

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

Ícaro José Souza Torres de Vasconcelos

**DIMENSIONAMENTO E PROJETO DE UM SISTEMA
SOLAR FOTOVOLTAICO**

**CAMPINA GRANDE
2018**

ÍCARO JOSÉ SOUZA TORRES DE VASCONCELOS

DIMENSIONAMENTO E PROJETO DE UM SISTEMA
SOLAR FOTOVOLTAICO

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Universidade Federal de Campina Grande, como requisito necessário para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica

Área de Concentração: Eletrotécnica

Orientador:

Professor André Germano Dantas

Campina Grande, agosto de 2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

ÍCARO JOSÉ SOUZA TORRES DE VASCONCELOS

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, sendo aprovado em sua forma final pela banca examinadora:

Orientador(a): Prof. Dr. André Germano
Dantas
Universidade Federal de Campina Grande -
UFCG

Prof. Dr. Célio Anésio da Silva
Universidade Federal de Campina Grande -
UFCG

Campina Grande, 6 de agosto de 2018

*Dedico este trabalho à minha família pela
dedicação e amor com os quais me criou e formou meu caráter.*

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por me conceder sabedoria para enfrentar a vida e ter a capacidade de superar os obstáculos que nela encontrei.

Aos meus pais, João Bosco e Bernadete e ao meu irmão Victor, que apesar da distância, sempre me deram o maior apoio não deixando me faltar nada, me proporcionando os melhores ensinamentos ao longo da vida. Agradeço pelos esforços, confiança e amor que me dedicaram.

À minha família de Campina Grande, tio Hamurabi, tia Paula, e primo Rubem Medeiros que durante toda minha caminhada da graduação me apoiaram em uma nova cidade como pais e irmão, com conselhos, conversas, estudos, e diversos outros momentos me auxiliando da melhor maneira por todos esses anos.

Aos colegas de curso e da vida Pedro Barros, Bruno Ponte e André Augusto, com quem pude dividir anos da vida acadêmica, intermináveis horas de estudo, planos e sonhos.

À minha namorada Aline Nunes, pelo apoio e incentivo em todos os momentos, por vibrar junto com nossas conquistas, por chamar atenção nos momentos necessários e pelo ombro nos momentos difíceis. Sem ela, essa conquista não teria o mesmo gosto.

Agradeço aos professores que fizeram parte dessa caminhada e por todo conhecimento que me foi passado, dentre eles posso citar Célio Anésio, pelo apoio no trabalho, e André Germano por ter se disponibilizado para ser meu orientador se mostrando sempre disposto à minhas ideias e diálogos.

Agradeço também a todos aqueles, que não foram citados, mas que também tiveram grande contribuição na realização do sonho de adquirir o meu título de engenheiro eletricista.

*“Não fui eu que ordenei a você? Seja forte e corajoso!
Não se apavore nem desanime, pois o Senhor, o seu Deus,
estará com você por onde você andar.
(Bíblia Sagrada, Josué 1, 9)*

Resumo

A energia solar pode ser considerada inesgotável, e também as aplicações advindas dela. Nesse trabalho são explicados conceitos como irradiação e insolação, e como estes se relacionam com equipamentos de sistemas fotovoltaicos, como módulos solares ou inversores de frequência. Este trabalho de conclusão de curso teve como principal objetivo, explicar e descrever, da melhor forma possível, o projeto desses sistemas, para serem conectados à rede, os chamados sistemas *on-grid*. Tomou-se como exemplo uma empresa com condições de investir no projeto de uma usina de Minigeração de 109 *kW*, tendo essa usina que ser capaz de reduzir a dependência da rede de distribuição de energia pública e ainda assim ser viável financeiramente. Do ponto de vista de instalações elétricas são dimensionados cabos, disjuntores, fusíveis, números de módulos solares para uma certa região e sua organização. E do ponto de vista econômico é feito o levantamento do preço desse projeto para que seja verificado sua viabilidade econômica, e ainda é listado possibilidades de financiamento.

Palavras-chave: Irradiação, insolação, célula, solar, fotovoltaico, Minigeração, *on-grid*, *off-grid*, inversor.

Abstract

Solar energy can be considered inexhaustible, and also the applications coming from it. This work explains concepts such as irradiation and insolation, and how these relate to photovoltaic systems equipment, such as solar modules or frequency inverters. This work of completion of course had as main objective, to explain and to describe, in the best way possible, the design of these systems, to be connected to the network, the so-called on-grid systems. This work took as example a company with the conditions to invest in the design of a 109 kW Minigeneration plant, which has to be able to reduce the dependence of the public energy distribution network and still be financially viable. From the point of view of electrical installations are dimensioned cables, circuit breakers, fuses, numbers of solar modules for a certain region and its organization. And from an economic point of view, the price of this project is surveyed to verify its economic viability, and financing possibilities are listed.

Keywords: Irradiation, insolation, cell, solar, photovoltaic, minigeneration, on-grid, off-grid, inverter.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Mapa de Irradiação Horizontal diária média de 1999-2015. Fonte: http://globalsolaratlas.info/	17
Figura 2 – Célula fotovoltaica monocristalina. Fonte: http://integrahausenergiasolar.com.br	19
Figura 3 – Estrutura de uma célula fotovoltaica. Fonte: http://www.ufjf.br/labsolar	19
Figura 4 – Célula de silício verde na esquerda, e dourado na direita. Fonte: Solartec, República Tcheca.	20
Figura 5 – Módulo Fotovoltaico de silício policristalino de 240 W. Fonte: http://www.paineisfotovoltaicos.com/policristalinos.php	21
Figura 6 – Representação do Módulo FV. Fonte: [CARNEIRO 2010].	22
Figura 7 – Representação do arranjo em série de n módulos FV. Fonte: [CARNEIRO 2010].	23
Figura 8 – Representação do arranjo em paralelo de n módulos FV. Fonte: [CARNEIRO 2010].	23
Figura 9 – Representação do arranjo misto de n módulos FV. Fonte: [CARNEIRO 2010].	24
Figura 10 – Sistema FV autônomo domiciliar: (A) painel FV; (B) controlador de carga; (C) banco de baterias; (D) inversores; (E) cargas; (F) caixa de conexão. Fonte: [PINHO João T.; GALDINO 2014].	25
Figura 11 – Representação de um sistema fotovoltaico modular com três inversores. Fonte: [ABB Company 2014].	27
Figura 12 – Princípio de funcionamento do inversor monofásico. Fonte: [ABB Company 2014].	28
Figura 13 – Inversor Central trifásico ABB de 1732 kW. Fonte: [ABB 2017].	28
Figura 14 – Inversor de String trifásico ABB de 50 kW. Fonte: [ABB 2017].	36
Figura 15 – Vista superior frontal da unidade do Investidor Pandel Ltda.	38
Figura 16 – Estimativa Mensal de Geração X Consumo.	38
Figura 17 – Diagrama unifilar da entrada do sistema.	39
Figura 18 – Gráfico Comparativo do Custo X Retorno Financeiro.	40

Lista de tabelas

Tabela 1 – Escolha do ângulo de inclinação do módulo. Fonte: [Bosch Solar Energy Corp 2011].	18
Tabela 2 – Latitudes Geográficas específicas. Fonte: maps.google.com.	18
Tabela 3 – Comparação da eficiência de algumas tecnologias de células fotovoltaicas. Fonte: [PINHO João T.; GALDINO 2014].	20
Tabela 4 – Eficiências de células fotovoltaicas coloridas. Fonte: Solartec, República Tcheca.	20
Tabela 5 – Consumo mensal fora-ponta em kWh . Fonte: Pandel Ltda. abril 2017 a março 2018.	34
Tabela 6 – Valores de irradiação solar média mensal [$kWh/m^2/dia$] na cidade de Santa Rita (PB), a 5,2km do local. Fonte: SunData abril 2017 a março 2018.	35
Tabela 7 – Orçamento do Sistema FV.	39
Tabela 8 – Linhas de Financiamento para Energia Solar conhecidas. Fonte: próprio autor.	41

