UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

ESCOLA DE MINAS

COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO - CECAU

TADEU ASSIS MIRANDA

DESENVOLVIMENTO DE UMA USINA FOTOVOLTAICA LIGADA A REDE EM OURO PRETO

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA

DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Ouro Preto, 2014

TADEU ASSIS MIRANDA

DESENVOLVIMENTO DE UMA USINA FOTOVOLTAICA LIGADA À REDE EM OURO PRETO

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Marcos Barros Monteiro

Co-orientador: Prof. Dr. Luiz Fernando Rispoli Alves

Ouro Preto

Escola de Minas – UFOP

Dezembro/2014

AGRADECIMENTO

Agradeço acima de tudo a Deus pela vida e saúde, e por ter me dado esta oportunidade incrível. Minha mãe Lenir, por ser meu porto seguro, dando carinho e por sempre acreditar em mim. Ao meu pai Miranda (*in memoriam*) que foi meu maior incentivador e exemplo, me ensinando valores que levarei para o resto da vida. Aos meus irmãos Tiago e Lívia pelo companheirismo e amizade. Obrigado ao Colégio Dom Bosco e Colégio São Francisco Xavier, por terem me dado a base de todo conhecimento que apliquei na universidade. À Universidade Federal de Ouro Preto, em especial aos professores do DECAT: Paulo Monteiro, Rispoli e Cocota Jr., que foram grandes inspiradores e incentivadores na minha vida acadêmica. A Fundação Gorceix, pelo auxilio fundamental para minha manutenção financeira. Agradeço a cidade de Ouro Preto e a todos os amigos que ganhei. A Rep. MAIZONA, minha segunda família e a todos seus moradores e ex-alunos que participaram do meu dia-a-dia, proporcionando momentos incríveis.

RESUMO

Neste trabalho são apresentados os princípios físicos que envolvem a geração de energia fotovoltaica e os princípios para desenvolver uma instalação elétrica de alta potência ligada à rede de distribuição. O sol é descrito como a fonte de energia de uma instalação solar, com sua irradiação diária e os ângulos formados por ele que influenciam no rendimento anual. Também, de acordo com estes ângulos, tem a descrição de como posicionar os módulos solares para um melhor rendimento. É mostrada a história da energia fotovoltaica, tipos de tecnologias existentes e quais os valores especificados pelos fabricantes dos equipamentos que são relevantes para um projetista analisar. Também é descrito brevemente o funcionamento dos inversores e a importância deles na geração de energia. Finalmente é desenvolvido um projeto técnico completo de uma usina fotovoltaica gerando 500 kWp ligada a rede, nas condições do município de Ouro Preto. São explicados todos os cálculos que envolvem o dimensionamento e as observações relevantes para que a instalação seja segura e confiável.

Palavras-chaves: Energia fotovoltaica, ligada à rede, energia renovável, módulos fotovoltaicos.

ABSTRACT

In this paper the physical principles that involve the generation of photovoltaic energy and principles to develop a high-power electrical installation connected to the grid will be shown. The sun is described as the source of energy from a solar facility with their daily irradiation and the angles formed by him to influence the annual income. Also, according to these angles, there will be a description of how to place the solar modules for better performance. The history of photovoltaic energy, types of technologies and what the values specified by equipment manufacturers that are relevant to a designer look will be shown. Will also be briefly described the operation of the inverters and their importance in power generation. Finally a complete technical design of a 500 kWp photovoltaic power plant grid tied, in terms of Ouro Preto, will be developed. Will be explained all calculations that involve the design and relevant observations so that the installation will be safe and reliable.

Keywords: Photovoltaic energy, grid-tie, renewable energy, photovoltaic modules.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 8

1.1 Objetivo Geral 9

1.2 Objetivos Específicos 10

1.3 Justificativa do Trabalho 10

1.4 Metodologia Proposta 11

1.5 Estrutura do Trabalho 11

2 RADIAÇÃO SOLAR 12

2.1 Irradiância Solar 13

2.2 Insolação 13

3 ORIENTAÇÃO DAS PLACAS FOTOVOLTAICAS 15

3.1 Ângulos solares 15

3.2 Declinação e altura solar 16

3.3 Ângulo de incidência dos raios solares 17

3.4 Espaçamento de módulos em usinas solares 18

4 PLACAS FOTOVOLTAICAS 19

4.1 História da energia fotovoltaica 19

4.2 Célula Fotovoltaica 19

4.2.1 Tipos de células 21

4.3 Conceitos elétricos de uma placa fotovoltaica 22

4.3.1 Efeitos de fatores ambientais sobre a saída do dispositivo 23

5 INVERSORES 25

5.1 Princípio de funcionamento 25

5.2 Especificações importantes do inversor 26

6 MODELAGEM DA INSTALAÇÃO FOTOVOLTAICA 27

6.1 Escolha das componentes da instalação 27

6.1.1 Módulo fotovoltaico 27

6.1.2 Inversor 28

6.2 Modelagem dos painéis fotovoltaicos 29

6.3 Modelagem dos inversores 32

6.4 Conclusão da modelagem dos módulos fotovoltaicos e inversor 37

6.5 Dimensionamento da estrutura física da instalação fotovoltaica 38

6.5.1 Dimensionamento da estrutura 38

6.5.2 Espaçamento entre strings 40

6.5.3 Posição do arranjo de módulos fotovoltaicos e do inversor 41

6.6 Cálculo das instalações elétricas 43

6.6.1 Cálculo das seções 43

6.6.2 Centro de transformação e distribuição 46

6.6.3 Dispositivos de segurança 48

7 CONCLUSÃO 51

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 52

1 INTRODUÇÃO

A demanda por novas tecnologias de produção energética cada vez mais limpas e eficientes, cria novas oportunidades para desenvolvimento de produtos que antes poderiam ser considerados utopias. Em vista desses e outros motivos, vê-se que as empresas estão há algum tempo modernizando-se, criando iniciativas e desenvolvendo soluções.

Energia solar é um termo que se refere ao uso da luz e do calor do sol através de tecnologias como aquecimento solar, energia solar fotovoltaica, energia heliotérmica, entre outras. Meu trabalho será focado em energia solar fotovoltaica, que consiste de geração de energia limpa a partir de placas de silício monocristalinas, policristalinas ou capa fina.

As vantagens da energia solar ficam evidentes quando os custos ambientais de extração, geração, transmissão, distribuição e uso final de fontes fósseis de energia são comparados à geração de fontes renováveis.

Este método de conversão energética (fotovoltaico) apresenta como grandes vantagens sua extrema simplicidade, a inexistência de qualquer peça mecânica móvel, os curtos prazos de instalação, o elevado grau de confiabilidade dos sistemas e sua baixa manutenção. Além disto, sistemas solares fotovoltaicos representam uma fonte silenciosa, não poluente e renovável de energia elétrica bastante adequada à integração no meio urbano, reduzindo quase que completamente as perdas por transmissão da energia devido à proximidade entre geração e consumo (CIAMBERLINIA et.al., 2001).

Conforme dados do relatório “Um banho de sol para o Brasil” do Instituto Vitae Civilis, o Brasil, por sua localização e extensão territorial, recebe energia solar da ordem de 1013 MWh (mega watts hora) anuais, o que corresponde cerca de 50 mil vezes o seu consumo anual de eletricidade no país (RÜTHER, 1999).

No Brasil, entre os esforços mais recentes e efetivos de avaliação da disponibilidade de radiação solar, destacam-se os seguintes campos: a) Atlas Solarimétrico do Brasil, iniciativa da Universidade Federal de Pernambuco e da Companhia Hidroelétrica do São Francisco, em parceria com o Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. b) Atlas de Irradiação Solar no Brasil, elaborado pelo Instituto Nacional de Meteorologia e pelo laboratório de energia solar da Universidade Federal de Santa Catarina (ENERGIA SOLAR, 2014).

É notório o crescimento do investimento em fontes renováveis de energia. No caso da energia solar fotovoltaica, entre os anos de 2011 e 2012, houve um crescimento de 597,1% na capacidade instalada de geração elétrica no Brasil, de acordo com o Plano Decenal de Energia, realizado pela Empresa de Planejamento Energético, nos referidos anos. Diante desses dados a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) divulgou em 2013 normas regulamentando o sistema fotovoltaico, que se trata de compilações de normas europeias, com adaptações pontuais ao sistema brasileiro (OLIVEIRA, 2014).

Com os avanços da tecnologia e a significativa redução de seus custos, além das urgências de ordem ambiental, a produção de energia fotovoltaica teve as suas aplicações ampliadas e se inseriu crescentemente no mercado mundial.

Nesse projeto haverá um estudo sobre o princípio da irradiação solar e o funcionamento de uma célula fotovoltaica, importância do estudo da região onde o empreendimento vai ser instalado, com seus históricos de irradiação solar durante o ano. Também terá o estudo e dimensionamento de inversores voltados exclusivamente para esse tipo de aplicação, estudo de perdas energéticas em todo processo, inclusive cabos, além de dimensionamento e desenho de toda instalação, para uma produção otimizada de energia solar.

1.1 Objetivo Geral

Realizar um estudo acerca da tecnologia envolvida em uma instalação fotovoltaica, bem como nos cálculos e dimensionamentos de todos os processos em sua produção, tendo como base documentos e pesquisas publicadas na atualidade, além das normas e leis brasileiras que estão envolvidas. A partir desse estudo, fazer todo desenvolvimento de uma planta de uma usina fotovoltaica. A figura 1.1 ilustra uma usina fotovoltaica ligada a rede.

Figura 1. Erro! Use a guia Página Inicial para aplicar 0 ao texto que deverá aparecer aqui. **- Usina fotovoltaica ligada a rede.**

Fonte: HERNANDEZ, 2013.

1.2 Objetivos Específicos

- Estudo teórico acerca das células fotovoltaicas – origem, novas tecnologias, sua trajetória e atual situação no mercado;
- Estudo teórico acerca da fonte energética, o Sol;
- Estudo sobre os inversores oferecidos pelo mercado para esses fins;
- Cálculo e dimensionamento de todas as variáveis importantes para esse tipo de instalação;
- Fornecer material de consulta para estudantes do curso de Engenharia de Controle e Automação que desejam trabalhar ou apenas conhecer mais a respeito do assunto, de forma prática e esclarecedora.

1.3 Justificativa do Trabalho

Com o crescimento populacional e industrial no mundo, cada vez mais se aumenta a demanda energética. A energia solar é uma das alternativas energéticas mais promissoras desse novo milênio, já que é inesgotável, tanto como fonte de luz quanto de calor.

A energia solar é importante na preservação do meio ambiente, pois entre suas vantagens sobre outras fontes de energia, tem o fato de ser limpa. Com o avanço da tecnologia das células fotovoltaicas, o custo e o baixo rendimento, que sempre foram motivos para dificuldade da produção em grande escala dessa energia, estão diminuindo, e chamando atenção de investidores e governos, principalmente o ultimo, por conta dos novos acordos mundiais do Meio Ambiente, e o novo “dinheiro” internacional, chamado Crédito de Carbono.

Vale ressaltar que no Brasil, onde o local menos ensolarado recebe cerca de 40 % mais radiação solar do que o local mais ensolarado da Alemanha, que é a maior produtora mundial. Esta energia é usada apenas no programa do Ministério de Minas e Energia, Luz para Todos, com 12 mil residências instaladas pela companhia de eletricidade da Bahia, a Coelba. Há uma demanda muito maior, avaliada em 120 mil residências, apenas na região amazônica (HOLM, 2007).

Os sistemas fotovoltaicos integrados às edificações e interligados à rede elétrica são vantajosos à concessionária elétrica local, no sentido de aliviar picos de consumo na rede, aumentando assim a vida útil do sistema de transmissão e distribuição e adiando os grandes investimentos e longos prazos de instalação envolvidos na construção de centrais elétricas convencionais (RÜTHER, 1998).

Este projeto tem por intuito trabalhar por conta dessas questões, a fim de divulgar a energia solar como uma fonte promissora.

1.4 Metodologia Proposta

Inicialmente serão estudados os fundamentos da energia solar, como ciclos do sol, irradiação, tempo e inclinação da incidência durante o ano. Também os tipos de células fotovoltaicas, suas formas de fabricação e características. Será desenvolvido um projeto de minigeração de energia elétrica a partir da energia solar.

Por fim haverá uma discussão acerca dos resultados obtidos, suas implicações, complicações e facilidades.

1.5 Estrutura do Trabalho

Este trabalho foi dividido em sete capítulos. O primeiro apresenta um contexto introdutório sobre o trabalho; no capítulo 2 apresentam-se considerações gerais sobre a radiação solar, unidades de medida, potencial para este tipo de aplicação. No capítulo 3 é apresentada a influência do sol e do movimento da Terra no posicionamento dos módulos solares, para um melhor proveito da radiação durante seu ciclo anual, bem como os ângulos que afetam essas escolhas. No capítulo 4 há uma apresentação dos módulos fotovoltaicos, que são as fontes produtoras de energia da instalação. Tem-se uma breve história de seu surgimento, princípio de funcionamento e valores técnicos importantes. Em seguida, são apresentadas brevemente o principio de funcionamento dos inversores e sua importância na instalação elétrica. No capítulo 6 será o desenvolvimento do projeto, que será uma instalação fotovoltaica localizada no município de Ouro Preto. Por fim, no último capítulo são tratadas as conclusões e considerações finais.

