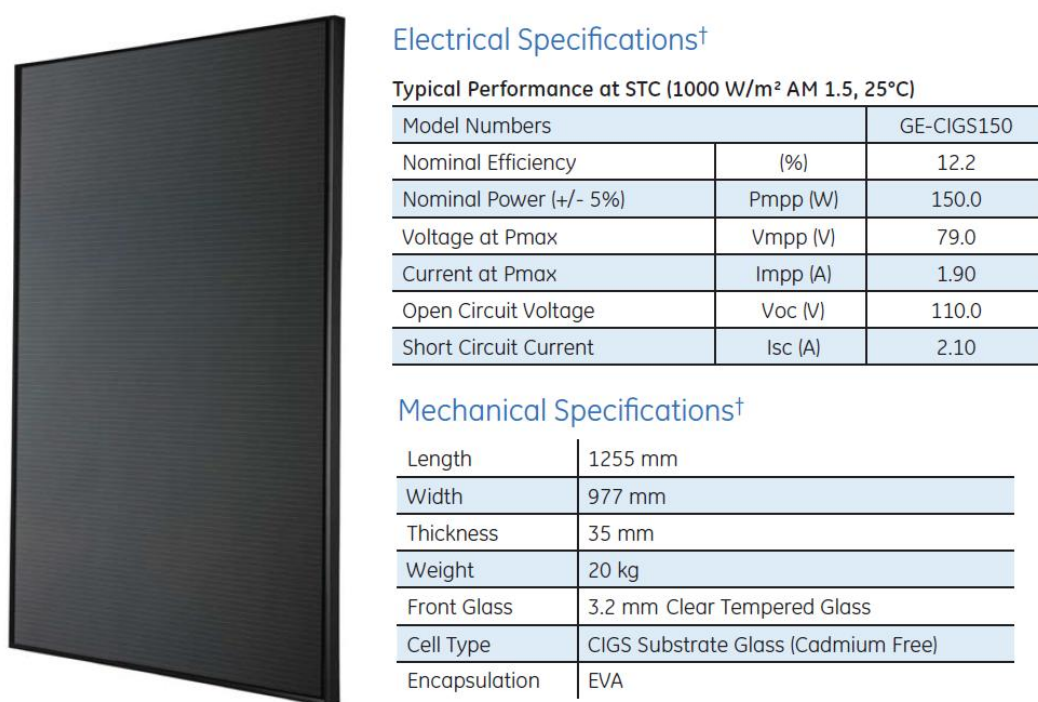


Figura 4.1 - Localização da área aproximada onde será instalado o 2º MW da Usina Solar de Tauá

Para o 2º MW da Usina Solar de Tauá são previstas algumas mudanças de tecnologia. Os painéis solares, que antes eram utilizados em material de silício policristalino, passam agora a utilizar uma tecnologia de Filme Fino CIGS (Selenato de Cobre Gálio Índio -  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$ ). Os painéis desta nova tecnologia são menos sensíveis a altas temperaturas, como é o caso de Tauá. Este seria um dos motivadores a analisar o seu rendimento na geração solar no Brasil.

Os painéis solares de filme fino CIGS apresentam um menor rendimento que os painéis de silício policristalino, sendo necessária a aplicação de um maior número de painéis do que os utilizados na primeira fase do empreendimento. Os módulos solares utilizados serão da fabricante GE – *General Electric*, e apresentam uma tensão de 79 V com corrente de 1,9 A, totalizando uma potência de 150 Wp por módulo. O rendimento dos painéis é de 12,2%.

Esta etapa contará com a instalação de 8.000 painéis solares, chegando a uma potência bruta total de 1,2 MW. A Figura 4.2 mostra uma foto do painel solar de filme fino CIGS da GE, bem como suas principais características elétricas e mecânicas [18].