Lista de abreviaturas e siglas

FV	fotovoltaica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
NBR	Norma Brasileira aprovada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas
A	ampère
V	volt
W	watt
VA	volt ampère
k	quilo
h	horas
m^2	metro quadrado
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
MPP	<i>Maximum Power Point</i>
STC	<i>Standard Test Conditions</i>
NOCT	<i>Normal Operation Cell Temperature</i>
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
DPS	Dispositivo de Proteção contra Surtos

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivo	15
1.2	Organização	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	A Energia Emitida pelo Sol	16
2.1.1	Irradiância e Insolação	16
2.1.2	Orientação dos Módulos Fotovoltaicos	17
2.2	Células e Módulos Fotovoltaicos	18
2.2.1	Células Fotovoltaicas	18
2.2.2	Módulos Fotovoltaicos	19
2.2.3	Conexões dos módulos Fotovoltaicos	22
2.3	Geração Distribuída com Sistemas Fotovoltaicos	24
2.3.1	Sistemas Fotovoltaicos Autônomos	24
2.3.2	Sistemas Fotovoltaicos Conectados à rede elétrica	25
2.3.2.1	Organização	26
2.3.2.2	Inversores	27
2.3.2.3	Caixas de <i>Strings</i>	29
2.3.2.4	Quadros de Proteção	29
2.3.2.5	Medidor de energia	29
3	PROJETO	30
3.1	Dimensionamento	30
3.1.1	Cabos e Fusível	30
3.1.2	Número de Módulos	31
3.1.3	Inversores	31
3.2	Análise de Viabilidade Econômica	32
3.2.1	Valor presente líquido (VPL)	32
3.2.2	Taxa interna de retorno (TIR)	32
3.2.3	<i>PAYBACK time</i>	33
4	ESTUDO DE CASO	34
4.1	Dimensionamento	34
4.2	Viabilidade Econômica	39
4.3	Financiamento	41

5	CONCLUSÃO	42
	REFERÊNCIAS	43
	APÊNDICES	44
	APÊNDICE A – DIAGRAMA ELÉTRICO	45
	APÊNDICE B – FLUXO DE CAIXA E ANÁLISES FINANCEIRAS .	46
	ANEXOS	47
	ANEXO A – FOLHA DE DADOS DO MÓDULO SOLAR CS6U-330P.	48
	ANEXO B – FOLHA DE DADOS DO INVERSOR DE FREQUÊN- CIA ABB.	49
	ANEXO C – CONDIÇÕES DE GARANTIA PARA INVERSORES DE STRING ABB.	50

1 Introdução

Toda a energia proveniente do sol que incide na superfície de nosso planeta representa um montante maior que a demanda de toda a população que o habita durante um ano, sendo assim deve ser aproveitada o máximo possível. Uma das variadas formas de aplicação dessa energia é a utilização de painéis fotovoltaicos para geração de energia elétrica. No Brasil, condições climáticas, a exigência de diversificação para maior segurança energética e a necessidade mundial de se ter energias mais renováveis fizeram com que tecnologias de geração renovável como eólica e solar fossem mais requisitadas nos últimos anos. Ainda assim nosso país é muito dependente de fontes hidráulicas e térmicas a gás natural, sendo as hidrelétricas responsáveis por 60,71% e solar apenas 0,758% da produção [ANEEL 2018].

Em nosso país apenas em 2012 foi aprovada pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) a minuta da resolução normativa N° 482 que estabelece as condições gerais para o acesso de Microgeração e Minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica. Nesse mesmo ano procedimentos como conexão, proteção e especificação desses sistemas foram levados em consideração na NBR 5410 (Instalações elétricas de baixa tensão). Em um contexto mais regional o Nordeste possui uma insolação diária maior que a média nacional, o que corrobora com a viabilidade do uso de painéis fotovoltaicos para geração de energia elétrica distribuída, principalmente em edificações comerciais ou pequenas fábricas como padarias [VILLALVA M. G.; GAZOLI 2013].

No entanto o custo de células fotovoltaicas é ainda um grande desafio para empreendedores, então o aumento de possibilidades de oferta de energia elétrica vem estimulando o governo a criar formas de aumentar a acessibilidade a novas cadeias produtivas de energia. Como consequência dessas políticas de investimento e desenvolvimento, a demanda por energia solar tem aumentado junto com a eficiência de células solares, e diante deste fato o custo da energia elétrica fotovoltaica tem diminuído significativamente, e a tecnologia em questão se tornado cada vez mais competitiva.

No Brasil, programas de incentivo feitos pelo governo federal através de bancos e parcerias com empresas de tecnologia têm facilitado a utilização e instalação de sistemas solares fotovoltaicos em pequenos negócios, com a finalidade de cumprir o objetivo de expandir a energia, diminuir custos e garantir maior segurança energética [Banco do Nordeste 2016].

Sendo assim, a utilização de sistemas solares fotovoltaicos representa uma boa solução e uma alternativa economicamente interessante, referente a utilização residencial e

comercial, sendo utilizada principalmente conectada à rede (*on-grid*).

1.1 Objetivo

O principal objetivo desse trabalho de conclusão de curso é apresentar uma fundamentação teórica que facilite o entendimento de sistemas fotovoltaicos, tanto para residências quanto para pequenas e médias empresas, e com esse entendimento ser capaz de dimensionar e projetar um estudo de caso para aplicação de um sistema *on-grid* de painéis fotovoltaicos em uma pequena fábrica de pão congelado.

1.2 Organização

O presente trabalho está organizado da seguinte forma:

- Capítulo 2: neste capítulo serão explicados os conceitos relacionados aos sistemas fotovoltaicos como os tipos de células e módulos, funcionamento, cálculos.
- Capítulo 3: no capítulo três é feito um passo-a-passo do dimensionamento de um sistema fotovoltaico conectado à rede (*on-grid*).
- Capítulo 4: neste capítulo é aplicado os conhecimentos expostos anteriormente para dimensionar um sistema de Minigeração para um investidor, expondo algumas formas de financiamento e viabilidade econômica.
- Capítulo 5: aqui é feito uma conclusão do trabalho, comparando o que era pretendido e o que foi alcançado, e propondo atividades futuras.

2 Fundamentação Teórica

2.1 A Energia Emitida pelo Sol

O Sol é a sede dos processos termonucleares e produz uma grande quantidade de energia. A energia emitida pelo Sol é chamada de energia solar ou radiação solar. Apesar da distância considerável entre o Sol e a terra, a quantidade de energia solar que alcança a terra é substancial. É a principal fonte natural de energia da Terra e a que é produzida no lugar mais longe, o Sol. Outras fontes são: o fluxo de calor geotérmico gerado pelo interior da Terra, radioatividade terrestre natural e radiação cósmica, que são todos desprezíveis em relação à radiação solar.

A quantidade de energia recebida num determinado local geográfico varia no tempo: entre o dia e a noite devido à rotação da Terra e entre as estações por causa da órbita da Terra. E em um determinado momento também varia no espaço, por causa das mudanças na obliquidade dos raios solares variando de acordo com a longitude e latitude. Assim, a quantidade de energia recebida em um determinado local e tempo depende da posição relativa do Sol e da terra. É por isso que ambos a geometria e o tempo do Sol e Terra desempenham um papel importante na conversão da energia solar e sistemas fotovoltaicos [VILLALVA M. G.; GAZOLI 2013].