2 RADIAÇÃO SOLAR

Energia fotovoltaica é considerada uma fonte de produção promissora para o futuro, pois engloba interesses importantes das pessoas de hoje: emissões zero, pequena área de instalação e o principal, fonte inesgotável.

A fonte de energia é o sol. A maior parte da energia irradiada por ele (cerca de 62,5MW/m² em sua superfície) é transportada por forma de ondas eletromagnéticas (fótons) e pouca parte dessa irradiação chega na superfície terrestre, mesmo assim, a cada minuto incide sobre a superfície da terra mais energia vinda do Sol do que a demanda de todos os habitantes do planeta em um ano (IBRIK et.al., 2004). Os fótons também se colidem com várias superfícies na atmosfera e no solo da Terra, de forma a refletirem e mudarem de direção, essas são conhecidas como radiação difusa (HERNANDEZ, 2013).

Por outro lado, a radiação solar não chega de forma uniforme na terra, ela varia segundo a hora do dia, a inclinação estacional do globo em relação ao sol, ao movimento da Terra e a absorção solar por parte da atmosfera.

O painel fotovoltaico recebe a soma da radiação direta com a radiação difusa, sendo chamada de radiação global, como visto na figura 2.1.

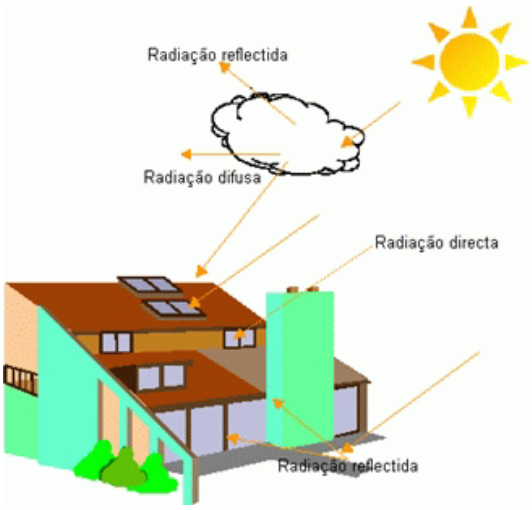


Figura 2.1 - Radiações solares que atingem a superfície.

Fonte: HERNANDEZ, 2013.

2.1 Irradiância Solar

Uma grandeza empregada para quantificar a radiação solar é a irradiância, expressa na unidade de W/m² (watt por metro quadrado). Trata-se de uma unidade de potência por área. Como se sabe, a potência é uma grandeza física que expressa a energia transportada durante certo intervalo de tempo (VILLALVA; GAZOLI, 2013).

Segundo Villalva e Gazoli (2013) a irradiância na superfície terrestre é em torno de 1000 W/m². Esse valor é adotado como padrão na indústria fotovoltaica para a especificação e avaliação de células e módulos solares

A figura 2.2 mostra um gráfico típico da irradiância solar ao longo de um dia. Em cada instante de tempo é realizada uma medida. Fazendo a integração dos valores ao longo do tempo, ou seja, calculando a área embaixo da curva, obtém-se o valor da energia recebida do Sol durante o dia por unidade de área, denominada insolação.

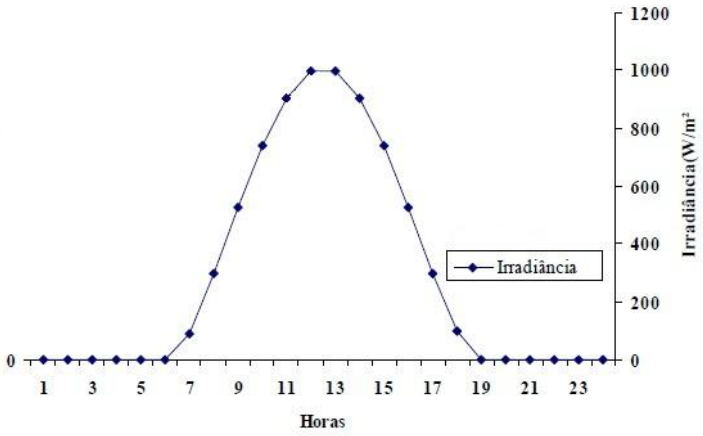


Figura 2.2 – Irradiância solar ao longo do dia.

Fonte: HERNANDEZ, 2013.

2.2 Insolação

A insolação é a grandeza utilizada para expressar a energia solar que incide sobre uma determinada área ao longo de um determinado intervalo de tempo. Sua unidade é o Wh/m² (watt-hora por metro quadrado).

Estações meteorológicas com sensores de radiação solar são empregadas para fazer o levantamento da insolação em vários pontos do globo terrestre (VILLALVA; GAZOLI, 2013). Assim, para uso prático de análise e dimensionamento de instalações fotovoltaicas, existem bancos de dados e atlas de países e do mundo com valores médios de insolação diária, mensal e anual.

Com base na 2ª Edição do Atlas de Energia Elétrica do Brasil (2005), a insolação média diária no Brasil está entre 4500 e 6100 Wh/m², que são a pior e maior respectivamente no território brasileiro. É importante destacar que a insolação de um determinado local é diferente para cada época do ano e mesmo durante o dia, pois é influenciado pelo clima e quantidade de nuvens no céu.

3 ORIENTAÇÃO DAS PLACAS FOTOVOLTAICAS

Para um funcionamento otimizado da instalação fotovoltaica, tem-se que fazer um estudo sobre a direção dos raios solares e como isso afeta a escolha da orientação das placas para que aproveite ao máximo o sol durante um dia inteiro.

Os raios solares são ondas eletromagnéticas paralelas entre si que chegam a Terra em linha reta. Ao cruzar a atmosfera terrestre, os raios sofrem o efeito da difusão e são desviados e refletidos em todas as direções, mas a maior parte deles, que corresponde a radiação direta, continua sua trajetória em linha reta (VILLALVA; GAZOLI, 2013).

Como não podemos fazer nada para melhorar a captação da radiação difusa, por ela chegar de maneira bem aleatória e irregular, temos como objetivo aproveitar ao máximo a radiação direta.

3.1 Ângulos solares

Alguns ângulos solares são importantes de se levar em conta, pois têm grande influência no rendimento global da produção de energia fotovoltaica. Um deles é o ângulo azimutal, que é a orientação dos raios solares em relação ao norte geográfico. O Sol, em sua trajetória no céu desde o nascente até o poente, descreve diferentes ângulos azimutais ao longo do dia (BENITO, 2011). Isso significa que se uma pessoa no hemisfério sul estiver olhando para o norte, verá o sol se movimentando da direita para a esquerda durante o dia, e ao meio-dia, o sol estará exatamente a sua frente, ou seja, azimutal igual a zero. Na figura 3.1 é mostrado os ângulos solares dado uma referência.

Uma instalação correta de uma placa fotovoltaica deve levar em conta esse movimento solar. A melhor maneira de um painel fixo ser colocado é orientando-o para o norte geográfico. Caso a instalação esteja no hemisfério norte, a face da placa deve ser voltada para o sul geográfico.

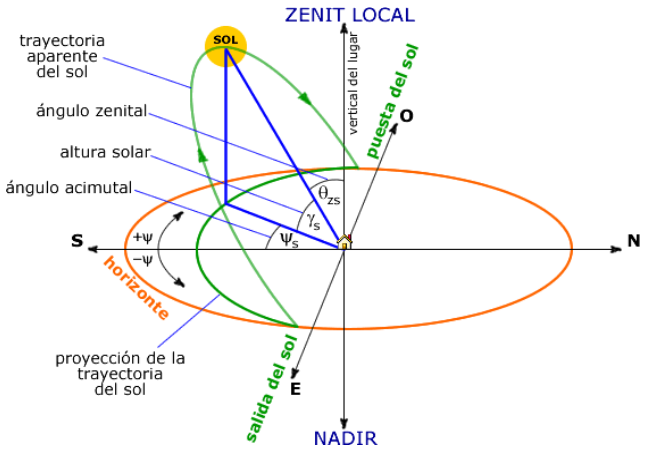


Figura 3.1 – Ângulos solares.

Fonte: HERNANDEZ, 2013.

3.2 Declinação e altura solar

A declinação solar é o ângulo dos raios solares com relação ao plano do equador. Esse ângulo é consequência da inclinação do eixo de rotação da Terra. Nos solstícios de inverno e verão, que marcam o início das respectivas estações, o ângulo de declinação solar é o máximo (BENITO, 2011).

Devido a essa declinação solar, o sol nasce e se põe em diferentes alturas no céu ao decorrer do ano. Durante o inverno o sol se movimenta em ângulos baixos, já no verão, em ângulos altos, como observado na figura 3.2.

A análise desse ângulo, principalmente durante o solstício de inverno, onde o sol possui a menor altura solar do ano, vai ser de suma importância quando se dimensionar o espaçamento das placas para evitar que a sombra da posterior prejudique a produção da placa anterior.

O valor do ângulo da altura solar depende da localização geográfica do observador e do ângulo da declinação solar. Os observadores próximos da linha do equador enxergam alturas solares maiores, enquanto os mais próximos dos polos terrestres enxergam aturas menores, mesmo durante o verão.

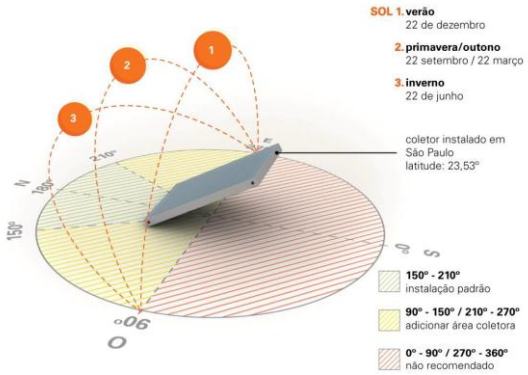


Figura 3.2 – Altura do sol em determinadas épocas do ano.

Fonte: Manual técnico para projetos e construção de aquecimento solar e gás natural, 2011.

3.3 Ângulo de incidência dos raios solares

A maior parte dos sistemas fotovoltaicos possui ângulo fixo de inclinação. Para se escolher esse ângulo tem-se que adotar algum critério, pois a escolha incorreta reduz a captação dos raios solares e compromete a produção de energia elétrica pelo módulo.

Naturalmente, com o módulo em uma posição fixa, não tem como maximizar a captação de energia em todos os dias ou meses do ano, mas é possível escolher um ângulo que possibilite uma boa produção média de energia ao longo do ano.

Existem vários métodos para a escolha desse ângulo de inclinação da placa, e nenhum é um método universal. Cada local do planeta as condições de implantação do sistema muda, e também o tipo de clima predominante.

Segundo Villalva e Gazoli, é possível determinar para uma latitude geográfica um ângulo de inclinação que possibilite uma boa produção média de energia, que seria a adoção de uma regra simples escolhida por muitos fabricantes de placas fotovoltaicas, apresentada na tabela 1.

Tabela 1 – Escolha do ângulo de inclinação do módulo.

Latitude geográfica do local	Ângulo de inclinação recomendado
0° a 10°	α = 10°
11° a 20°	α = latitude
21° a 30°	α = latitude + 5°
31° a 40°	α = latitude + 10°
41° ou mais	α = latitude + 15°

Fonte: VILLALVA; GAZOLI, 2013.

3.4 Espaçamento de módulos em usinas solares

Instalações fotovoltaicas grandes, como a que vai ser proposta neste projeto, são construídas com fileiras de placas solares colocadas uma atrás das outras. Nesse tipo de instalação deve-se calcular corretamente a distância entre as strings (placas em séries) para que não façam sombras uns aos outros. A presença de sombra nos módulos fotovoltaicos é extremamente prejudicial ao desempenho da instalação e deve sempre ser dimensionada de forma correta.

A distância entre as placas deve levar em conta a maximização da produção de energia. Para isso utilizam-se relações trigonométricas para calcular essas distâncias.

Com base na figura 3.3, tem-se primeiramente que calcular o ângulo de inclinação da placa para descobrir a altura “B”. Também temos que levar em conta o dia em que o sol irá se manter mais baixo durante seu ciclo diário. Esse dia é denominado solstício de inverno, e é quando a projeção da sombra será a mais longa durante o ano. Assim, a partir do que será a pior hipótese de projeção da sombra, tem-se o ângulo α.

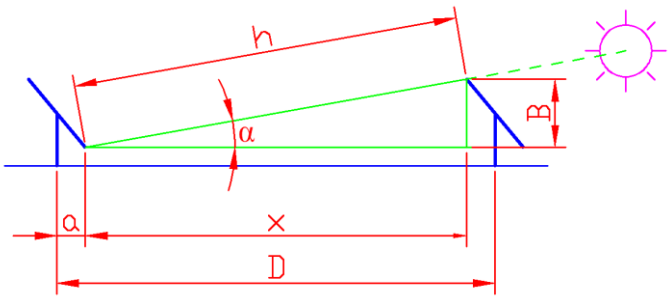


Figura 3.3 – Estudo das sombras das placas solares.

Fonte: HERNANDEZ, 2013.