**Figura 4.2 - Painel Solar de Filme Fino (GE-CIGS150) e suas principais características elétricas e mecânicas [18]**

Outra tecnologia de grande importância no projeto que apresentará mudanças, está relacionada ao processo de conversão CC-CA. Nesta fase de implantação, no lugar dos nove inversores utilizados no 1º MW, será utilizado apenas um inversor de 1.000 kW, mais robusto e refrigerado a água. Este inversor é também da fabricante GE, que disponibiliza ainda o software SunIQ, uma plataforma de controle confiável que inclui as ferramentas e diagnósticos necessários para uma operação segura [19].

O inversor apresenta uma tensão de saída de 480 V em corrente alternada e conta com uma eficiência de 97,5%. A Figura 4.3 inclui uma foto do equipamento e suas principais características técnicas.



**Figura 4.3 - Inversor GE - 1.000 kW e suas principais características técnicas [19]**

As conexões entre os painéis solares e o inversor serão feitas através de caixas de junção da fabricante GE, chamadas *Array Combiner Boxes*. Serão utilizadas 25 caixas de junção para o agrupamento dos painéis, tendo cada grupo de 320 painéis uma potência de 48 kW que é levada a cada caixa de junção. A foto deste equipamento e suas principais características técnicas são apresentadas na Figura 4.4 [20].



Figura 4.4 - Array Combiner Box da Fabricante GE e suas principais características técnicas [20]

As principais mudanças de tecnologia no projeto de expansão da usina solar foram listadas acima. Os demais equipamentos de pátio descritos na implantação do 1º MW deverão seguir a mesma linha de instalação para o 2º MW.

A tabela da Figura 4.5 apresenta uma comparação entre as principais características dos equipamentos utilizados no projeto do 1º MW e do 2º MW.

1º MW	2º MW
Módulos Fotovoltaicos de <b>Silício Policristalino – KYOCERA</b>	Módulos Fotovoltaicos de <b>Filme Fino CIGS – GE</b>
Eficiência dos Módulos: <b>16,0%</b>	Eficiência dos Módulos: <b>12,2%</b>
<b>4.680</b> módulos solares ( <b>215 W</b> )	<b>8.000</b> módulos solares ( <b>150 W</b> )
Tamanho do módulo: <b>1500x990x46mm</b> Peso do módulo: <b>18kg</b>	Tamanho do módulo: <b>1257x977x35 mm</b> Peso do módulo: <b>20kg</b>
Conexão dos Módulos através de <b>18 Caixas de Controle</b> 1 para cada <b>260 Módulos – 56 kW</b> (String Control Boxes - INGETEAM)	Conexão dos Módulos através de <b>25 Caixas de Junção</b> 1 para cada <b>320 Módulos – 48 kW</b> . (Array Combiner Boxes - GE)
<b>9 Inversores de 100/110 kW</b> Refrigerados a ar (um inversor para cada 520 módulos)	<b>1 Inversor de 1.000 kW</b> Refrigerado a água (um inversor para todo o conjunto)

Figura 4.5 - Tabela comparativa com as principais características do 1º MW e do 2º MW

Com o desenvolvimento do projeto do 2º MW da Usina Solar de Tauá, pretende-se agregar conhecimentos relacionados à geração de energia solar no Brasil. Dentre os principais objetivos após a implantação desta nova etapa pretende-se:

- ✓ Comparar diferentes tecnologias de módulos solares, já que a expansão utilizará painéis de filme fino CIGS, permitindo a avaliação da tecnologia mais adequada.
- ✓ Analisar o desempenho de inversores de médio porte contra a utilização dos inversores de pequeno porte instalados no 1º MW.
- ✓ Acompanhar o desempenho da usina em parceria com a UECE (Universidade Estadual do Ceará) - Campos Tauá. Inclusive ajudando estudantes a se integrarem à área de geração e contribuir para o desenvolvimento energético do país.
- ✓ Avaliar as condições de operação da usina face à degradação dos módulos solares.

Assim, o investimento na expansão para mais 1 MW visa compreender o comportamento e a adequação da geração solar às condições brasileiras, correlacionando os dados de irradiação, temperatura, nebulosidade e produção de energia de modo a estabelecer um padrão para o mercado brasileiro dentro da geração de energia fotovoltaica.