2.1.1 Irradiância e Insolação

Irradiância é a quantidade de energia luminosa emitida de um ponto para outro. Os fótons que carregam essa energia têm comprimentos de onda que podem variar de raios-X e raios gama ao infravermelho. Trata-se de uma medida de potência por área, medida em W/m^2 (watt por metro quadrado). Na superfície da terra a irradiância da luz solar é tipicamente em torno de $1000 W/m^2$, sendo este valor adotado como padrão na indústria fotovoltaica para especificação de instrumentos. Essa medida é muito útil para medir a eficiência de dispositivos e sistemas fotovoltaicos [ABB Company 2014].

Já a insolação é a radiação solar incidente em algum objeto. Mais especificamente, é a quantidade de energia solar que é incidente em uma área específica durante um período de tempo definido. Geralmente a insolação é expressa de duas maneiras: uma unidade é quilowatts-hora por metro quadrado (kWh/m^2), o que representa a quantidade média de energia que atinge uma área por hora, a outra é $Wh/m^2/dia$ (watt=hora por metro quadrado por dia) que é mais encontrado na prática, fazendo-se uso de tabelas e mapas de insolação que fornecem os valores diários. Um exemplo de mapa que mostra a insolação é o da figura 1.



Figura 1 – Mapa de Irradiação Horizontal diária média de 1999-2015. Fonte: <http://globalsolaratlas.info/>.

2.1.2 Orientação dos Módulos Fotovoltaicos

Se considera que os raios solares são ondas eletromagnéticas que viajam do Sol para a Terra paralelas entre si, chegando em linha reta. Ao entrar em nossa atmosfera uma parte desses raios é dispersada sendo refratados para todas as direções, mas a grande maioria continua sua trajetória reta, o que corresponde a radiação direta. Essa radiação direta incide com uma inclinação diferente em cada ponto do planeta, e essa inclinação varia também de acordo com a época do ano, posição da Terra e Sol no espaço.

Para instalar corretamente um módulo solar fotovoltaico deve-se levar em conta o movimento diário do Sol usando o ângulo azimutal, que é o ângulo de incidência dos raios solares em relação ao norte geográfico. Para isso módulos solares com rastreamento automático da posição do Sol são necessários quando se quer otimizar ao máximo o ângulo de incidência dos raios solares, mas são mais caros e por isso são mais comuns em instalações fotovoltaicas voltadas para produção e venda de energia [VILLALVA M. G.; GAZOLI 2013].

Sistemas fotovoltaicos mais simples utilizam-se de módulos solares fixos, sem um sistema de rastreamento solar, então a melhor forma de orientá-los é com sua face voltada para o norte geográfico (ou para o Sul geográfico caso o local esteja acima da linha do equador), com uma certa inclinação que depende da latitude, o que melhora o aproveitamento da luz solar porque durante todo o dia há raios solares incidindo sobre sua superfície, se destacando o período do meio-dia solar [VILLALVA M. G.; GAZOLI 2013].

Marcas de painéis fotovoltaicos possuem manuais, como o da Bosch®, que indicam

o ângulo α de inclinação fixa para valores de latitude, a tabela 1 mostra as recomendações deste manual. Por fim, basta saber a latitude do local que será instalado, que tanto em João Pessoa quanto em Campina Grande, α deve ser 10° , ou para Porto Alegre (RS) $\alpha = 35^\circ$, como mostrado na tabela 2.

Tabela 1 – Escolha do ângulo de inclinação do módulo. Fonte: [Bosch Solar Energy Corp 2011].

Latitude geográfica do local	Ângulo de inclinação recomendado
0° a 10°	$\alpha = 10^\circ$
11° a 20°	$\alpha = \text{latitude}$
21° a 30°	$\alpha = \text{latitude} + 5^\circ$
31° a 40°	$\alpha = \text{latitude} + 10^\circ$
41° ou mais	$\alpha = \text{latitude} + 15^\circ$

Tabela 2 – Latitudes Geográficas específicas. Fonte: maps.google.com.

Cidade	Latitude
João Pessoa	$7^\circ S$
Campina Grande	$7^\circ S$
Porto Alegre	$30^\circ S$
Salvador	$12^\circ S$

2.2 Células e Módulos Fotovoltaicos

2.2.1 Células Fotovoltaicas

O efeito fotovoltaico (FV) é a base da conversão de luz a eletricidade em células fotovoltaicas ou solares. Descrito simplesmente, o efeito FV é o seguinte: luz, que é pura energia, entra em uma célula fotovoltaica e transmite energia suficiente para alguns elétrons (partículas atômicas carregadas negativamente) para libera-los. Uma barreira de potencial embutido na célula age sobre esses elétrons para produzir uma tensão (a chamada fotovoltagem), que pode ser usada para dirigir uma corrente através de um circuito [VILLALVA M. G.; GAZOLI 2013].

A figura 2 ilustra a estrutura de uma célula fotovoltaica que é composta por duas camadas de semicondutor "p" e "n", uma grade de coletores metálicos superior e uma base metálica inferior.

A grade e a base inferior são os terminais elétricos que fazem a coleta da corrente elétrica produzida pela ação da luz. A parte superior da célula é a que recebe luz e precisa ser translúcida e por isso esses contatos elétricos são feitos por uma fina grade metálica impressa na célula. Ainda é comum ter uma camada de material antirreflexo para aumentar



Figura 2 – Célula fotovoltaica monocristalina. Fonte: <http://integrahausenergiasolar.com.br>.

a absorção da célula, essa estrutura é mostrada na figura 3 [PINHO João T.; GALDINO 2014].

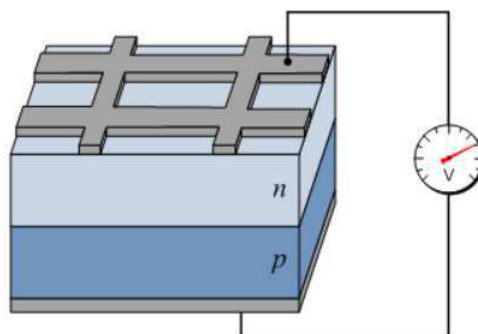


Figura 3 – Estrutura de uma célula fotovoltaica. Fonte: <http://www.ufjf.br/labsolar>.

Existem atualmente diversas tecnologias para fabricar células de diferentes tipos. As mais comuns encontradas no mercado são de silício monocristalino, policristalino e a do filme fino de silício. Há também as de silício amorfo, micromorfo, célula solar híbrida [VILLALVA M. G.; GAZOLI 2013].

Alguns fabricantes disponibilizam comercialmente células FV de silício coloridas para módulos destinados à integração arquitetônica. Essas cores são obtidas por diferentes composições e/ou espessuras na camada antirreflexiva das células, o que resulta em diferenças na eficiência de cada cor. Um exemplo de cores pode ser visto no fabricante Solartec® que em seu catálogo é oferecido células verde, magenta, douradas, prateadas, azuis e marrons. A seguir são mostrados exemplos de células na figura 4 e nas tabelas 3 e 4 eficiências de alguns tipos de células e outra com as cores [PINHO João T.; GALDINO 2014].

2.2.2 Módulos Fotovoltaicos

Quando colocada à prova uma célula FV sozinha produz pouca eletricidade e por isso deve ser agrupada produzindo painéis. Os termos painel, placa ou módulo têm o

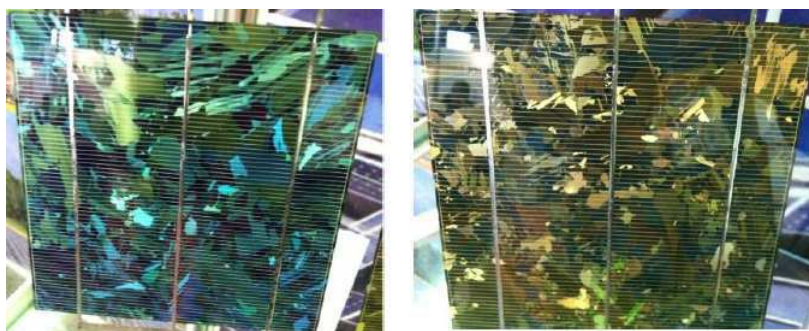


Figura 4 – Célula de silício verde na esquerda, e dourado na direita. Fonte: Solartec, República Tcheca.