4 PLACAS FOTOVOLTAICAS

4.1 História da energia fotovoltaica

A energia solar surgiu como muitas descobertas acadêmicas, por obra do acaso. O efeito fotovoltaico foi observado em 1839 pelo físico francês Alexandre Edmond Becquerel. O jovem conduzia experiências eletroquímicas quando verificou que a exposição à luz de eletrodos de platina ou prata gerava uma pequena diferença de potencial, dando origem ao efeito fotovoltaico (BREVE HISTÓRIA DA ENERGIA SOLAR, 2014).

Na sequência desta descoberta, Adams e seu aluno Richard Day desenvolveram em 1877 o primeiro dispositivo sólido de produção de eletricidade a partir de fótons, um filme de selênio depositado num substrato de ferro em que um fio de ouro muito fino servia de contato. Sua eficiência de conversão era de aproximadamente 0.5% (BREVE HISTÓRIA DA ENERGIA SOLAR, 2014).

A primeira célula solar moderna foi apresentada em 1954. Foi aplicada como fonte de alimentação de uma rede telefônica no Estado de Geórgia, nos EUA. Tinha apenas dois centímetros quadrados de área e uma eficiência de 6%, gerando 5,0 mW de potência elétrica. Cinquenta anos depois, em 2004, foram produzidos cerca de um bilhão de células, com eficiência da ordem dos 24,7%, alcançando a capacidade instalada mundial de energia solar superior a 8,2 GW em 2008, cerca de 57% da capacidade instalada de Itaipu. (AMBIENTEBRASIL, 2014)

4.2 Célula Fotovoltaica

As placas solares são compostas por células fotovoltaicas, que são as verdadeiras fontes geradoras de energia. Elas são feitas de silício, um material semicondutor, ou seja, possui características intermédias entre um condutor e um isolante.

Na modelagem com base nos fenômenos físicos, as células solares cristalinas são descritas como dispositivos semicondutores nos quais ocorre o efeito fotovoltaico, convertendo a energia de fótons em pares elétrons – lacunas, que ao se deslocarem são coletados por um campo elétrico localizado em uma junção homogênea ou heterogênea. Para que a conversão fotovoltaica ocorra e necessário separar os elétrons e lacunas gerados pela luz e coleta-los em contatos externos. Isto requer um campo elétrico interno, que pode ser gerado em semicondutores, por exemplo, por junções homogêneas ou junções heterogêneas. Quando se

forma uma junção homogênea com materiais dos tipos p e n, haverá uma região de depleção onde não existem elétrons nem lacunas livres para a condução. Nos semicondutores a absorção de luz é um processo não-homogêneo, com aumento da condutividade, e a geração de pares elétrons - lacunas e um processo não-equilibrado. Os modelos de células solares, formadas por junção p-n (campo elétrico interno), desenvolvidos com base no estudo da fotocondutividade fornecem informações sobre as propriedades óticas do semicondutor, tais como, processo de recombinação e eficiência quântica (MACHADO NETO, 2006 apud MÖLLER, 1993). Enquanto a luz continuar a incidir, o fluxo de elétrons se manterá. A intensidade de corrente gerada irá variar proporcionalmente conforme a intensidade da luz. O princípio fotovoltaico é ilustrado na figura 4.2.1.

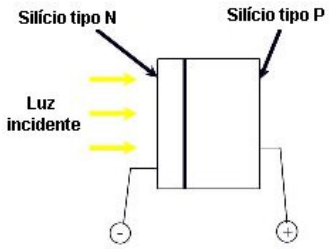


Figura 4.2.1 – Princípio fotovoltaico.

Fonte: HERNANDEZ, 2013.

Cada placa solar é composta por várias células fotovoltaicas ligadas em série, de forma que a tensão vai se acumulando de célula a célula (figura 4.2.2). Para evitar que um curto-circuito em um dos módulos (por exemplo, uma sombra parcial na placa) corte a produção de toda placa, se utiliza diodos by-pass para evitar interrupções e inutilidade da componente inteira.

Com esse princípio vemos o porquê da utilização de energia solar ser promissora, limpa e inesgotável. Com o avanço das tecnologias e aumento da demanda, se espera a redução do custo por kW de energia produzida.

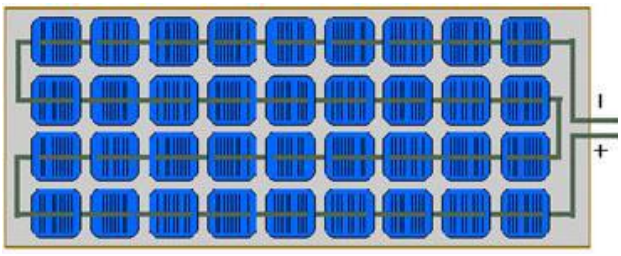


Figura 4.2.2 – Ligação das células fotovoltaicas em série em uma placa solar.

Fonte: HERNANDEZ, 2013.

4.2.1 Tipos de células

Existem basicamente três tipos de células fotovoltaicas, conforme o método de fabricação:

- **Silício monocristalino:** fazem parte da primeira geração de tecnologia de fabricação das placas. Possuem um rendimento relativamente elevado (geralmente acima de 16%), mas as técnicas de produção são complexas e caras. Feitas a partir de barras cilíndricas de silício – por isso tem como característica células quadradas com as extremidades curvadas (SOLARTERRA, 2014).
- **Silício policristalino:** também fazem parte da primeira geração. Têm um rendimento um pouco menor que o monocristalino, mas seu custo de fabricação é um pouco menor por gastar menos energia. Ele é obtido por fusão do silício puro em moldes especiais, e nesse processo, os átomos não se organizam num único cristal, provendo sua característica policristalina (SOLARTERRA, 2014).
- **Capa fina:** também conhecido como filme fino (thin film), faz parte da segunda geração de células fotovoltaicas. Elas são feitas por deposição de camadas muito finas de silício ou outro material semicondutor sobre superfícies de vidro ou metal. Possui um custo de produção bem baixo, mas em contra partida seu rendimento também é bem limitado (em torno de 4 a 10%). Outra desvantagem é o fato de ter um processo de degradação ao longo de sua vida útil (PORTALENERGIA, 2014).

Pode-se ver a diferença, em aparência, dos diferentes tipos de células pela figura 4.2.3.

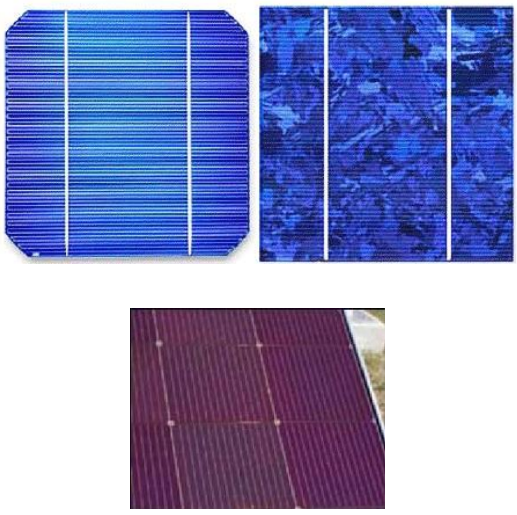


Figura 4.2.3 – Silício monocristalino (esq.); Silício policristalino (dir.); Módulo de capa fina (abaixo);

Fonte: HERNANDEZ, 2013.

Já existe a terceira geração de células fotovoltaicas. Elas ainda são apenas feitas em laboratório e sua utilização alcança somente atividades espaciais. Sua característica é que possui varias camadas de células solares, de forma que consegue absorver mais espectros da luz. Nos laboratórios da Fraunhofer ISE, instituto alemão de energia solar, chegou a uma eficiência recorde de 44,7%. (DIMROTH, 2013).

4.3 Conceitos elétricos de uma placa fotovoltaica

A característica elétrica mais importante de se observar no funcionamento de um dispositivo fotovoltaico é a curva de corrente-tensão da saída. O módulo solar pode ser visto como uma caixa preta com dois conectores produzindo uma corrente *I* a uma determinada tensão *V*.

Os modelos de geradores fotovoltaicos na forma de circuitos elétricos equivalentes são apresentados a seguir. A Figura 4.3.1 apresenta os quatro modelos a parâmetros concentrados investigados neste trabalho. O primeiro modelo apresentado e o ideal, considerando apenas a corrente foto-gerada e a corrente de saturação reversa do diodo de difusão. O segundo e terceiro modelos já incorporam a resistência serie e a resistência paralela, respectivamente. E, finalmente, o quarto modelo apresentado incorpora a corrente de saturação reversa do diodo de recombinação (MACHADO NETO, 2006).

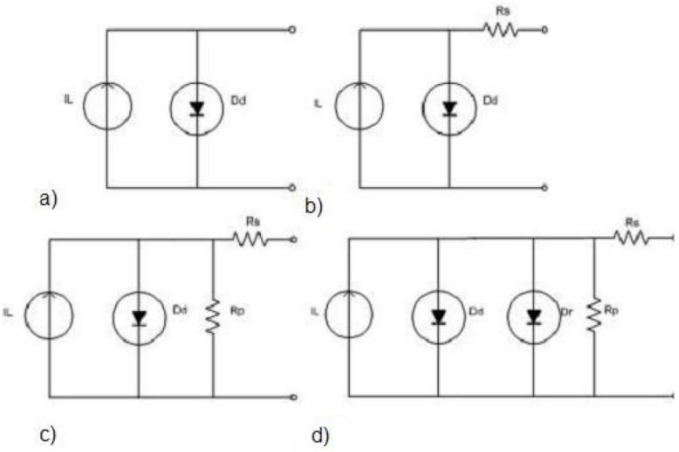


Figura 4.3.1 - Circuito equivalente de células fotovoltaicas: a) modelo ideal; b) modelo com resistência em série; c) modelo com resistência em série e paralelo; d) modelo com resistências e diodo de recombinação.

Fonte: MACHADO NETO, 2006.

A corrente de saída mantém-se praticamente constante dentro da amplitude de tensão de funcionamento, assim, o dispositivo pode ser considerado uma fonte de corrente constante

neste âmbito. A corrente e a tensão em que opera o dispositivo fotovoltaico são determinadas pela radiação solar incidente, pela temperatura ambiente, e pelas características da carga conectada ao mesmo. (SOLARTERRA, 2014)

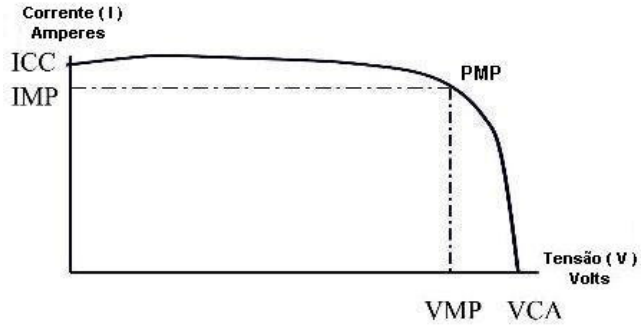


Figura 4.3.2 – Curva de ponto de máxima potência.

Fonte: SOLARTERRA, 2013.

Os principais valores que se tem que observar nas especificações de uma placa fotovoltaica são os que influenciam diretamente em seu rendimento e que atendem os valores exigidos pelo inversor e pelo ambiente.

A corrente de curto-circuito (Icc) é a corrente máxima que o dispositivo pode entregar em determinadas condições de irradiação e temperatura, correspondendo a uma tensão nula, e consequentemente potência nula.

A tensão de circuito aberto (Vca) é a tensão máxima que a placa fornece em determinadas condições de irradiação e temperatura. Assim sua corrente é zero e a potência também é nula.

O ponto de máxima potência (Imp) é o valor máximo de potência que o dispositivo pode entregar em determinado valor de corrente (Imp) e tensão (Vmp). Esse valor é o ideal para geração de energia, e o objetivo é sempre manter a instalação em condições para manter o dispositivo neste ponto.

4.3.1 Efeitos de fatores ambientais sobre a saída do dispositivo

Os principais fatores que influenciam o desempenho de geradores fotovoltaicos ou a produção de energia são: irradiação, incluindo os dados meteorológicos e orientação do gerador, respostas ótica, espectral e térmica, características elétricas e carga demandada (MACHADO NETO, 2006). Assim devemos sempre levá-los em conta na hora de dimensionar a instalação.

A intensidade solar interfere na corrente de saída para qualquer valor de tensão. A corrente varia com a radiação de forma diretamente proporcional, mantendo a tensão praticamente constante, como visto na figura 4.3.3.

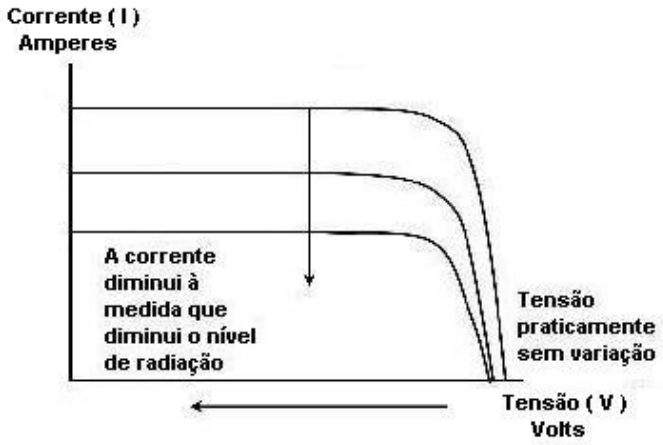


Figura 4.3.3 – Influência da irradiação solar na corrente.