## 4.2 Expansão para 50 MW

A usina possui uma área total disponível de 203 hectares e o projeto da Usina Solar de Tauá visa à instalação de módulos complementares para a ampliação gradual da capacidade instalada da usina para até 50 MW. Para esta potência final instalada, a usina será capaz de injetar na rede cerca de 77,4 GWh a cada ano.

A Figura 4.6 mostra o terreno disponível, bem como a ocupação da área de acordo com a potência instalada por etapas.

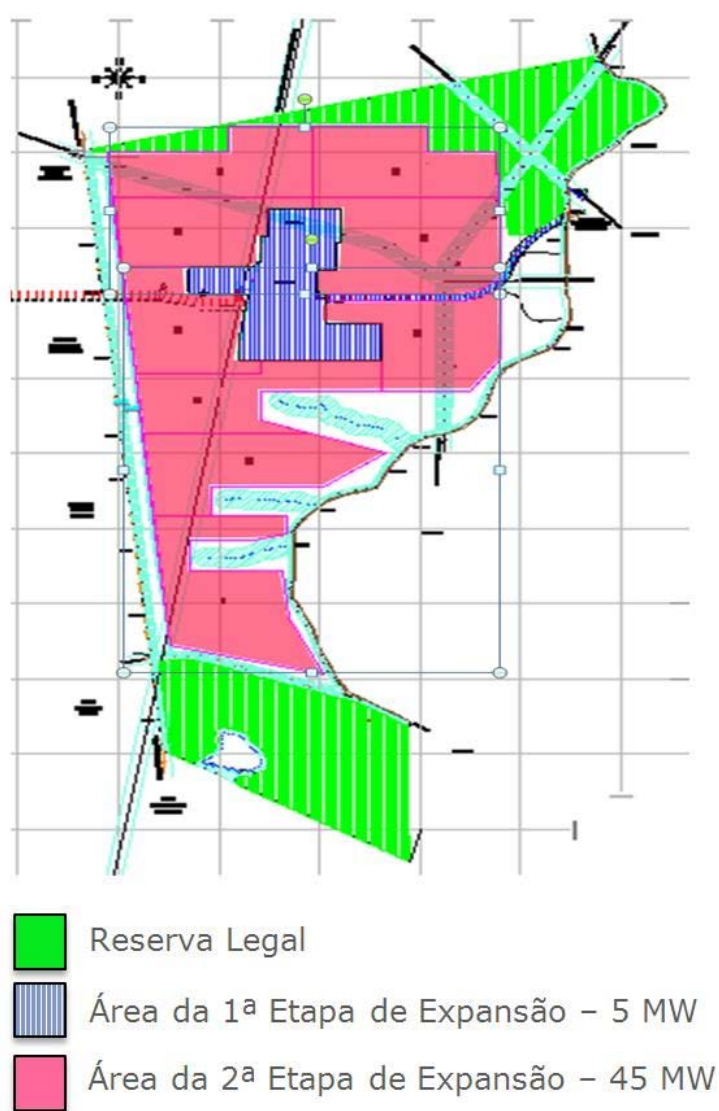


Figura 4.6 - Área ocupada pela Usina Solar Tauá por etapas de sua expansão para até 50 MW

A primeira etapa de expansão (5 MW) já conta com Licença de Instalação emitida e autorizada pela SEMACE. A segunda etapa de expansão, para uma potência final instalada de 50 MW, teve sua licença prévia emitida no mês de agosto de 2012 e agora aguarda a emissão da licença de instalação pela SEMACE.

Para a expansão para 50 MW de potência instalada, estima-se a instalação de 220 mil painéis solares na área disponível, tendo um gasto da ordem de R\$ 170 milhões e a geração de aproximadamente 110 empregos durante a fase de implantação. A concretização desta expansão irá contribuir para o aumento da oferta de energia através de fontes alternativas no Brasil e colaborar diretamente para a consolidação da utilização da energia solar fotovoltaica como fonte de geração de energia viável e confiável para injeção na rede elétrica do país.