Tabela 3 – Comparação da eficiência de algumas tecnologias de células fotovoltaicas. Fonte: [PINHO João T.; GALDINO 2014].

Material da célula fotovoltaica	Eficiência da célula	Eficiência dos módulos
Silício Monocristalino	18%	14%
Silício Policristalino	15%	13%
Silício Amorfo	10,5%	7,5%
Silício Micromorfo	10,7%	9,1%
Célula Solar Híbrida	17,3%	15,2%

Tabela 4 – Eficiências de células fotovoltaicas coloridas. Fonte: Solartec, República Tcheca.

Cor	Eficiência
azul	13,6%
marrom	12,2%
dourado	13,6%
cinza	12,2%
magenta	13,6%
verde	12,2%
prateada	12,2%

mesmo significado e são usados para descrever um agrupamento de células FV.

Um módulo é basicamente o conjunto de células montadas em estruturas rígidas e conectadas eletricamente em série, para que produzam tensões maiores. Os de silício cristalino que são os mais encontrados no mercado produzem uma potência entre 50 e 400 W, e cada um com tensões máximas de 37 V, a figura 5 mostra um módulo policristalino [VILLALVA M. G.; GAZOLI 2013].

Um módulo FV é tipicamente formado por, na sequência de posições, uma camada de vidro, seguida de uma lâmina de plástico, células FV, lâmina de plástico, conexões elétricas, lâmina de suporte, e a moldura de alumínio que deve ser forte o suficiente para suportar todo o resto. Há também uma caixa para conexões de onde saem os cabos



Figura 5 – Módulo Fotovoltaico de silício policristalino de 240 W. Fonte: <http://www.paineisfotovoltaicos.com/policristalinos.php>.

conectores positivo e negativo (macho e fêmea) que são padronizados para qualquer módulo [VILLALVA M. G.; GAZOLI 2013].

Ao pesquisar por um painel FV é bom atentar a algumas características importantes nas folhas de dados (*Data Sheet*), como características elétricas e/ou mecânicas. Temos dois tipos de características elétricas importantes, as de STC (*Standard Test Conditions*) e as de NOCT (*Normal Operation Cell Temperature*).

O STC compreende informações dos módulos que foram obtidas em certas condições padronizadas para todos os fabricantes, dessa forma é possível comparar módulos FV de marcas diferentes mais facilmente. Essas condições consideram uma irradiância solar de 1000 W/m^2 e temperatura de 25° C . Já o NOCT considera valores mais próximos do funcionamento real, e é adotado uma irradiância de 800 W/m^2 para uma temperatura do ar de 20° C .

Por exemplo: foram levantadas algumas dessas características para o painel *KuModule High Efficiency 365P-FG* da fabricante *Canadian Solar*, e divididas em STC, NOCT e propriedades mecânicas, citadas a seguir.

STC:

- Potência máxima nominal $P_{max} = 365 \text{ W}$;
- Tensão de operação $V_{op} = 39,8 \text{ V}$;
- Corrente de operação $I_{op} = 9,18 \text{ A}$;
- Tensão de circuito aberto $V_{CA} = 47,2 \text{ V}$;
- Corrente de curto circuito $I_{sc} = 9,75 \text{ A}$;
- eficiência de 18,4%.

NOCT:

- Potência máxima nominal $P_{max} = 271 W$;
- Tensão de operação $V_{op} = 36,8 V$;
- Corrente de operação $I_{op} = 7,38 A$;
- Tensão de circuito aberto $V_{CA} = 44,3 V$;
- Corrente de curto circuito $I_{sc} = 7,87 A$;

Mecânicas:

- Célula policristalina (144 células);
- Dimensões $2000 \times 992 \times 32 mm$;
- Peso de $22,5 kg$

2.2.3 Conexões dos módulos Fotovoltaicos

Para um sistema FV gerar a eletricidade desejada, os módulos podem ser conectados em série ou em paralelo formando assim um conjunto, ou arranjo, fotovoltaico (em inglês é denominado como *array*). Nos itens mostrados a seguir serão descritos esses tipos de arranjos com módulo que é representado na figura 6.

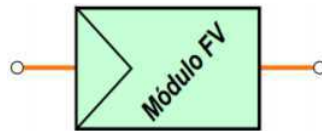


Figura 6 – Representação do Módulo FV. Fonte: [CARNEIRO 2010].

- Em série Neste arranjo, e nos próximos desta seleção, os módulos devem ser do mesmo tipo para minimizar as perdas de potência do sistema.

A tensão de saída V_{total} será igual a soma das tensões V_1 , V_2 até V_n em n módulos, e a corrente I será a mesma por todo o conjunto, como mostrado nas equações 2.1 e 2.2. Esta associação em série de módulos fotovoltaicos, mostrada na figura 7, permite obter tensões mais elevadas, mantendo a corrente estipulada do módulo. É muito utilizado em arranjos conectados à rede como veremos na seção 2.3.1 [CARNEIRO 2010].

$$V_1 = V_2 = \dots V_n = V \Rightarrow V_{total} = n \cdot V \quad (2.1)$$

$$I_1 = I_2 = \dots I_n = I \quad (2.2)$$

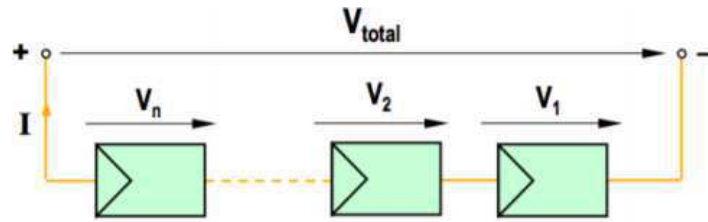


Figura 7 – Representação do arranjo em série de n módulos FV. Fonte: [CARNEIRO 2010].

- Em paralelo

Diferente do em série, no arranjo em paralelo a tensão de saída total V_{total} será igual a tensão de saída de um módulo individual, no entanto a corrente de saída total I_{total} será a soma das correntes de cada módulo, como mostrado nas equações 2.3 e 2.4. Este arranjo é tipicamente usado em sistemas autônomos visto na seção 2.3.2 e é mostrado na figura 8 [CARNEIRO 2010].

$$I_1 = I_2 = \dots = I_n \Rightarrow I_{total} = n \cdot I \quad (2.3)$$

$$V_{total} = V_1 = \dots = v_n \quad (2.4)$$

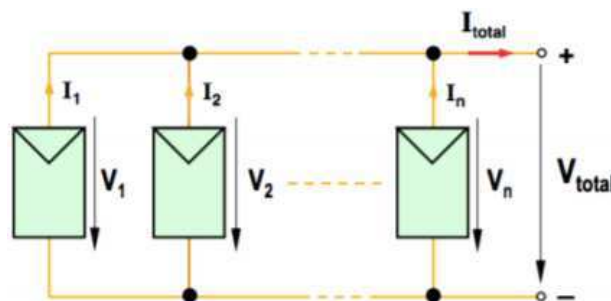


Figura 8 – Representação do arranjo em paralelo de n módulos FV. Fonte: [CARNEIRO 2010].

- Em série e em paralelo

Aqui serão obtidas características das associações anteriores sendo capazes de chegar a valores maiores de corrente e de tensão. Esse arranjo é utilizado em sistemas conectados à rede com maiores níveis de potência.

Neste contexto, haverá n colunas em paralelo e m módulos em série, mostrado na figura 9. A corrente total I_{total} é a soma das correntes de cada fileira do paralelo, e a tensão V_{total} a soma das tensões dos módulos na coluna em série, como mostrado nas equações 2.5 e 2.6 [CARNEIRO 2010].