Fonte: SOLARTERRA, 2013.

O principal efeito provocado pelo aumento da temperatura do módulo é a queda de tensão. Existe também um efeito secundário de um pequeno incremento da corrente para valores baixos de tensão, como observado na figura 4.3.4. É por isso que para locais com temperaturas ambientes muito elevadas são mais adequados placas que possuem uma grande quantidade de células em série, a fim de que as mesmas tenham uma tensão de saída alta suficiente para atender a entrada do inversor.

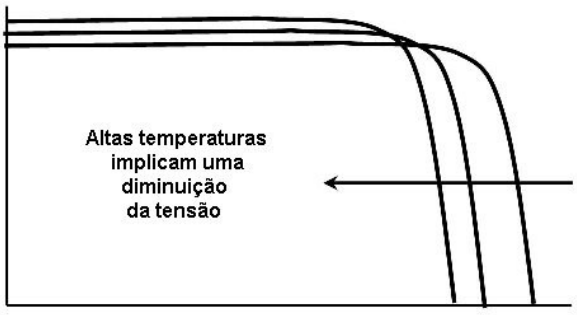


Figura 4.3.4 – Relação da tensão de saída pela temperatura da placa.

Fonte: SOLARTERRA, 2013.

5 INVERSORES

Os inversores CC/CA servem para converter a energia contínua gerada pelos módulos fotovoltaicos em energia alternada. A maior parte dos aparelhos eletrodomésticos tem funcionamento em tensão e corrente alternada, e são feitos para trabalhar na rede elétrica, que também funciona nesse meio. Assim uns dos principais componentes de uma usina fotovoltaica são seus inversores CC/CA.

Inversores eletrônicos para sistemas fotovoltaicos estão disponíveis no mercado em uma vasta gama de potências e especificações. Estes são equipamentos muito complexos, e a explicação de todo seu funcionamento é inviável e foge do objetivo deste projeto. No capitulo do desenvolvimento da instalação fotovoltaica vou trata-los como caixa preta e apenas observar os dados específicos do produto, determinados pelo fabricante.

Para instalações fotovoltaicas ligadas a rede se utiliza um tipo de inversor específico chamado “Grid-Tie”.

Entre as vantagens dos sistemas fotovoltaicos interligados à rede elétrica podem-se destacar: (1) não requerem área extra, pois são utilizadas no meio urbano, próximo ao consumidor, o que leva a (2) eliminar perdas por T & D da energia elétrica como ocorre com usinas geradoras centralizadas, além de (3) não requer instalações de infra-estrutura adicionais; os painéis fotovoltaicos podem ser também (4) considerados como um material de revestimento arquitetônico (redução de custos), dando à edificação uma (5) aparência estética inovadora e high tech além de trazer uma (6) imagem ecológica associada ao projeto, já que produz energia limpa e de fonte virtualmente inesgotável (RÜTHER, 1999).

5.1 Princípio de funcionamento

O princípio de funcionamento dos inversores é captar uma tensão ou corrente fornecida por uma fonte contínua - no nosso caso, os módulos fotovoltaicos – e converte para a forma de uma corrente alternada, podendo assim conectar a rede. Na rede a frequência de funcionamento é fixa em 60 Hz. A conversão pode ser feita por diversos métodos. Quanto mais próximo a uma senóide a saída estiver, melhor a qualidade da inversão. Podem ser monofásicos ou trifásicos e podem ser de pequena ou elevada potência.

Segundo os Hernandez (2013), os inversores fotovoltaicos podem se distinguir em basicamente dois tipos:

- **Inversores de comutação natural**, também conhecido como inversores comutados pela rede, já que é ela que determina o fim do estado de condução dos dispositivos eletrônicos. Sua aplicação é baseada para instalações fotovoltaicas ligadas a rede. Atualmente estão sendo colocados de lado pelos inversores de comutação forçada do tipo PWM, conforme se desenvolve os transistores do tipo IGBT para maiores níveis de tensão e corrente.

- **Inversores de comutação forçada ou autocomutados** são destinados para instalações fotovoltaicas isoladas. Permitem gerar corrente alternada mediante a uma comutação forçada, que se refere a abertura e fechamento forçado do sistema de controle. Podem ser de saída escalonada (onda quadrada) ou por PWM, com o qual pode se conseguir saídas praticamente senoidais, portanto, tendo poucas harmônicas. Com inversores PWM consegue-se atingir rendimentos acima dos 90%, inclusive com baixos níveis de carga.

5.2 Especificações importantes do inversor

Existem vários tipos de inversores no mercado. Os mais indicados são os específicos para instalações fotovoltaicas, pois já são feitos para as condições de funcionamento desse tipo de fonte de energia.

Os fabricantes nos dão uma série de dados sobre seus produtos, de forma que a escolha do tipo de inversor envolve o tipo e porte da instalação fotovoltaica.

As informações do inversor que temos que observar que vão ser base dos cálculos do dimensionamento da instalação são: tensão de entrada do inversor, potencia máxima, frequência de trabalho, corrente máxima de entrada do inversor, eficiência e forma da onda de saída.

Segundo Hernandez (2013), a eficiência do inversor não é constante, pois depende do regime de carga que está submetido. Para regimes de carga próximos ao valor nominal a eficiência máxima.

6 MODELAGEM DA INSTALAÇÃO FOTOVOLTAICA

Com base nos conhecimentos adquiridos pelo estudo teórico, vamos partir para a etapa de modelar uma instalação fotovoltaica ligada a rede, localizada no município de Ouro Preto, Minas Gerais.

6.1 Escolha das componentes da instalação

A instalação aqui proposta será ligada a rede, e terá uma potência nominal instalada de 500 kW. A escolha aqui feita para as principais componentes (módulo fotovoltaico e inversor) tem apenas valor técnico, sem levar em conta valor econômico nem de mão de obra de instalação.

6.1.1 Módulo fotovoltaico

Para a escolha do módulo fotovoltaico, foi levado em conta seu rendimento, e possuindo uma alta potência nominal. Assim o número de placas necessárias para atender a instalação será reduzido, tornando mais fácil o dimensionamento físico do projeto.

O modelo escolhido foi o E300 da CENTROSOLAR®. Ele possui uma potência nominal de 300 Wp, com 72 células policristalinas ligadas em série. Mais detalhes sobre suas especificações podem ser observadas na figura 6.1.1 e no ANEXO 1. De acordo com o catálogo Centrosolar: E-Series Module, o gerador fotovoltaico E300 possui diodos by-pass a cada 24 células, de forma a diminuir perdas por sombreamento. É uma placa de grande porte, com quase 2 metros de altura por 1 metro de largura, e pesa 26,3 Kg.

Model Type	E285 or E285B	E290 or E290B****	E295 or E295B****	E300 or E300B****	E305 or E305B****
Peak Power (Pmax)* Watts	285	290	295	300	305
Cell Type	Polycrystalline Silicon				
Number of Cells in Series	72				
Frame Color	Silver or Black (denoted by B after wattage designation)				
Power Tolerance	0 to +5W				
Voltage at Maximum Power (Vmp)	35.86	35.92	36.17	36.68	37.18
Current at Maximum Power (Imp)	7.95	8.08	8.16	8.18	8.21
Open Circuit Voltage (Voc)	44.72	44.75	44.78	44.89	45.12
Short Circuit Current (Isc)	8.55	8.62	8.68	8.72	8.78
Series Fuse	15A				
Maximum System Voltage: Vdc	1000				
Temp Coefficient (Pmax): %/degree C	-0.44				
Temp Coefficient (Voc): %/degree C	-0.34				
Temp Coefficient (Isc): %/degree C	0.04				
NOCT: degrees C	45.3				
Output Cable	#12 AWG (4 mm) x 47.2" (1200 mm)				
Connector Plug Type	MC4 Compatible				
Max Load Rating (psf)	45 lb/ft²				
Weight lbs (kg)	57.98 (26.3)				

****Product not yet available in all areas. Check with Centrosolar Product Management before ordering.

Figura 6.1.1 – Especificações da série E da CENTROSOLAR®. O modelo adotado foi o E300.

Fonte: CENTROSOLAR: E-Series Module.

6.1.2 Inversor

A escolha do inversor teve a mesma justificativa que a do módulo fotovoltaico, não foi observado o valor financeiro nem custos de implantação envolvidos, apenas importâncias técnicas.

Como o objetivo é modelar uma usina fotovoltaica de 500 kWp, esse valor é alcançado tendo base na potencia nominal de todos inversores envolvidos. No mercado a diversos modelos de inversores, com várias potencias e especificações. Mesmo podendo ser encontrado inversores com 500 kWp, assim um único produto suprindo toda nossa demanda, será adotado neste projeto o inversor Ingecon® Sun 50. O modelo citado tem potência de pico de 50 kW, e para alcançar o nosso objetivo, serão modelados 10 arranjos fotovoltaicos, cada um suprindo um inversor Ingecon® Sun 50.

Quando se aumenta a quantidade de inversores da instalação, cresce a garantia de que a potência dimensionada será entregue a rede, pois irá prevenir de possíveis falhas em alguma string de módulos, ou defeito no inversor.

O modelo Ingecon® Sun 50 tem como tensões de entrada para ponto de máxima potência de 405 até 750 V e sua corrente máxima de entrada é de 130 A. O inversor opera em duas frequências, 50 ou 60 Hz, sendo este ultimo adotado como padrão pelas distribuidoras no Brasil.

	50	60	70	80	90	100
Input (DC)						
Recommended PV array power range[1]	52 - 65 kWp	63 - 78 kWp	73 - 91 kWp	83 - 104 kWp	93 - 117 kWp	104 - 130 kWp
Voltage range MPP	405 - 750 V	405 - 750 V	405 - 750 V	405 - 750 V	405 - 750 V	405 - 750 V
Maximum voltage DC[2]	900 V	900 V	900 V	900 V	900 V	900 V
Maximum current DC	130 A	156 A	182 A	208 A	234 A	260 A
DC inputs	4	4	4	4	4	4
MPPT	1	1	1	1	1	1
Output (AC)						
Rated power AC[3]	55 kW	66 kW	77 kW	88 kW	99 kW	110 kW
Maximum current AC	93 A	118 A	131 A	156 A	161 A	161 A
Rated voltage AC	400 V	400 V	400 V	400 V	400 V	400 V
Frequency AC	50 / 60 Hz	50 / 60 Hz	50 / 60 Hz	50 / 60 Hz	50 / 60 Hz	50 / 60 Hz
Phi Cosine[4]	1	1	1	1	1	1
Phi Cosine adjustable	Yes. Smax=55 kVA	Yes. Smax=66 kVA	Yes. Smax=77 kVA	Yes. Smax=88 kVA	Yes. Smax=99 kVA	Yes. Smax=110 kVA
THD[5]	<3%	<3%	<3%	<3%	<3%	<3%
Efficiency						
Maximum efficiency	96.3%	96.4%	97.2%	97.5%	96.9%	96.8%
Euroefficiency	94.3%	94.7%	96.1%	96.2%	95.8%	95.7%

Figura 6.1.2 – Especificações do inversor Ingecon® Sun 50.

Fonte: Ingecon® SunPower.

Como observado na figura 6.1.2, a saída do inversor será em corrente alternada trifásica, com uma potência nominal de 55 kW. A tensão de fase será 400 V e a corrente limite de saída é de 93 A.

Cada inversor ficará responsável por certa quantidade de módulos fotovoltaicos, transformando a corrente contínua gerada por eles em corrente alternada.

6.2 Modelagem dos painéis fotovoltaicos

A modelagem das características elétricas do painel fotovoltaico é geralmente feita a partir da potência nas condições ideais (ponto de máxima potência), a corrente de curto circuito, a tensão de circuito aberto e a tensão de máxima potência do produto.

Segundo Müller (1993), a Condição Padrão de Teste – CPT adotada pela maioria das fabricantes de painéis solares é: irradiação solar de 1000 W/m², temperatura de 25° e a massa de ar igual a 1,5, sendo esta definida como a razão do comprimento do caminho atual da luz através da atmosfera pelo seu valor mínimo.

Os fabricantes dos módulos fotovoltaicos geralmente fornecem a Temperatura de Operação Nominal da Célula – TONC, para a Condição Nominal de Operação – CNO. Por meio deste parâmetro calcula-se a temperatura de operação da célula:

$$T_p = T_{AMB} + \left(\frac{TONC-20}{800}\right).I \qquad [6.2.1]$$

Em que

T_p - temperatura de operação da placa (°C);

T_{AMB} - temperatura ambiente (°C);

TONC - temperatura de operação nominal da célula (°C);

I - irradiação solar na dada T_{AMB} (W/m²);

É indicado estudar o histórico climático do município ou região onde a instalação será feita, com a temperatura mínima e máxima alcançada. Quanto maior for a precisão desses dados, a instalação irá ser mais segura e irá garantir seu funcionamento devido nas situações extremas.

Isso se deve a grande influência da temperatura na operação de semicondutores. Com temperaturas baixas, a tensão de circuito aberto aumenta, e quando a instalação envolve várias placas em série pode gerar sobrecarga no inversor. Já caso a temperatura aumente muito, a tensão pode ficar abaixo da tensão mínima de entrada do inversor, fora de seu limite de operação.