## 5 Conclusão

Diante do constante crescimento da população mundial e consequente aumento no consumo dos combustíveis fósseis que ainda constituem a principal fonte de participação na matriz energética mundial, as fontes de energia renováveis despertam grande interesse da sociedade nos dias de hoje. É importante buscar novos meios de geração de energia que não sejam exclusivamente dependentes dos combustíveis fósseis e que exerçam menor agressão ao meio ambiente. Deste modo, o presente projeto apresenta as principais características técnicas da geração solar fotovoltaica e a aplicação direta na geração de energia em escala comercial.

Com a aplicação da teoria da energia solar fotovoltaica à Usina Solar de Tauá de 1 MW foi possível realizar comparações entre os dados projetados e os dados reais obtidos após quinze meses de operação da usina. Os dados obtidos na operação foram satisfatórios, apresentando um fator de capacidade médio total de 18,4% contra 17,0% projetado para o mesmo período, produzindo mais energia do que era esperado.

Visivelmente a usina que opera em escala comercial e diretamente conectada à rede elétrica obteve sucesso na sua implantação. Este marco contribui muito para o futuro da energia solar fotovoltaica no país, visto que o projeto é pioneiro em um cenário em que a experiência com a geração fotovoltaica no Brasil se restringia à instalação de pequenas unidades produtoras com o objetivo de fornecer energia para regiões isoladas.

A usina já está em processo de expansão e primeiramente visa atingir o seu 2º MW com algumas mudanças em relação ao 1º MW. A Usina Solar de Tauá tem como principais objetivos nesta fase realizar a comparação entre diferentes tecnologias de módulos solares e analisar o desempenho de inversores de médio porte contra os de pequeno porte utilizados na implantação do 1º MW, agregando conhecimentos sobre o comportamento e a adequação da geração solar às condições brasileiras.

A Usina Solar de Tauá possui uma área total disponível de 203 hectares que suporta uma ampliação modular visando uma expansão por etapas, para no futuro alcançar uma capacidade instalada total de até 50 MW.

Diante da eficácia do projeto, suas perspectivas de expansão e da superação dos resultados esperados no que diz respeito à geração efetiva de energia na operação do 1º MW, conclui-se que é importante uma maior participação da energia solar fotovoltaica na matriz energética brasileira, intensificando-se a participação do Brasil no mercado mundial de energia complementar e contribuindo para o futuro do país e do mundo com a ampliação das fontes de geração de energia sustentável.