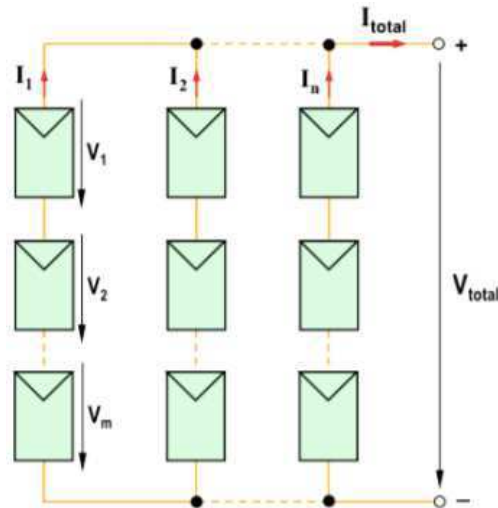


Figura 9 – Representação do arranjo misto de n módulos FV. Fonte: [CARNEIRO 2010].

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n \Rightarrow I_{total} = n \cdot I \quad (2.5)$$

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_m \Rightarrow V_{total} = m \cdot V \quad (2.6)$$

2.3 Geração Distribuída com Sistemas Fotovoltaicos

O modo tradicional de geração de energia consiste em uma grande usina geradora longe dos centros consumidores, como por exemplo as usinas do rio São Francisco do Xingó, Paulo Afonso I, II, III e etc., e esse outro método é a geração distribuída que se opõe ao tradicional ao encolher a distância da geração e do consumo, podendo ser desde parques eólicos a usinas fotovoltaicas [VILLALVA M. G.; GAZOLI 2013].

As modalidades de geração distribuída podem ser parques de geração ou pequenos geradores de energia que são conectados na rede elétrica e instalados em centros urbanos. Os geradores pequenos são os sistemas fotovoltaicos, estes são conectados em residências, comércios, ou até em pequenas fábricas como se pretende fazer no capítulo 4 de Estudo de caso. Nesta seção serão mostrados primeiramente conceitos dos sistemas autônomos (*off-grid*) e depois um aprofundamento nos sistemas conectados à rede (*on-grid*).

2.3.1 Sistemas Fotovoltaicos Autônomos

Também chamados de isolados, os sistemas autônomos são usados em locais onde não há, ou é limitado, o atendimento da rede elétrica. Podem ser encontrados em aplicações com finalidade de economia de energia como na iluminação pública, sinalização de estradas, sistema de telecomunicações, entre outros. Os sistemas isolados foram regulamentados no

Brasil pela resolução da ANEEL No 83/2004, popularizando esses sistemas em unidades rurais [VILLALVA M. G.; GAZOLI 2013].

Esse sistema possui alguns componentes essenciais que são mostrados na Figura 10 e explicados a seguir:

- Bateria: A característica intermitente aleatória da radiação solar faz ser necessário o uso de banco de baterias em sistemas isolados. Estas podem ser agrupadas em série para fornecer uma tensão maior, ou em paralelo que pode acumular mais energia elétrica proporcionando o fornecimento de correntes maiores.
- Controlador de Carga: faz a correta conexão entre a bateria e o módulo FV, evitando que a bateria seja sobrecarregada ou descarregada excessivamente
- Inversor: converte corrente contínua em corrente alternada (CC-CA), operação necessária para alimentar a carga.
- Módulo FV: possuem valores de tensão e potência inferiores aos de sistemas *on-grid* operando em grande parte na tensão de 12 V, e são fabricados em sua maioria para serem compatíveis com esses sistemas.

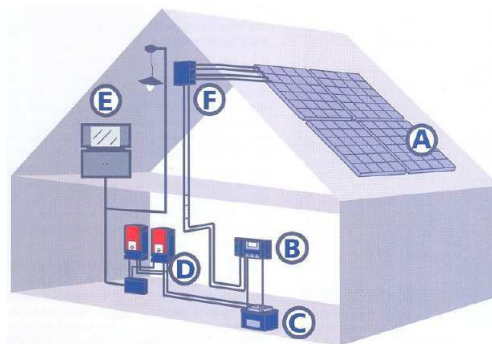


Figura 10 – Sistema FV autônomo domiciliar: (A) painel FV; (B) controlador de carga; (C) banco de baterias; (D) inversores; (E) cargas; (F) caixa de conexão. Fonte: [PINHO João T.; GALDINO 2014].

2.3.2 Sistemas Fotovoltaicos Conectados à rede elétrica

Esses sistemas operam junto à rede elétrica com o objetivo de reduzir ou eliminar o consumo da rede pública, podendo ainda gerar excedentes. No Brasil e em outros países é incentivado a geração excedente, sendo remunerado pela energia exportada da geração local.

Em abril do ano 2012 a ANEEL publicou a resolução n° 482 que permitiu no Brasil a geração distribuída desencadeando uma popularização dos sistemas FV. Nessa resolução

são classificadas categorias de sistemas fotovoltaicos, de acordo com seu tamanho, que são [ANEEL 2012]:

- Microgeração: potência $\leq 100\text{ kW}$;
- Minigeração: potência entre 100 kW e 1 MW ;
- Usinas de Eletricidade: potência acima de 1 MW .

O sistema que será desenvolvido no capítulo 4 será de Minigeração e por isso será feito um enfoque nas características dos sistemas com relação a essa categoria.

A categoria de Minigeração fotovoltaica corresponde aos sistemas fotovoltaicos instalados nos consumidores comerciais ou industriais, reduzindo ou até zerando o gasto com a demanda por energia elétrica desses consumidores, diminuindo assim a dependência da energia da rede das distribuidoras, proporcionando economia na conta. Além do mais, nos dias de hoje é muito importante para a imagem de empresas buscar por soluções renováveis e não poluidoras o que é o caso do sistema proposto [ANEEL 2012].

A seguir serão mostrados 5 subtópicos que ajudarão a entender e a tomar decisões relacionadas aos principais componentes em um sistema FV. São eles a organização dos módulos, inversores, caixa de *strings*, quadro de proteção e medidor de energia.

2.3.2.1 Organização

Como mostrado anteriormente os módulos FV podem ser organizados em série e em paralelo, aumentando a capacidade de produção de energia e com isso os níveis de tensão e de corrente. Os módulos ligados em série constituem uma *string* e o número de módulos nela vai determinar o valor da tensão aplicada nos terminais do inversor, então o mesmo deve ser dimensionado para suportar a tensão do *string* em circuito aberto.

Normalmente se encontram inversores de frequência comerciais com tensões de entrada que podem variar de 200 V a 1000 V . Esse valor de tensão determinará quantos módulos FV podem ter por *string*. No inversor há também um limite de corrente por entrada, esse valor irá dizer o limite de *strings* em paralelo. O cálculo para o dimensionamento dos *strings* será mostrado no próximo capítulo de Projeto [VILLALVA M. G.; GAZOLI 2013].

Um problema comum nos sistemas FV são áreas do conjunto de painéis com condições irregulares de iluminação, onde podem haver pontos possíveis de máxima potência (MPP). Esse problema é resolvido pelos MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) dos inversores, e por uma distribuição mais eficiente dos módulos solares. Essa forma eficiente de organização dos sistemas FV é a modular, onde são empregados inversores de frequência com potências menores que a total do sistema para diferentes grupos de módulos. A figura

11 mostra um exemplo dessa organização de onde sai uma fase de cada inversor [ABB Company 2014].