Alguns fabricantes fornecem, também, os coeficientes de temperatura da corrente de curto-circuito e da tensão de circuito aberto. A variação da corrente de curto circuito em relação à temperatura é menos significativa do que a variação de tensão de circuito aberto, tendo coeficientes de sinais opostos entre si, sendo o da corrente, positivo, e o da tensão negativo (CASTAÑER & SILVESTRE, 2002). Desta forma a expressão para a tensão de circuito aberto na temperatura mais fria é dada por:

$$U_{CA} = U_{CA(STC)} - (T_{CPT} - T_p).\Delta U \qquad [6.2.2]$$

Em que:

U_{CA} - tensão de circuito aberto na temperatura T_p (V);

$U_{CA(STC)}$ - tensão de circuito aberto na CPT (V);

T_{CPT} - temperatura adotada na CPT (°C);

ΔU - variação de tensão pela temperatura (V/°C);

De forma análoga, a expressão para a tensão em máxima potência em dias quentes é dada por:

$$U_{MP} = U_{MP(STC)} + (T_P - T_{CPT}).\Delta U \quad [6.2.3]$$

Em que:

U_{MP} - tensão de máxima potência na temperatura T_P (V);

$U_{MP(STC)}$ - tensão de máxima potência na CPT (V);

É de se observar que normalmente os fabricantes apresentam o valor do coeficiente de temperatura na unidade de %/°C, devendo assim o calculista fazer a conversão de unidades para um resultado apropriado.

Para os cálculos realizados neste projeto vai ser adotado como valor mínimo de temperatura em Ouro Preto 5°C com uma irradiação de 100 W/m², e no dia mais quente uma temperatura de 35°C a uma irradiação de 1000 W/m². Esses dados foram baseados no Atlas Brasileiro de Energia Solar (2006) e representam valores considerados condições climáticas extremas para a região, de forma a deixar a instalação um intervalo seguro de operação.

Com base nos valores informados pela fabricante do módulo fotovoltaico e das condições climáticas escolhidas, e utilizando a expressão 6.2.1, temos:

Para o dia mais frio:

$$T_P = 5 + \left(\frac{45,3-20}{800}\right).100$$

$$T_{Pmin} = 8,16°C \quad [6.2.4]$$

Para o dia mais quente:

$$T_p = 35 + \left(\frac{45{,}3 - 20}{800}\right).1000$$

$$T_{pmáx} = 66{,}63°C \qquad [6.2.5]$$

Encontramos então a temperatura de operação do painel fotovoltaico nos dias mais frios e mais quentes de Ouro Preto. Esses valores serão usados para calcularmos as tensões de saída das placas nesses respectivos dias.

De acordo com as especificações da CENTROSOLAR® E300, o coeficiente de tensão em circuito aberto por temperatura é de -0.34%/°C. Ao ser feita a conversão, temos que ΔU vale -0,1247 V/°C. Utilizando a expressão 6.2.2 com o resultado 6.2.4, obtemos:

$$U_{CA} = 44{,}89 - (25 - 8{,}16).(-0{,}1247)$$

$$U_{CA} = 47{,}0\ V \qquad [6.2.6]$$

De forma análoga, para um dia quente, a tensão de máxima potência pode ser encontrada com a expressão 6.2.3, junto com o resultado 6.2.5 temos:

$$U_{MP} = 36{,}68 + (66{,}63 - 25).(-0.1247)$$

U_{MP} = 31,5 V [6.2.7]

Com esses resultados, determinamos a tensão real de saída dos módulos fotovoltaicos em dias quentes e frios. Assim, aumentamos a margem de segurança de operação do sistema, de forma a não sobrecarregar a instalação.

6.3 Modelagem dos inversores

A modelagem do inversor consiste no calculo da quantidade de painéis fotovoltaicos que serão conectados a ele, bem como o arranjo das placas. Os valores das especificações

geralmente utilizados para este dimensionamento são a potência nominal, a corrente máxima de entrada e as tensões mínimas e máximas de entrada do inversor, todos dados fornecidos pelo fabricante.

O inversor terá certa quantidade de painéis conectados em série, também chamados de string, para aumentar a tensão de saída de forma a atender os valores de entrada do inversor. Como o equipamento tem uma margem de operação, calcula-se a quantidade mínima e máxima de placas em série com as expressões 6.3.2 e 6.3.1 respectivamente.

$$n_{máx} = \frac{U_{máx(inv)}}{U_{CA}} \qquad [6.3.1]$$

Em que:

$n_{máx}$ = número máximo de módulos fotovoltaicos por string;

$U_{máx(inv)}$ = tensão máxima de entrada do inversor (V);

U_{CA} = tensão de circuito aberto no dia mais frio (V);

$$n_{mín} = \frac{U_{mín(inv)}}{U_{MP}} \qquad [6.3.2]$$

Em que:

$n_{mín}$ = número mínimo de módulos fotovoltaicos por string;

$U_{mín(inv)}$ = tensão mínima de entrada do inversor (V);

U_{MP} = tensão de máxima potência no dia mais quente (V);

Nota-se que no dimensionamento dos módulos solares em string, deve-se utilizar os valores de tensões encontrados nos cálculos das expressões 6.2.2 e 6.2.3. Dessa forma já está sendo incluídos valores de sobrecarga causados pela variação de temperatura.

De acordo com a figura 6.1.2, a tensão de entrada do inversor Ingecon® Sun 50 vai de 405 a 750 V. Substituindo esses valores nas expressões 6.3.1 e 6.3.2, temos:

$$n_{máx} = \frac{750}{47}$$

$n_{máx}$ = 15,95 módulos solares [6.3.3]

Como um módulo solar é algo unitário, o resultado deve ser dado em um valor inteiro. Geralmente o indicado para o número máximo de painéis é arredondar para baixo, assim não estará ultrapassando o limite do inversor, mas como a diferença no caso calculado é ínfima, irei adotar $n_{máx}$ = 16 módulos em série.

$$n_{mín} = \frac{405}{31,5}$$

$n_{mín}$ = 12,8 módulos solares [6.3.4]

Pela mesma justificativa dada anteriormente, mas neste caso, arredondando para mais, temos que $n_{mín}$ = 13 módulos em série.

Queremos que a instalação opere em sua capacidade máxima, assim iremos adotar uma string com 16 placas fotovoltaicas. A tensão de saída dessa string será a soma das tensões de cada módulo individualmente, assim temos que V_{Total} = 752 V quando em circuito aberto e 504 V quando em ponto de máxima potência. Por estarem em série, a corrente se mantém a 8,72 A em curto circuito. A potência nominal gerada pela string será a soma das potências de cada placa, 4800 W.

Observa-se que a potência gerada por apenas uma string esta muito abaixo da capacidade do inversor, o que torna inviável a instalação. Para aumentar a potência sem comprometer a tensão de entrada, podemos colocar strings em paralelo.

Para dimensionar a quantidade strings que o inversor pode suportar, devemos considerar a potência nominal do inversor e sua corrente de entrada máxima. Sabemos que ao se adicionar arranjos em paralelo, sua tensão de saída se manterá constante, mas a corrente e potência irá somar. Uma maneira de calcular o máximo de arranjos paralelos é utilizando a potência como base, dada a expressão 6.3.5 a seguir:

$$n_p = \frac{P_{máx(inv)}}{n \; x \; P_{MP\,(placa)}} \qquad [6.3.5]$$

Em que:

n_p = número máximo de strings em paralelo;

$P_{máx(inv)}$ = potência nominal do inversor (W);

n = número de placas fotovoltaicas por string;

$P_{MP(placa)}$ = potência nominal da placa fotovoltaica (W);

O número encontrado deve respeitar a corrente máxima de entrada do inversor. O mesmo cálculo pode ser feito com base nesse dado, pela expressão 6.3.6:

$$n_p = \frac{I_{máx\,(inv)}}{I_{CC\,(placa)}} \qquad [6.3.6]$$

Em que:

$I_{máx\,(inv)}$ = corrente máxima de entrada do inversor (A);

$I_{CC(string)}$ = corrente de curto circuito da string (A);

Independente do método que adotar, os valores especificados do inversor devem ser respeitados e não ultrapassados para não ocorrer sobrecarga e danificar o equipamento.

Serão demonstrados os cálculos para os dois métodos. Começando pela potência do inversor como parâmetro.

$$n_p = \frac{50000}{16\ x\ 300}$$

$$n_p = 10{,}4\ strings$$

Iremos adotar 10 strings em paralelo para não sobrecarregar o inversor, e também para facilitar o dimensionamento de um arranjo mais simétrico da instalação, já que é um número par.

Como já mencionado, temos que conferir se com 10 strings, não estaremos ultrapassando a corrente máxima de entrada do inversor.

$$n_p\ \boldsymbol{x}\ I_{CC(string)} < I_{máx\,(inv)} \qquad [6.3.7]$$

10 x 8,72 A < 130 A

87,2 A < 130 A

Concluímos assim que adotar 10 strings em paralelo atende as especificações de entrada do inversor.

Agora, caso tivéssemos escolhido calcular com base na corrente máxima de entrada do inversor, com a expressão 6.3.6, teríamos:

$$n_p = \frac{130}{8{,}72}$$

$$n_p = 14{,}9\ strings$$

Adotando 14 strings e verificando a potência entregue por elas ao inversor, temos:

$$n_p\ x\ n\ x\ P_{MP(placa)} < P_{máx(inv)} \qquad [6.3.8]$$

14 x 16 x 300 W < 50000 W

67200 W < 50000 W Não confere!

Como observado, se comparando com a corrente de entrada do inversor, poderíamos colocar mais strings, só que dessa forma iria ultrapassar a potencia do inversor.

6.4 Conclusão da modelagem dos módulos fotovoltaicos e inversor

Após os cálculos e observações feitas nos tópicos anteriores, concluímos que utilizando 16 módulos fotovoltaicos em série conectados em paralelo com outros 10 arranjos similares, iremos suprir a capacidade do inversor de forma segura.

Cada string de 16 painéis solares irá gerar uma tensão entre 504 e 752 V, uma corrente de curto circuito por volta de 8,72 A e uma potência nominal de 4800 W, considerando condições apropriadas de operação.

As 10 strings em paralelo irão entregar ao inversor uma potência nominal de 48 kW e uma corrente de curto circuito em torno de 87,2 A. Cada inversor ficará responsável pela conversão de corrente continua em corrente alternada de 160 módulos fotovoltaicos.

Para atender a instalação programada em 500 kW, esse arranjo irá se repetir dez vezes com configurações similares. Serão utilizados no total 1600 módulos fotovoltaicos e 10 inversores solares.

6.5 Dimensionamento da estrutura física da instalação fotovoltaica

A estrutura física da instalação fotovoltaica consiste no aparato que irá acomodar os painéis solares. Os conceitos mostrados no capítulo 3 deste trabalho serão aplicados nestes cálculos, como orientação e inclinação dos módulos solares, e espaçamento entre strings para evitar sombreamento.

A estrutura será feita de alumínio, por ser um material resistente tanto a cargas, quanto a condições climáticas como chuva.

6.5.1 Dimensionamento da estrutura

Nossa instalação fotovoltaica será fixa, de forma que a orientação dos painéis não poderá ser alterada. A cidade de Ouro Preto se localiza no sudeste do Brasil, ou seja, no hemisfério sul. Assim sua orientação será para o norte geográfico do planeta. Segundo o site oficial do município de Ouro Preto, a cidade esta localizada na latitude 23°23’ sul e na longitude 43°30’ oeste. Com base na Tabela 1, a inclinação indicada para os painéis solares para um bom rendimento durante o ano inteiro é de 25°.

De acordo com as especificações do módulo CENTROSOLAR® E300 fornecidas pelo fabricante, suas dimensões são, em milímetros, de 1956 x 992 x 40. Por segurança, as placas serão posicionadas a um metro de altura, e para otimizar o espaço, serão colocadas das duas fileiras de 8 placas em cada string. A estrutura ficará da seguinte forma:

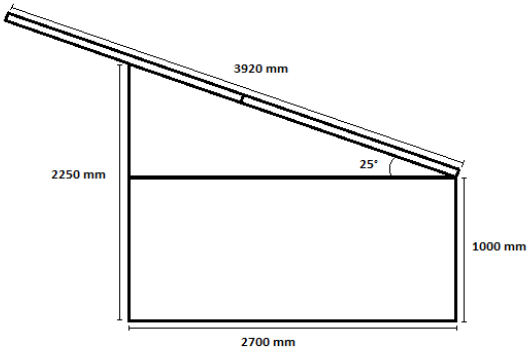


Figura 6.5.1 - Perfil lateral da estrutura de suporte das placas fotovoltaicas

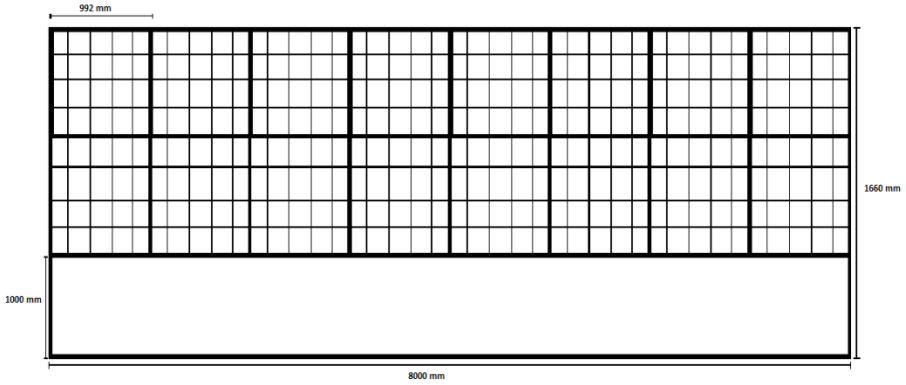


Figura 6.5.2 - Perfil frontal da estrutura de suporte das placas fotovoltaicas

A estrutura ficará similar a figura 6.5.3.