## 6 Bibliografia

- [1] Braga, Renata Pereira. *Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos e Aplicações*. Rio de Janeiro : s.n., 2008.
- [2] *Tutorial de Energia Solar Fotovoltaica CRESESB - CEPEL*. [Online] 11 de Junho de 2008. [Citado em: 21 de Janeiro de 2013.] <http://www.cresesb.cepel.br/content.php?catid=4>.
- [3] *Laboratório Solar Fotovoltaico*. [Online] UFJF, 26 de Maio de 2011. [Citado em: 15 de Maio de 2013.] <http://www.ufjf.br/labsolar/2011/05/26/condicionamento/>.
- [4] *Célula Solar - Wikipédia*. [Online] 18 de Janeiro de 2013. [Citado em: 21 de Janeiro de 2013.] [http://pt.wikipedia.org/wiki/C%C3%A9lula\\_solar](http://pt.wikipedia.org/wiki/C%C3%A9lula_solar).
- [5] *SS Solar*. [Online] [Citado em: 23 de Janeiro de 2013.] <http://www.sssolar.com.br/Energia/detail/4-celulas-solares>.
- [6] *New Solar Energy - Células Solares Monocristalinas*. [Online] [Citado em: 23 de Janeiro de 2013.] <http://www.pvsolarcells.org/pt/monocrystalline-solar-cells.html>.
- [7] *New Solar Energy - Células Solares Policristalinas*. [Online] [Citado em: 23 de Janeiro de 2013.] <http://www.pvsolarcells.org/pt/polycrystalline-solar.html>.
- [8] *Curto Circuito*. [Online] [Citado em: 23 de Janeiro de 2013.] [http://www.curto-circuito.com/index.php?main\\_page=product\\_info&cPath=225\\_226&products\\_id=1553&zenid=s1mmctknmtrnojrav7582lvo2](http://www.curto-circuito.com/index.php?main_page=product_info&cPath=225_226&products_id=1553&zenid=s1mmctknmtrnojrav7582lvo2).
- [9] CEPEL, Grupo de Trabalho de Energia Solar - GTES / CRESESB. *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*. Rio de Janeiro : Edição Especial PRC - PRODEEM, 2004.
- [10] *Energia Solar Fotovoltaica - Sistemas Conectados à Rede Elétrica*. [Online] [Citado em: 15 de Maio de 2013.] [http://www.osetoreletrico.com.br/web/documentos/fasciculos/Ed82\\_fasc\\_energias\\_renovaveis\\_cap10.pdf](http://www.osetoreletrico.com.br/web/documentos/fasciculos/Ed82_fasc_energias_renovaveis_cap10.pdf).
- [11] *European Photovoltaic Industry Association*. [Online] [Citado em: 15 de Maio de 2013.] <http://www.epia.org/home/>.

- [12] *SOLAR TAUÁ - Preparando-se Para o Futuro*. Energia, MPX. Rio de Janeiro : s.n., 2012.
- [13]. INMET. *Instituto Nacional de Meteorologia*. [Online] <http://www.inmet.gov.br/>.
- [14] KYOCERA. *Kyocera Solar*. [Online] [Citado em: 22 de Maio de 2013.] <http://www.kyocerasolar.com.au/assets/001/5424.pdf>.
- [15] String Control. *INGETEAM*. [Online] [Citado em: 23 de Maio de 2013.] [http://www.ingeteam.it/en/energy\\_division/photovoltaic/ingecon\\_sun\\_string\\_control/](http://www.ingeteam.it/en/energy_division/photovoltaic/ingecon_sun_string_control/).
- [16] Three Phase Inverter. *INGETEAM*. [Online] [Citado em: 23 de Maio de 2013.] <http://www.ingeteam.com/EN/ProductsandServices/Energy/Photovoltaic/Products.aspx?TIPO=PTD&ITEMID=157&IDIOMA=EN&PRT=SBP&PRTID=2>.
- [17] *Wikipédia*. [Online] [Citado em: 13 de Junho de 2013.] [http://pt.wikipedia.org/wiki/Fator\\_de\\_capacidade](http://pt.wikipedia.org/wiki/Fator_de_capacidade).
- [18] CIGS Thin Film Solar Module. *GE - General Eletric*. [Online] [Citado em: 18 de Junho de 2013.] [http://www.ge-energy.com/content/multimedia/\\_files/downloads/CIGS%20Thin%20Film%20Solar%20Module%20145%20W,%20150%20W.pdf](http://www.ge-energy.com/content/multimedia/_files/downloads/CIGS%20Thin%20Film%20Solar%20Module%20145%20W,%20150%20W.pdf).
- [19] Utility Scale Solar Solutions. *GE Power*. [Online] 18 de Junho de 2013. [http://www.ge-energy.com/content/multimedia/\\_files/downloads/GEA17910B\\_UtilityScaleSolarBroch\\_r7.pdf](http://www.ge-energy.com/content/multimedia/_files/downloads/GEA17910B_UtilityScaleSolarBroch_r7.pdf).
- [20] Balance of System Electrical Components. *GE EverGold™*. [Online] [Citado em: 19 de Junho de 2013.] <http://www.geindustrial.com/publibrary/checkout/DEA-541?TNR=Brochures|DEA-541|generic>.