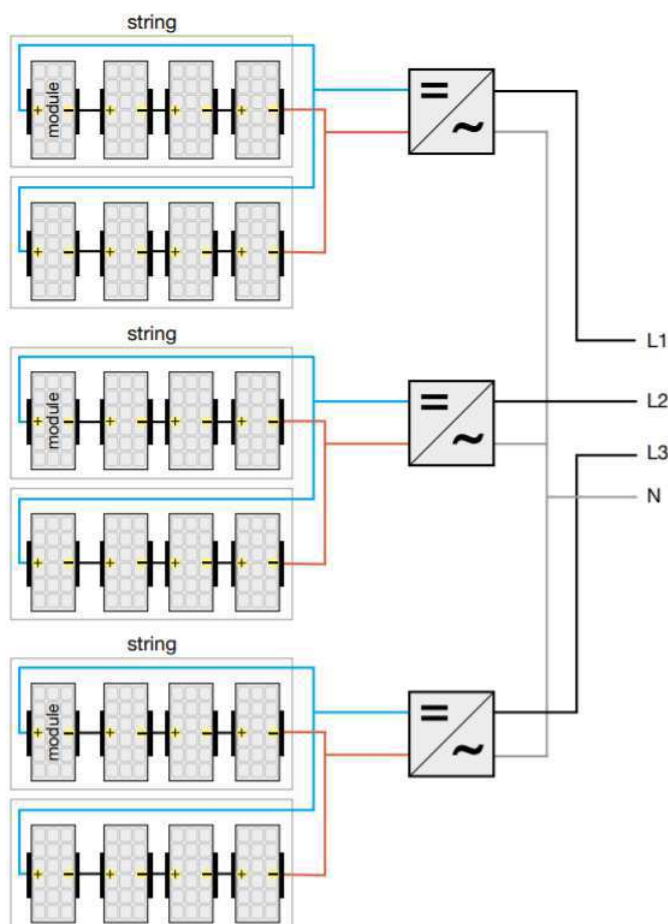


Figura 11 – Representação de um sistema fotovoltaico modular com três inversores. Fonte: [ABB Company 2014].

2.3.2.2 Inversores

Os painéis FV geram uma corrente contínua e por isso é preciso o uso de inversores para converter essa tensão para corrente alternada na frequência de operação da rede pública. A forma de funcionamento dos inversores de sistemas *on-grid* é diferente dos de *off-grid*, nesses conectados à rede o inversor CC-CA funciona como uma fonte de corrente. Para resumir de forma prática, os sistemas autônomos precisam fornecer tensão elétrica para o consumidor local, enquanto que o conectado à rede fornece corrente elétrica e não tem capacidade de fornecer tensão aos consumidores, ou seja, este só funciona se estiver conectado à rede elétrica [PINHO João T.; GALDINO 2014]. Na figura 12 temos a representação de como funciona um inversor monofásico.

Inversores para conexão à rede elétrica estão disponíveis em diversos níveis de potência que vão de 250 W, quando há apenas um módulo conectado, a vários quilowatts

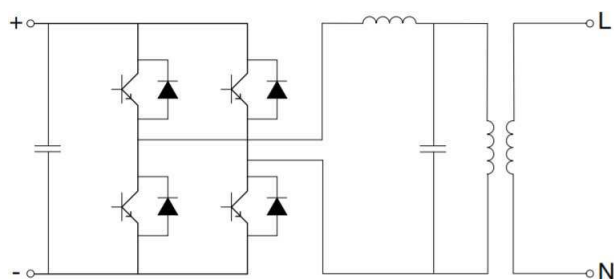


Figura 12 – Princípio de funcionamento do inversor monofásico. Fonte: [ABB Company 2014].

(kW). O mais comumente encontrado são inversores monofásicos com potências de até $5 kW$ [VILLALVA M. G.; GAZOLI 2013].

Para a categoria de Minigeração são necessários inversores maiores, que forneçam a conversão necessária de CC-CA para instalações fotovoltaicas de pequeno a médio porte com alto desempenho. A multinacional suíça ABB, por exemplo, oferece opções de inversores com potências que variam de $1,2$ a $120 kW$. Os fabricantes de inversores disponibilizam três tipos de inversores [ABB Company], são eles:

- Micro inversor: Possuem potências menores, e são indicados para sistemas fotovoltaicos residenciais.
- Inversor de *strings*: Com potências que vão até cerca de $120 kW$, são indicados para usinas de Minigeração.
- Inversor Central: Com potências que vão até cerca de $2300 kW$, são indicados para usinas fotovoltaicas ou de Minigeração. Para exemplificar é mostrado o inversor da figura 13.



Figura 13 – Inversor Central trifásico ABB de $1732 kW$. Fonte: [ABB 2017].

2.3.2.3 Caixas de *Strings*

Também chamada de *string box*, tem a função de fazer a ligação dos *strings* de um conjunto FV. Pode ser construída por componentes avulsos encontrados no mercado ou comprada já pronta como no inversor da figura 14, que vem com um quadro de proteção CC que desempenha a função de uma *string box* de 12 ou de 16 entradas (*input*) CC.

A caixa concentra os cabos elétricos dos terminais positivo e negativo em dois barramentos tendo cada cabo de cada *string* um fusível que protege os módulos e os cabos contra sobrecargas e correntes reversas. Caso esses fusíveis não sejam usados os cabos devem ser dimensionados para a máxima corrente de curto-circuito do conjunto de módulos [VILLALVA M. G.; GAZOLI 2013].

2.3.2.4 Quadros de Proteção

A NBR 5410 de instalações elétricas de baixa tensão é usada para fazer o dimensionamento dos cabos, chaves, e outros dispositivos de proteção do sistema FV. Nele vão ter especialmente dois quadros, um de Proteção de Corrente Contínua e outro de Proteção de Corrente Alternada [ABNT 2004].

O quadro de proteção de corrente contínua do sistema FV, além de possuir os fusíveis para a conexão dos *string*, incorpora uma chave de desconexão CC e o dispositivo de proteção de surto (DPS). O quadro de proteção CC pode ter a função da caixa de *string*. No mesmo quadro deve estar presente o barramento de aterramento, necessário para coletar as ligações à terra das estruturas metálicas e carcaças dos módulos FV [ABB 2017].

O quadro de proteção de corrente alternada faz a conexão entre os inversores do sistema FV e a rede elétrica. Os dispositivos e o modo de dimensionamento são semelhantes aos empregados nas instalações elétricas convencionais. Em um sistema com saída trifásica por exemplo, são usados disjuntores bipolares, disjuntor diferencial residual (DDR), dispositivo de proteção de surto (DPS), e o aterramento [ABB 2017].

Para o aterramento é recomendada a equipotencialização da instalação com a conexão unificada de todos os barramentos e condutores de ligação à terra, tanto do lado CA quanto do lado CC [VILLALVA M. G.; GAZOLI 2013].

2.3.2.5 Medidor de energia

Para o monitoramento da geração de energia deve-se usar os medidores de energia, que podem ser monofásicos ou trifásicos e são instalados entre o disjuntor de entrada do quadro de proteção CA dos sistemas FV e o ponto de conexão com a rede [VILLALVA M. G.; GAZOLI 2013].

3 Projeto

3.1 Dimensionamento

Nesta seção será explicado como deve ser dimensionado os componentes mencionados no capítulo anterior, como cabos, fusíveis, o número de módulos e o inversor. Primeiramente é necessário saber quanto se deseja gerar no sistema conectado, caso se queira abater total ou parcialmente a demanda energética da rede pública, ou se o local e o limite de investimento do consumidor têm capacidade para tanto.

Para saber quanto de energia é preciso produzir é necessário saber quanto se gasta mensalmente, observando os dados na conta de eletricidade. Daí então pode-se tomar as decisões e dimensionar número de módulos, cabos, inversor como vai ser mostrado a seguir [MEDEIROS 2017].