Figura 6.5.3 – Estrutura de suporte das placas fotovoltaicas

Fonte: HERNANDEZ, 2013

6.5.2 Espaçamento entre strings

Fazer um bom dimensionamento para as projeções da sobra dos strings durante o ano evita perdas por sombreamento causadas pela própria instalação. O modo mais simples de se fazer este cálculo é já baseá-lo na pior condição de sombra do ano, quando o sol nasce e se põe nas menores alturas do ponto de vista do observador. Esse dia é geralmente o solstício de inverno, que marca o início da respectiva estação.

Segundo Las Casas (2002), ao meio dia do solstício de inverno, o sol estará a uma altura de 47° em relação à superfície. Considerando que essa é a altura máxima do sol nesse dia, no início da manhã e no fim da tarde, a altura estará por volta de 23°. Assim com base na figura 3.4 e utilizando relações trigonométricas, temos que:

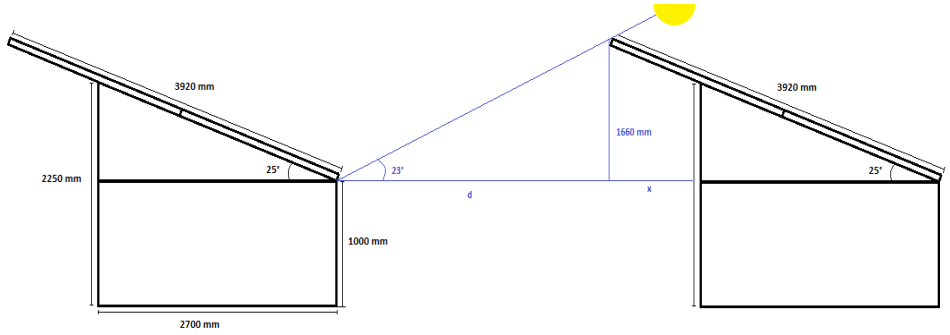


Figura 6.5.4 – Espaçamento entre as strings

x = 3920 x cos 25° - 2700

x = 850 mm [6.5.1]

$$d = \frac{1660}{tg\ 23°}$$

d = 3910 mm [6.5.2]

A distância entre as bases das strings é dada por $d + x$. Logo:

$d + x$ = 4760 mm

Assim, para facilitar os cálculos, a distância entre as placas será de 4,8 m.

6.5.3 Posição do arranjo de módulos fotovoltaicos e do inversor

O posicionamento dos módulos fotovoltaico e do inversor geralmente depende do relevo e das condições do local onde vão ser instalados. No caso da proposta deste trabalho, o local é um espaço hipotético ilimitado e totalmente plano, sem nenhuma obstrução para a irradiação solar, tal como árvores ou edifícios.

O objetivo é montar uma formação que seja compacta, de fácil acesso para manutenção e que mantenha uma distância mínima do painel mais longe com o inversor, para redução de perdas por cabeamento.

A proposta deste projeto consiste em duas fileiras com 5 strings como na figura 6.5.5.

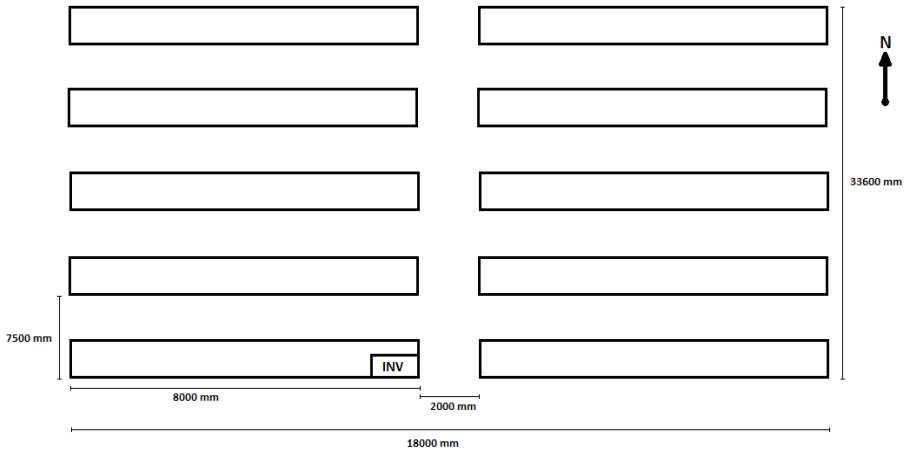


Figura 6.5.5 – Distribuição dos módulos fotovoltaicos e posição do inversor no arranjo

A instalação deverá ficar similar a figura 6.5.6.

Figura 6.5.6 – Exemplo de arranjo similar ao proposto no projeto

Fonte: HERNANDEZ, 2013

O inversor será colocado dentro de uma estrutura de alvenaria atrás da ultima string de módulos fotovoltaicos. O índice de proteção do inversor Ingecon® Sun 50 é IP20, segundo o fabricante. Isto representa que não é impermeável e nem protegido contra poeira, assim não é indicado deixa-lo exposto às condições climáticas.

As dimensões do inversor são dados na figura 6.5.6.

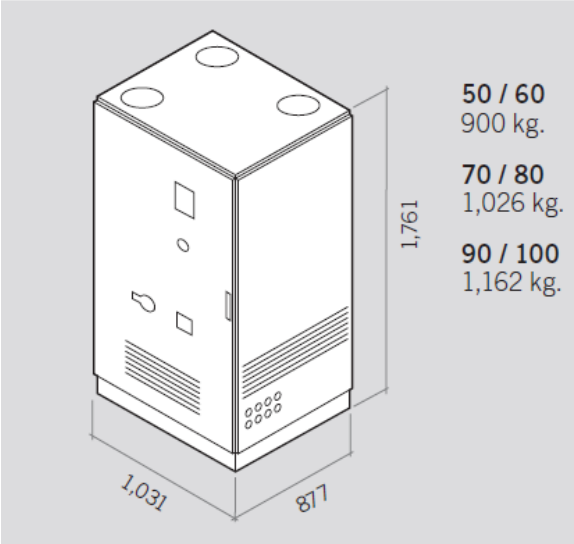


Figura 6.5.6 – Dimensões do inversor – em milímetros

Fonte: Ingecon Sunpower®

A dimensão da casa de alvenaria que irá acomodar o inversor, o transformador e os sistemas de proteção é dada pela figura 6.5.7. Como sugerido na figura 6.5.5, o centro de transformação se posicionará atrás da ultima string de placas solares.

Figura 6.5.7 – Centro de transformação

Fonte: HERNANDEZ, 2013.

O arranjo mostrado na figura 6.5.5 é apenas um de dez que serão feitos para atender a potência de 500 kW proposta neste projeto. Todos os cálculos utilizados para a estrutura citada será repetida nos outros arranjos, inclusive do sistema de segurança e as seções e cabeamento que vão ser dimensionados posteriormente. Isso se deve ao fato de toda instalação ser simétrica, e uma usina fotovoltaica dar essa possibilidade.

6.6 Cálculo das instalações elétricas

Uma das partes de uma instalação fotovoltaica que mais gera custos de manutenção é a parte elétrica, por isso é sempre bom fazer um estudo aprofundado e seguir as normas estipuladas para estas instalações, bem como utilizar produtos de qualidade.

6.6.1 Cálculo das seções

Grande parte dos cabos de condução irão se concentrar na parte de corrente contínua, ou seja, antes de passar pelo inversor. Isso se deve porque a linha de transmissão e distribuição da rede se localizará próxima a usina fotovoltaica.

Segundo BISONI et al. (2010), são vários fatores que determinam a capacidade de corrente de um condutor e, por isso, deve-se levar em consideração aspectos como: temperatura ambiente ao qual os condutores ficaram expostos; tipo de instalação e o número de condutores carregados; temperatura interna (muitas vezes desconhecida, considerando-se para efeitos de dimensionamento 40°C), comprimento do condutor; etc.

Segundo Cotrim (2013), o valor da seção para condutor de corrente contínua é dado pela expressão 6.6.1 a seguir:

$$S = \frac{2\ x\ L\ x\ I_{CC}}{1\ \%\ x\ V_{MP}\ x\ k} \qquad [6.6.1]$$

Em que:

S = tamanho da seção do condutor (mm²);

L = comprimento do condutor (m);

I_{CC} = corrente de curto circuito (A);

V_{MP} = tensão de máxima potência da string (V);

k = condutividade da componente do condutor (m/Ω.mm²);

Pela norma brasileira, o indicado é fazer o condutor com no máximo 1% de perda de tensão. Para uma maior segurança, geralmente também se multiplica o valor da corrente de curto circuito por 1,2 a 1,3, assim prevenindo picos de correntes provocados por fatores externos. O condutor será composto de cobre, que possui o coeficiente k igual a 56 m/Ω.mm².

Para o cálculo da seção de cada string, temos que o L é 8 metros, dado pela figura 6.5.5. A corrente de curto circuito com a correção de 1,3 é dado a seguir:

I_{cc} x 1,3 = 11,33 A [6.6.2]

Aplicando os valores na expressão 6.6.1 fica:

$$S = \frac{2\ x\ 8\ x\ 11{,}33}{0{,}01\ x\ 752\ x\ 56}$$

S = 0,430 mm² [6.6.3]

Para atender a norma brasileira ABNT NBR 5410:2004, é necessário um condutor com uma seção de no mínimo 0,430 mm², mas como a saída dos módulos fotovoltaicos são por padrão do fabricante de 4,0 mm², vamos utiliza-lo, inclusive por economia e praticidade.

A condução da energia provida pelas strings até o inversor será feita por eletrodutos enterrados 60 centímetros abaixo do solo. Cada caixa de distribuição das strings estará a 1 metro de altura do solo. A montagem simplificada é ilustrada na figura 6.6.1.

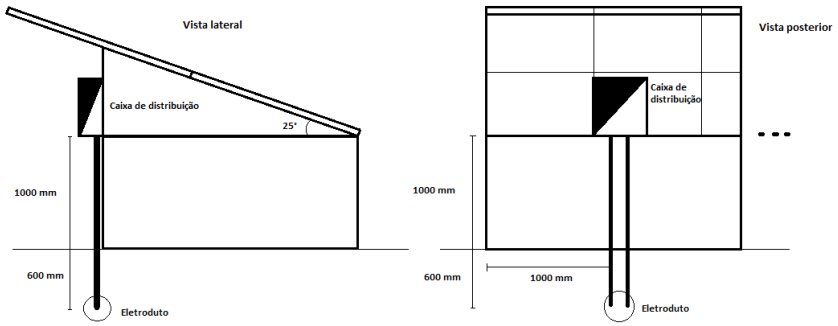


Figura 6.6.1 – Vista lateral e posterior da posição da caixa de distribuição e distância até o eletroduto

A posição da CD ficara similar a figura 6.6.2. Observa-se que o sistema possui disjuntores em cada tramo para manutenção.

Figura 6.6.2 – Exemplo da posição da caixa de distribuição proposta neste projeto

Fonte: HERNANDEZ, 2013

Para calcular a seção da caixa de distribuição da string até o inversor, utilizaremos o arranjo mais afastado do inversor e somaremos com o gasto de cabo da CD até o eletroduto e até o início da estrutura das placas. Esse adicional será de 2,6 metros, conforme ilustrado na figura 6.6.1. O arranjo mais afastado está a aproximadamente 35 metros do inversor, segundo a figura 6.5.5. Assim a distância L é de 37,6 metros. Aplicando esse valor na expressão 6.6.1 temos:

$$S = \frac{2\ x\ 37{,}6\ x\ 11{,}33}{0{,}01\ x\ 752\ x\ 56}$$

$S = 2{,}02\ mm^2$ [6.6.4]

A seção necessária para atender a norma ABNT NBR 5410:2004 é de 2,02 mm². Para manter um padrão, e facilitar a instalação, adotaremos toda parte de corrente contínua da usina fotovoltaica com seção de 4,0 mm². Serão gastos aproximadamente 400 metros de cabo de cobre para suprir um inversor. Também teremos mais outros 200 metros de cabo para aterrar todas as placas e estrutura de alumínio da instalação. Em cada um dos dez arranjos fotovoltaicos que irão compor a usina solar será utilizado aproximadamente 600 metros de cabo com seção de 4,0 mm². No total serão 6000 metros de cabo de cobre.

Como já mencionado anteriormente, cada string será composta por 16 painéis fotovoltaicos conectados em série. Essa conexão é feita ligando a saída positiva de um módulo na saída negativa do seguinte. Um exemplo de ligação em série é mostrado na figura 6.6.3.