3.1.1 Cabos e Fusível

Para o dimensionamento das conexões elétricas do lado de corrente alternada os critérios usados devem seguir a norma NBR 5410 de instalações elétricas de baixa tensão. Já para o lado da corrente contínua os cabos devem ser específicos para aplicações em sistemas FV, com características de proteção contra a radiação solar e temperaturas extremas. É recomendado que os cabos, que conectam os módulos ao inversor, tenham uma tensão de isolamento entre 300 V e 1000 V e a capacidade de condução de corrente seja 25% maior que a corrente de curto circuito calculada para o conjunto de módulos [VILLALVA M. G.; GAZOLI 2013], ou seja:

$$I_{cabos} \geq I_{CC,STC} \cdot 1,25 \quad (3.1)$$

Sendo I_{cabos} a corrente suportada nas instalações em corrente contínua, e $I_{CC,STC}$ a corrente de curto circuito do conjunto de módulos.

Para o dimensionamento dos fusíveis do lado CC se deve calcular a corrente máxima suportada usando:

$$1,1 \cdot I_{CC,STC} \leq I_F \leq I_R \quad (3.2)$$

Sendo I_F a corrente nominal do fusível, e I_R a corrente reversa do módulo FV que é especificada no pelo fabricante.

3.1.2 Número de Módulos

Sabendo o tamanho da demanda que se deseja suprir é escolhido qual módulo será usado e assim pode-se calcular a sua produção diária de energia. Para isso a melhor forma vai ser pelo método da insolação.

Para o método da insolação (expressa em $Wh/m^2/dia$) é necessário a informação sobre a energia do Sol disponível no local. Quando obtida a média diária para cada mês do ano se determina a média anual que será usada no cálculo. Essa média anual pode levar a excesso de geração em épocas de verão e falta no inverno, mas com o sistema de créditos implantados pela ANEEL, a energia excedente nos meses bons pode suprir os meses ruins de geração. O cálculo usado para saber a energia produzida pelo módulo FV é o seguinte [VILLALVA M. G.; GAZOLI 2013]:

$$E_m = E_s \cdot A_m \cdot \eta_m \quad (3.3)$$

Sendo E_m a energia produzida pelo módulo diariamente em Wh , E_s a insolação diária em $Wh/m^2/dia$, A_m a área da superfície do módulo em m^2 e η_m a eficiência do módulo.

Calculada a energia produzida pelo módulo e sabendo quanto que se deseja produzir no sistema, para saber quantos módulos devem ser instalados é usada a equação 3.4 [VILLALVA M. G.; GAZOLI 2013].

$$N_p = \frac{E_{sistema}}{E_{modulo}} \quad (3.4)$$

Sendo N_p o número de módulos, $E_{sistema}$ a quantidade de energia que se deseja gerar no sistema num intervalo de tempo e E_{modulo} a energia gerada por cada módulo no mesmo intervalo de tempo, calculado pela equação 3.3.

3.1.3 Inversores

Para o dimensionamento do(s) inversor(s) deve ser seguido dois critérios principais, são eles [VILLALVA M. G.; GAZOLI 2013]:

- O valor da tensão de circuito aberto do *string* não pode ser maior que o aceitável pelo input do inversor, caso esse critério não seja seguido poderá danificar permanentemente o equipamento;
- A potência do inversor deve ser maior ou igual a potência de pico do conjunto de módulos FV, caso esse critério não seja seguido, sendo potência de pico dos módulos superdimensionada, o equipamento não será danificado, mas vai impedir o aproveitamento máximo do conjunto FV na operação nominal.

3.2 Análise de Viabilidade Econômica

É necessário o uso de algumas técnicas de análise econômica para viabilizar uma melhor tomada de decisão do investidor. Incógnitas como o possível lucro ou prejuízo que o sistema pode proporcionar na sua vida útil. Para isso serão aqui apresentados três métodos de cálculo: Valor presente líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e o *PAYBACK time*. Para a aplicação desses métodos o primeiro a fazer deve ser o levantamento dos preços dos equipamentos e do trabalho necessário na montagem.

3.2.1 Valor presente líquido (VPL)

O valor presente líquido (VPL) é a diferença entre o valor presente das entradas de caixa e o valor presente das saídas de caixa ao longo de um período de tempo. O VPL é usado no orçamento de capital para analisar a rentabilidade de um investimento ou projeto projetado. Ele é calculado da seguinte forma [SAMANEZ 2009]:

$$VPL = -FC_0 + \sum_{t=1}^T \frac{FC_t}{(1+k)^t} \quad (3.5)$$

Sendo:

- FC_0 o fluxo de caixa inicial, ou investimento;
- FC_t o fluxo de caixa no período t ;
- T o período total de investimento;
- k o custo capital;
- t o período onde o dinheiro está sendo investido.

A viabilidade do projeto depende do sinal do VPL: se for positivo é viável mas se for negativo não é viável.

3.2.2 Taxa interna de retorno (TIR)

A TIR de um investimento é a taxa de desconto na qual o valor presente líquido dos custos (soma dos fluxos de caixa negativos) do investimento é igual ao valor presente líquido dos benefícios (soma dos fluxos de caixa positivos) do investimento. Quanto mais alta a TIR de um projeto, mais desejável é empreender o projeto. Um investimento é considerado aceitável se sua taxa interna de retorno for maior que uma taxa mínima

aceitável de retorno, ou custo de capital. A TIR é calculada da seguinte forma [SAMANEZ 2009]:

$$\sum_{t=1}^T \frac{FC_t}{(1 + TIR)^t} - FC_0 = 0 \quad (3.6)$$

3.2.3 PAYBACK time

Payback time significa o período de tempo que um projeto requer para recuperar o dinheiro investido nele. É principalmente expresso em anos. Um projeto de investimento é aceito ou rejeitado com base no período de retorno, podendo ser maior (viável) ou menor (inviável) que seu tempo de vida útil [SAMANEZ 2009].

Existem dois tipos de *Payback*, o simples e o descontado, a diferença dos dois é que o primeiro não considera as variações do valor do dinheiro no tempo e outro considera.

Método Simples:

$$Payback\ time = \frac{Investimento\ Inicial}{Economia\ Anual} \quad (3.7)$$

No método descontado deve determinar o valor do *PB* (*PayBacktime*) na equação:

$$\sum_{t=1}^{PB} \frac{FC_t}{(1 + k)^t} - FC_0 = 0 \quad (3.8)$$

Sendo, *PB* o *payback time* do investimento, FC_t o fluxo de caixa no tempo t , FC_0 o valor do investimento no projeto, e k o valor do custo capital que nesse trabalho será adotado 10% por ser um valor médio pra esta variável.

4 Estudo de Caso

No estudo de caso será projetado um Sistema de Minigeração Fotovoltaico para uma pequena fábrica de pão congelado. O atendimento de energia do local é o do Grupo A de média tensão $13,8\text{ kV}$, e medição na baixa tensão. Há uma demanda contratada de 55 kW que dependendo do nível da geração, poderá ser aumentado. No local há uma subestação com transformador de 150 kVA , o que facilita aumentar os limites da geração.

Primeiramente é preciso fazer o levantamento da média do consumo de energia anual. A tabela 5 mostra a demanda da empresa em um intervalo de um ano.

Tabela 5 – Consumo mensal fora-ponta em kWh . Fonte: Pandel Ltda. abril 2017 a março 2018.

Mês	Abril (17)	Maio (17)	Junho (17)	Julho (17)
Consumo	12956	13858	14186	14186
Mês	Agosto (17)	Setembro (17)	Outubro (17)	Novembro (17)
Consumo	13940	17302	17712	17138
Mês	Dezembro (17)	Janeiro (18)	Fevereiro (18)	Março (18)
Consumo	17712	17138	17056	14268

Faz-se a média de todos os valores da tabela 5, que totaliza uma média mensal anual de $E_{\text{sistema Anual}} = 15621\text{ kWh}$.

4.1 Dimensionamento

A empresa fornecedora *CanadianSolar* oferece módulos modernos e eficientes de alta potência, por isso foi escolhido um de seus módulos solares, o *MAXPOWER CS6U-330P*.