Figura 6.6.3 – Exemplo de ligação elétrica entre os módulos

Fonte: HERNANDEZ, 2013

6.6.2 Centro de transformação e distribuição

Finalizando o dimensionamento da parte de corrente contínua do projeto, chegamos à parte de transformação em corrente alternada e aumento de tensão para atender a rede. Todo esse

processo irá ocorrer dentro do centro de transformação, citado capítulo 6.5 e exemplificado na figura 6.5.7.

O circuito de inversão seguirá o modo sugerido pelo fabricante do inversor, dado pela figura 6.6.4.

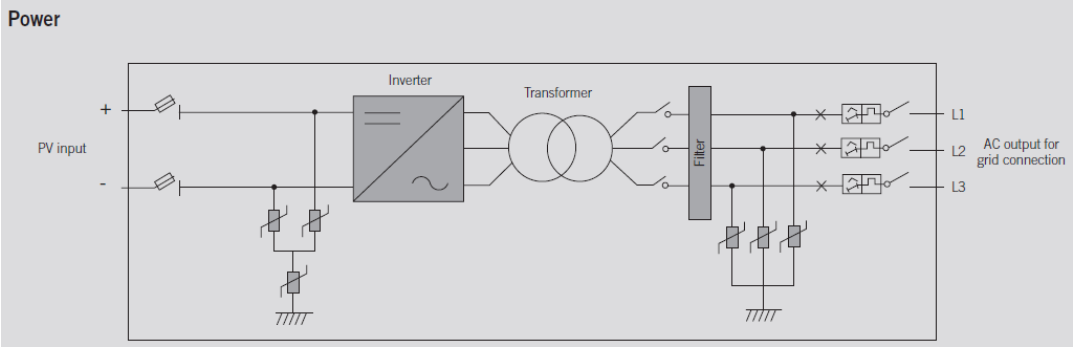


Figura 6.6.4 – Circuito de inversão e distribuição

Fonte: Ingecon Sunpower®

O inversor já foi selecionado como especificado no capítulo 6.1. Pelos dados informados pelo fabricante, o inversor trifásico lança 50 kVA de potência. A tensão de fase é de 400 V, e a corrente alternada máxima na saída é de 93 A.

Para o cálculo da seção do condutor, o comprimento dos cabos será pequeno, pois consiste na distância do inversor até o transformador. Esta distância não será maior que 10 metros, já que ambos os equipamentos estarão localizados no mesmo local. A expressão 6.6.1, para calcular uma seção de condutor trifásico, é dada a seguir:

$$S = \frac{\sqrt{3} \; x \; L \; x \; I}{1\,\% \; x \; V \; x \; k} \qquad [6.6.1]$$

Com os valores citados, a seção seria de aproximadamente 7,0 mm². Esta seção atenderia a queda de tensão, mas como o condutor é muito curto, e a corrente é muito alta, não suportaria. De acordo com a norma ABNT NBR 5410:2004, a seção com capacidade que atende a corrente lançada pelo inversor é de 35,0 mm². O cabo será transportado por bandejas perfuradas por cabos unipolares.

O transformador é o dispositivo utilizado para alterar a tensão do circuito. Essa alteração é compensada pela modificação da corrente. Caso seja um transformador elevador, a corrente diminui, e vice-versa. O transformador do projeto proposto irá elevar a tensão de saída do inversor de 400 V para 13800 V, que é a tensão utilizada para distribuição na rede.

Para manter a proposta de geração de energia limpa, implantaremos um transformador a seco, como da figura 6.6.5, que não utiliza óleo para controle de temperatura. Muitos desses óleos são tóxicos, e geram um custo maior de manutenção.

Figura 6.6.5 – Transformador e distribuição: a) exemplo de transformador a seco; b) conexão do transformador dentro do centro de distribuição; c) conexão com a rede de distribuição;

Fonte: HERNANDEZ, 2013

A partir do transformador, e passando pelos dispositivos de segurança, a ligação das fases será diretamente na rede de energia, também mostrado na figura 6.6.5. O Trafo deverá ser de 400/13800.

6.6.3 Dispositivos de segurança

Qualquer instalação elétrica deve ser segura, tanto para as pessoas quanto para os equipamentos que a compõe. Diversos tipos de dispositivos de segurança podem ser implantados, cada um responsável por proteger alguma anomalia ou situações inesperadas, como tempestades de relâmpagos, defeito em conexões ou equipamentos, etc.

Serão mostrados os dispositivos de segurança aplicados em cada setor da instalação, e qual o objetivo do equipamento.

Para manutenção nas placas fotovoltaicas, deve-se antes de tudo certificar que elas não estão operando. Para isso, deve-se prover a manutenção durante a noite ou obstruindo totalmente a luz das placas solares. Na caixa de distribuição mencionada no capitulo 6.6.1 deverá ter disjuntores para evitar sobrecargas e para desconectar a string do inversor. Na figura 6.6.2 pode-se observar a proteção na parte superior do sistema.

Como já mencionado no trabalho, toda instalação deverá ser aterrada – módulos fotovoltaicos e suas carcaças, estrutura metálica, inversor e transformador – e conectada a uma Ligação Equipotencial – LEP com a menor resistência possível. O LEP é um ponto comum de todos os fios de aterramento do sistema, criando um ponto de referência comum em toda instalação. O ponto ficará dentro do Centro de Transformação para facilitar acesso e proteger contra condições climáticas.

Seguiremos o diagrama de proteção proposto pela fabricante do inversor, mostrado na figura 6.6.6.

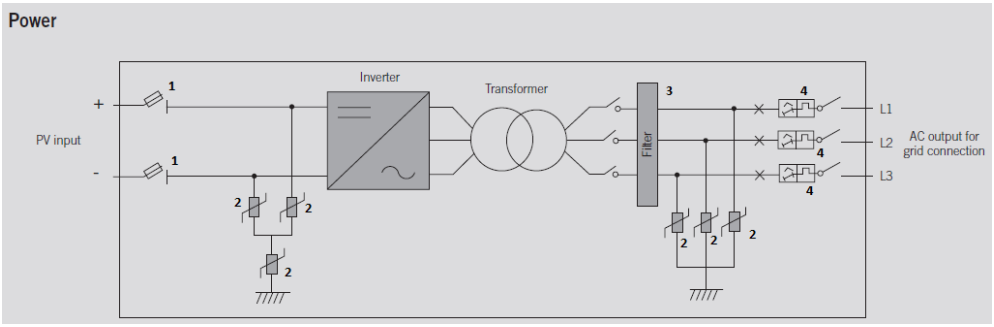


Figura Erro! Use a guia Página Inicial para aplicar 0 ao texto que deverá aparecer aqui.**6.6.6 – Diagrama elétrico do sistema ressaltando os dispositivos de segurança: 1) Chave On/Off com fusível; 2) DPS; 3) Filtros de sinais; 4) Disjuntor termomagnético;**

Fonte: Ingecon Sunpower® - Editado

O dispositivo "1" será uma chave seguido de um fusível. Ele será conectado em série nos condutores de corrente contínua. Protegerá o sistema de curtos circuitos e será desligada para manutenções no sistema. A imagem "a" da figura 6.6.7 ilustra este equipamento.

O equipamento "2" é um Dispositivo de Proteção contra Surtos – DPS. Ele protege o sistema de sobretensões causados por descargas elétricas ou manobras de circuito. É um equipamento muito importante para proteger equipamentos da instalação. O DPS será conectado na parte de corrente contínua e em cada fase da parte de corrente alternada, em ambas as situações será aterrado junto ao LEP. A imagem "c" da figura 6.6.7 ilustra este dispositivo.

O dispositivo “3” é um filtro de linha com o objetivo de reduzir harmônicas ou pequenas variações de tensão. Será conectado logo após o transformador e ajudará a melhorar a qualidade da energia gerada.

O equipamento “4” é um disjuntor termomagnético que será conectado em série com cada fase do sistema. Este dispositivo protege os equipamento de curtos circuitos e sobretensões. Todo fusível deve ter uma capacidade no mínimo duas vezes maior que a corrente nominal do circuito. A sugestão deste trabalho é utilizar um disjuntor tripolar de curva D indicada para cargas elevadas. A imagem “a” (ultimo elemento da direita) e a imagem “b” da figura 6.6.7 ilustra este equipamento.

Figura 6.6.7 – Dispositivos de segurança: a) Chave On/Off seguida de fusíveis e disjuntor termomagnético; b) Disjuntor tetrapolar da Simens; c) Modelos de DPS da Simens;

Fonte: HERNANDEZ, 2013; Catálogo de Disjuntores e Catálogo de DPS da Simens®

Cada instalação possui um risco de surtos e danos envolvido, e podem necessitar de mais ou até menos dispositivos de segurança instalados. Na proposta deste trabalho os equipamentos listados já irá prover uma segurança suficiente tanto para as pessoas que o manipulam quanto para os equipamentos que a compõe.

7 CONCLUSÃO

Geração de energia elétrica a partir de uma instalação fotovoltaica é um ramo promissor e com grande potencial energético no Brasil.

Nota-se por meio deste trabalho que os princípios técnicos para elaboração e dimensionamento de uma microgeração de energia fotovoltaica são simples. Quando se sabe a demanda requerida, tanto para instalações ligadas a rede, quanto para instalações prediais, o alto grau de adaptabilidade do sistema a ser gerado facilita os cálculos e dimensionamentos.

Sabendo as condições climáticas do local, a demanda de energia, a área a ser instalada e o orçamento disponível, pode-se desenvolver diversos tipos de projetos com características específicas para cada necessidade. Por exemplo, instalações de baixa potência para atender área rural, ou de média potência para atender pequenos centros comerciais ou residenciais ou de grande potência para atender a rede de distribuição, grande volume de residências ou uma alta demanda e horários de pico.

Este trabalho tinha como objetivo mostrar conceitos técnicos para se projetar uma usina fotovoltaica ligada a rede. Com uma análise mais aprofundada do mercado, dos produtos disponíveis e da qualidade dos mesmos, pode-se a partir dos princípios aqui mostrados, produzir instalações de ótima qualidade e com baixo custo de manutenção.

A usina de microgeração proposta para Ouro Preto atenderia metade da demanda energética do campus da Universidade Federal de Ouro Preto. Por ter sido dimensionada em arranjos de 50kW, poderia facilmente se adaptar a diferentes locais, como próximo a laboratórios ou alojamentos. Esse tipo de arranjo também facilita manutenções e garante uma entrega contínua de energia das outras instalações quando uma esta em manutenção.

Em uma área de menos de 10000 m² gera-se 500 kWp de energia limpa, silenciosa e renovável. A manutenção é pouca, focando em limpeza das placas e substituição de componentes danificadas.

A falta de incentivos do governo e de normas padronizando e regularizando as instalações solares, além de seu alto custo de instalação ainda atrasa o desenvolvimento desta tecnologia no país.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMBIENTEBRASIL, **Histórico das células fotovoltaicas e a evolução da utilização de energia solar**. Disponível em: <http://ambientes.ambientebrasil.com.br/energia/energia_solar/historico_das_celulas_fotovoltaicas_e_a_evolucao_da_utilizacao_de_energia_solar.html>. Acesso em: 23 set. 2014.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **ENERGIA SOLAR**, 2010. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar(3).pdf>. Acesso em: 01 jul. 2014.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT**. NBR 5410:2004. Instalações elétricas de baixa tensão I - Proteção e Segurança. Brasil, 2004.

BENITO, T. P. Práticas de energia solar fotovoltaica. Porto: Editora Publindústria. 2011. 110 p.

BISONI, P. R.; OLIVEIRA VAZ, F. S.; PEREIRA JÚNIOR, P. R. **Instalações Elétricas Industriais.** Curso Técnico de Eletromecânica. Florianópolis – SC. 2010

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **ENERGIA SOLAR**, 2014. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/clima/energia/energias-renovaveis/energia-solar>. Acesso em: 01 jul. 2014.

BREVE HISTÓRIA DA ENERGIA SOLAR. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa. Disponível em: <http://web.ist.utl.pt/palmira/solar.html>. Acesso em: 5 out. 2014.

CASTAÑER, L., SILVESTRE, S., **Modelling Photovoltaic Systems Using Pspice**. John Wiley & Sons, England, 2002, p 358.

CENTROSOLAR. Empresa produtora de componentes para instalação fotovoltaica. Disponível em: <www.centrosolaramerica.com>. Acesso em: 21 out. 2014.

CIAMBERLINIA, C.; FRANCINIA, F.; LONGOBARDIA, G.; PIATTELLIB, M.; SANSONIA, P. **Solar system for exploitation of the whole collected energy**. Elsevier, Jun 2001

DIMROTH, F. **World Record Solar Cell wih 44,7% Efficiency**. Fraunhofer ISE. Alemanha, 2013. Disponível em: <http://www.ise.fraunhofer.de/en/press-and-media/press-releases/presseinformationen-2013/world-record-solar-cell-with-44.7-efficiency> . Acesso em: 29 ago. 2014.

COTRIM, A. A. M. B. **Instalações Elétricas.** 5° Edição. São Paulo – SP, 2013.

HERNÁNDEZ, E. S**. Tecnología e Instalaciones Fotovoltaicas**. Material da disciplina. Curso 2013. Universidade de Salamanca. Espanha, 2013.

HOLM, Dieter; ARCH, D. **O futuro das fontes renováveis de energia para os países em desenvolvimento**. ISES do BRASIL, 2007

IBRIK, Imad H.; MAHMOUD, Marwan M.. **Energy efficiency improvement procedures and audit results of electrical, thermal and solar applications in Palestine**. Elsevier, Out 2004

POMILIO, J. P. Eletrônica de potência para geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, 2013. Campinas

LORENZO, E. **Electricidad Solar: Ingeniería de los Sistemas Fotovoltaicos.** Ed. Progensa. Madrid, 1994.

NASCIMENTO, C. A. **Princípio do funcionamento da célula fotovoltaica.** Lavras, MG: 2004.

LAS CASAS, R. **As estações do ano.** Observatório Astronômico Frei Rosário – UFMG. Caeté – MG, 2002. Disponível em: <http://www.observatorio.ufmg.br/pas44.htm> . Acesso em: 13 nov. 2014.

MACHADO NETO, L. V. B. **Caracterização de Geradores Fotovoltaicos e Desenvolvimento de Seguidor de Potência Máxima para Sistemas Autônomos Aplicados à Eletrificação Rural**. UFV. Viçosa - Minas Gerais. 2006

MOHAN, Ned. UNDERLAND, Tore M. ROBBINS, Willian P. *Power Eletronics – Converters, Applications and Design.* John Wiley & Sons, Canada: 1989.

MÖLLER, H. J., Semiconductors for Solar Cells, Artech House, 1993.

OLIVEIRA, G. B. Comissionamento da Usina Solar Fotovoltaica da UFJF(MG), 2014. Trabalho Final de Curso (Curso de Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L.; RÜTHER, R. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. INPE. São José dos Campos, São Paulo. 2006.

RÜTHER, Ricardo. **Panorama Atual da Utilização da Energia Solar Fotovoltaica e O Trabalho do Labsolar nesta Área**. UFSC, 1999.

SOLARTERRA – SOLUÇÕES DE ENERGIA ALTERNATIVA, **Energia Solar Fotovoltaica – Guia Prático**. 2013.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. *Energia Solar Fotovoltaica:* Conceitos e Aplicações. 1ª Edição. São Paulo: Érica Ltda. 2013. 224 p.

ANEXO 1 – Catálogo de Módulos Fotovoltaicos da CENTROSOLAR®

CentroSolar

PRODUCT SOLUTIONS
E-SERIES MODULE

Centrosolar: E-Series Module
72 CELL

Engineered in Germany

The Centrosolar E-Series PV Module was developed with the highest quality standards for professional commercial installations. Manufactured by our partner, and engineered, developed and tested under our strictest quality standards, this product has already been installed in many applications. The Centrosolar E-Series module consists of 72 polycrystalline high-efficiency silicon cells, allowing higher power output per module, up to 305Wp. This allows unique advantages for most applications, reducing installation and balance-of-system costs.

The Centrosolar E-Series has been designed to meet the highest demands and to resist rigorous climatic conditions in North America - including ice, hail, snow, storm, high humidity and intense thermal fluctuation. Neither heat nor cold can harm the Centrosolar E-Series. It makes optimum use of available solar energy reliably, in order to generate very high yields of power.

Energy from High-Performance Products

The Centrosolar E-Series is manufactured with an anodized aluminum frame with hexagon drainage holes and grounding hole on four sides. The modules are made with high quality raw materials, including top branded EVA and triple-layer back sheet and high-transparency low-iron impact-resistant tempered glass.

PREMIUM QUALITY GUARANTEE

- Positive power tolerance 0 to +5W
- 10 year product workmanship warranty
- Upto 25 year linear power warranty of minimum peak power
- Proven field performance on MW-scale ground mounted projects in Europe
- Conforms to UL 1703, IEC and CE standards, IEC 61215
- Manufactured by partner under highest quality standards using German process techniques
- Internal by-pass diodes across 24 series cells resists effects of shading
- Passed 3rd party testing: Salt spray and Ammonia resistance

www.centrosolaramerica.com | 877.348.2555

c

CENTROSOLAR

PRODUCT SOLUTIONS
E-SERIES MODULES

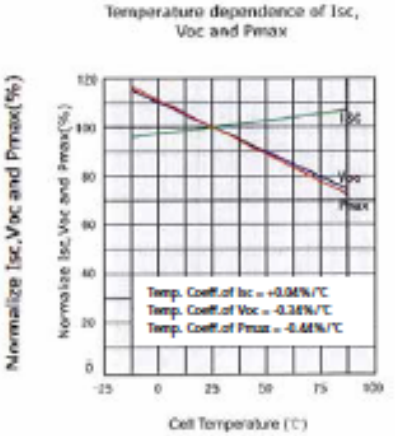
Technical Data

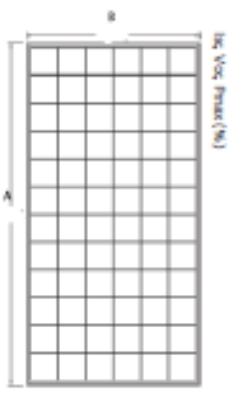
Model Type	E285 or E285B	E290 or E290B****	E295 or E295B****	E300 or E300B****	E305 or E305B****
Peak Power (Pmax)* Watts	285	290	295	300	305
Cell Type	Polycrystalline Silicon				
Number of Cells in Series	72				
Frame Color	Silver or Black (denoted by B after wattage designation)				
Power Tolerance	0 to +5W				
Voltage at Maximum Power (Vmp)	35.86	35.92	36.17	36.68	37.18
Current at Maximum Power (Imp)	7.95	8.08	8.16	8.18	8.21
Open Circuit Voltage (Voc)	44.72	44.75	44.78	44.89	45.12
Short Circuit Current (Isc)	8.55	8.62	8.68	8.72	8.78
Series Fuse	15A				
Maximum System Voltage: Vdc	1000				
Temp Coefficient (Pmax): %/degree C	-0.44				
Temp Coefficient (Voc): %/degree C	-0.34				
Temp Coefficient (Isc): %/degree C	0.04				
NOCT: degrees C	45.3				
Output Cable	#12 AWG (4 mm) x 47.2" (1200 mm)				
Connector Plug Type	MC4 Compatible				
Max Load Rating (psf)	45 lb/ft²				
Weight lbs (kg)	57.98 (26.3)				

****Product not yet available in all areas. Check with Centrosolar Product Management before ordering.

Dimensions

	A	B	C	D	E	F	G - Dia.	H - Slot
inch	77.01	39.06	37.25	7.87	9.84	1.57	0.16	0.55 x 0.35
mm	1956	992	946	200	250	40	4	14 x 9





*Standard testing conditions (STC): 1,000W/m², spectrum AM 1.5, cell temperature 25°C
** Measurement accuracy at STC -3/+3 %
***Electrical tolerance +/- 10 %
Information subject to change without notice

Copyright© 2013, Rev (10.11.01/2013). Specifications are subject to change without notice.
All trademarks are the property of their respective owners.

ANEXO 2 – Catálogo de inversores da Ingeteam®

INGECON SUN

Power
With transformer

50 / 60 / 70 / 80 / 90 / 100

HIGH EFFICIENCY IN MULTI-MEGAWATT SYSTEMS

Three phase inverter for medium and large power outputs on-roof applications and also for ground-based multi-megawatt applications.

Maximum efficiency at high temperatures
Advanced maximum power point tracker system (MPPT). Low voltage ride through capability, active power control and reactive power control. Suitable for medium voltage installations.

Easy to install
No additional items are required. Manual disconnection from the grid. Complete electrical protection equipment supplied as standard.

Easy to maintain
Internal datalogger for up to 3 months data storage. Control from either a remote PC or on-site from the inverter front key pad. Status and alarm LED indicators. LCD Screen. Useful life of more than 20 years.

Software included
Included at no extra cost are the INGECON® SUN Manager, INGECON® SUN Monitor and its iSun Monitor smartphone version for monitoring and recording the inverter data over the Internet.

Standard 5 year warranty, extendable for up to 25 years

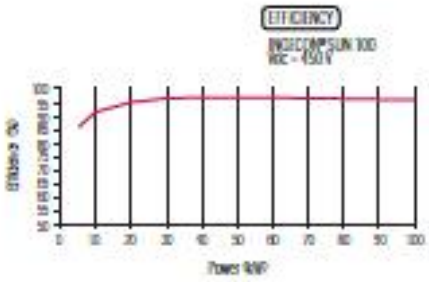
PROTECTIONS

- Galvanic isolation between the DC and AC side.
- Reverse polarity.
- Output short-circuits and overloads.
- Insulation failures.
- Anti-islanding with automatic disconnection.
- DC breaker.
- DC fuses.
- AC thermal magnetic breaker.
- DC surge arresters type 2.
- AC surge arresters type 2.

OPTIONAL ACCESSORIES

- Inter-inverter communication via RS-485, Ethernet or Bluetooth.
- GSM/GPRS remote communication.
- PV array string current monitoring INGECON® SUN String Control.
- Grounding kit if required for the PV modules.

EFFICIENCY



www.ingeteam.com
solar.energy@ingeteam.com

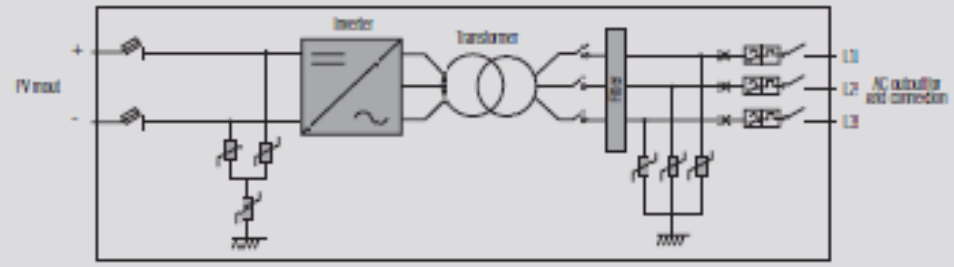
Ingeteam

INGECON **SUN** Power with transformer

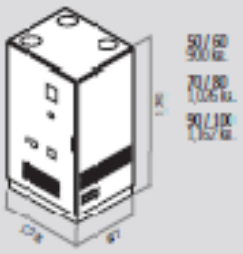
	50	60	70	80	90	100
Input (DC)						
Recommended PV array power range*	52 - 65 kWp	63 - 78 kWp	73 - 91 kWp	83 - 104 kWp	93 - 117 kWp	104 - 130 kWp
Voltage range MPP	405 - 750 V	405 - 750 V	405 - 750 V	405 - 750 V	405 - 750 V	405 - 750 V
Maximum voltage DC*	900 V	900 V	900 V	900 V	900 V	900 V
Maximum current DC	130 A	156 A	182 A	208 A	234 A	260 A
DC inputs	4	4	4	4	4	4
MPPT	1	1	1	1	1	1
Output (AC)						
Rated power AC*	55 kW	66 kW	77 kW	88 kW	99 kW	110 kW
Maximum current AC	93 A	118 A	131 A	156 A	161 A	161 A
Rated voltage AC	400 V	400 V	400 V	400 V	400 V	400 V
Frequency AC	50 / 60 Hz	50/60 Hz	50/60 Hz	50 / 60 Hz	50 / 60 Hz	50 / 60 Hz
Phi Cosine*	1	1	1	1	1	1
Phi Cosine adjustable	Yes. Smax=55 kVA	Yes. Smax=66 kVA	Yes. Smax=77 kVA	Yes. Smax=88 kVA	Yes. Smax=99 kVA	Yes. Smax=110 kVA
THD*	<3%	<3%	<3%	<3%	<3%	<3%
Efficiency						
Maximum efficiency	96.3%	96.4%	96.2%	97.6%	96.9%	96.8%
Euroefficiency	94.3%	94.7%	96.3%	96.7%	95.8%	95.7%
General Information						
Air cooling	2,600 m³/h	2,600 m³/h	2,600 m³/h	2,600 m³/h	2,600 m³/h	2,600 m³/h
Stand-by consumption*	30 W	30 W	30 W	30 W	30 W	30 W
Consumption at night	1 W	1 W	1 W	1 W	1 W	1 W
Ambient temperature	-20°C to +65°C	-20°C to +65°C	-20°C to +65°C	-20°C to +65°C	-20°C to +65°C	-20°C to +65°C
Relative humidity (non-condensing)	0 - 95%	0 - 95%	0 - 95%	0 - 95%	0 - 95%	0 - 95%
Protection class	IP20	IP20	IP20	IP20	IP20	IP20

Notes: * Depending on the type of installation and geographical location. * Must not be exceeded under any circumstances. Consider the voltage increase of the "Vo" at low temperatures. * AC Power for 40°C ambient temperature. For each °C of increase, the output power will be reduced at the rate of 1.8%. * For Pwr>25% of the rated power. * For Pwr>25% of the rated power and voltage in accordance with IEC 61000-3-4. * Consumption from PV field.
Compliance with standards: CE, IEC61000-6-2, IEC61000-6-4, EN50178, RD1699/2011, PO 12.3, VDE-AR-N-4105, VDE0126-1-1, CEI11-20, CEI0-21, Alessio 70 TERNA, Art9623-04-2008, MV Guideline BDEW, G5/2.

Power



Size and weight (mm)



Ingeteam