Esse módulo possui 72 células policristalinas e cabos de $1,1$ metros para as conexões em série entre os módulos. As informações elétricas e mecânicas da folha de dados no Anexo A são mostradas a seguir.

STC:

- $P_{mx} = 330\text{ W}$;
- $V_{op} = 37,2\text{ V}$;
- $I_{op} = 8,88\text{ A}$;
- $V_{ca} = 45,6\text{ V}$;

- $I_{cc} = 9,45 A$;
- $\eta = 18,4\%$;

NOCT:

- $P_{mx} = 243 W$;
- $V_{op} = 34,2 V$;
- $I_{op} = 7,10 A$;
- $V_{ca} = 42,5 V$;
- $I_{cc} = 7,63 A$;

Mecânicas:

- Dimensões de $2000 \times 992 \times 5,8 mm$;
- 30 peças por palete.

Em mãos o modelo do módulo FV, é preciso agora saber a quantidade de energia que é produzida por ele na localidade. Para isso serão usadas a equação 3.3 e a tabela 6.

Tabela 6 – Valores de irradiação solar média mensal [$kWh/m^2/dia$] na cidade de Santa Rita (PB), a $5,2 km$ do local. Fonte: SunData abril 2017 a março 2018.

Mês	Abril (17)	Maió (17)	Junho (17)	Julho (17)
Irradiação	5,35	4,76	4,29	4,41
Mês	Agosto (17)	Setembro (17)	Outubro (17)	Novembro (17)
Irradiação	5,2	5,63	5,92	6,19
Mês	Dezembro (17)	Janeiro (18)	Fevereiro (18)	Março (18)
Irradiação	6,1	5,82	5,98	6,03

A insolação no local será a média dos valores da tabela 6: $E_s = 5,473 kWh/m^2/dia$. O módulo possui uma área de superfície de $A_m = 1,94 m^2$. Seguindo com a equação 3.3:

$$E_m = E_s \cdot A_m \cdot \eta_m = 5473 Wh/m^2/dia \cdot 1,94 m^2 \cdot 16,97\% \Rightarrow E_p = 1801,81 Wh \quad (4.1)$$

Para calcular o número de módulos FV usa-se a equação 3.4:

$$N_p = \frac{E_{sistemaMensal}}{E_m} = \frac{15621 kWh}{1801,81 Wh} \Rightarrow N_p = 288,98 \approx 288 \quad (4.2)$$

São necessários então 288 módulos FV CS6U-330P para suprir média da demanda do investidor. No entanto esse número terá dois acréscimos: o primeiro é por causa do número de módulos disponíveis por palete, que é 30 tornando $N_p = 300$. O segundo é que 300 módulos suprem bem a demanda por energia elétrica atual, mas se espera um crescimento dessa demanda na empresa que justifica outro aumento no número de módulos. Conclui-se que esse superdimensionamento será de 14% totalizando um número de módulos FV de $N_p = 330$ módulos.

Cada painel pode produzir uma potência máxima de $P_{max} = 330 W$, e o sistema inteiro é de:

$$P_{total,STC} = P_{max,STC} \cdot N_p = 330 \cdot 330 \Rightarrow P_{total,STC} \cong 108,9 kW \quad (4.3)$$

$$P_{total,NOCT} = P_{max,NOCT} \cdot N_p = 243 \cdot 330 \Rightarrow P_{total,NOCT} \cong 80,19 kW \quad (4.4)$$

A fornecedora *ABB Company* produz Inversores de *strings* de $50 kW$ e de $60 kW$, nesse caso serão usados dois de $50 kW$, mostrado na figura 14.



Figura 14 – Inversor de String trifásico ABB de $50 kW$. Fonte: [ABB 2017].

O inversor é o: TRIO-50.0-TL-OUTD-POWER MODULE ABB, que é vendido junto com a caixa de *strings*: DCWB-SX-TRIO-50.0-TL-OUTD/12 INPUTS ABB, e o quadro AC: WB-SX-TRIO-50.0-TL-OUTD ABB. As informações da folha de dados no Anexo B são mostradas a seguir:

- Tensão CC máxima $V_{CCmax} = 1000 V$;
- Potência CC máxima $P_{CCmax} = 52000 W$;
- Corrente CC máxima $I_{CCmax} = 160 A$;
- 12 entradas CC (CC *inputs*);
- Tensão de saída CA $V_{AC} = 320 \dots 480 V$;
- Corrente de saída CA $I_{CA} = 77 A$;
- Frequência de saída $f = 47 \dots 53 Hz / 57 \dots 63 Hz$.

Em mãos, as características do inversor, pode-se então dimensionar os *strings*. Deve-se distribuir a potência pelos 12 *inputs* de cada inversor, então serão 24 *strings*. No total temos 330 módulos para serem distribuídos por 24 *strings*. Fazendo a divisão temos 13,75 módulos por *string* e é preciso um número exato, então será feito 6 *strings* de 13 módulos e os outros 18 *strings* de 14 módulos.

A tensão por *string* V_{input} é a soma das tensões STC nominais dos seus módulos, e a corrente I_{input} é igual a corrente nominal STC do módulo. A potência P_{input} é a soma da potência STC de todos os módulos que estão conectados de alguma forma ao *input*, que neste caso são os 13 ou 14 dos *strings*. Os dados por *string* serão:

- $V_{input} = 483,6 \cdots 520,8 V$;
- $I_{input} = 8,88 A$;
- $P_{input} = 4290 \cdots 4620 W$;
- Potência por inversor $P_{inversor,NOCT} = 40,095 W$;

Na caixa de *Strings* é necessário um fusível para cada *input* positivo e negativo, então, seguindo a equação 3.2, e com uma corrente de curto circuito do string em STC de $I_{CC,STC} = 9,45 A$, temos:

$$1,1 \cdot I_{CC,STC} = 1,1 \cdot 9,45 A \Rightarrow 10,39 A \leq I_F \leq I_R \quad (4.5)$$

A corrente nominal dos fusíveis deve ser maior ou igual a 10,39 A. Como ele deve ser acionado apenas em casos extremos e situações de falha, o valor da corrente nominal do fusível, para o projeto, será de $I_F = 15 A$. Segundo a norma IEC 60634, esses fusíveis devem ser específicos para aplicações fotovoltaicas, do tipo gPV.

Os cabos devem ser apropriados para o uso em sistemas FV, e dimensionados segundo a NBR 5410. As conexões entre os *strings* e os *inputs* do inversor têm uma corrente de curto circuito por string de $I_{CC,STC} = 9,45 A$. Então, segundo a tabela 31 da NBR 5410, a seção nominal desses cabos deve ser de $S = 6 mm^2$.

Os disjuntores da saída do sistema FV são calculados segundo a NBR 5410, e os disjuntores na entrada do sistema, são dimensionados segundo a NDU 002 na tabela 2 de fornecimento trifásico em média tensão com medição na baixa tensão.

Analisando a área do local da figura 15 é verificado que só o prédio principal não é suficiente para todos os módulos, sendo preciso uma área adicional de $329 m^2$. Uma boa opção seria completar a área total com a construção de garagens com tetos próprios para uso em usinas solares, chamadas *solar carports*.



Figura 15 – Vista superior frontal da unidade do Investidor Pandel Ltda.

São então duas unidades idênticas, cada uma com 40 kW (NOCT). A demanda contratada na distribuidora pela fábrica é de 55 kW , mas o sistema fotovoltaico tem uma potência próxima de 80 kW então é preciso aumentar o valor da demanda contratada do investidor para pelo menos duas vezes o valor inicial, que pode ficar em 100 kW . Os 330 módulos totalizam uma área necessária de 640 m^2 . Na figura 16 é mostrado geração com relação ao consumo mensal. Na figura 17 e no Apêndice A são mostrados o diagrama unifilar na entrada do sistema com as duas unidades 1 e 2, e o diagrama elétrico do conjunto de módulos da unidade 1, respectivamente.

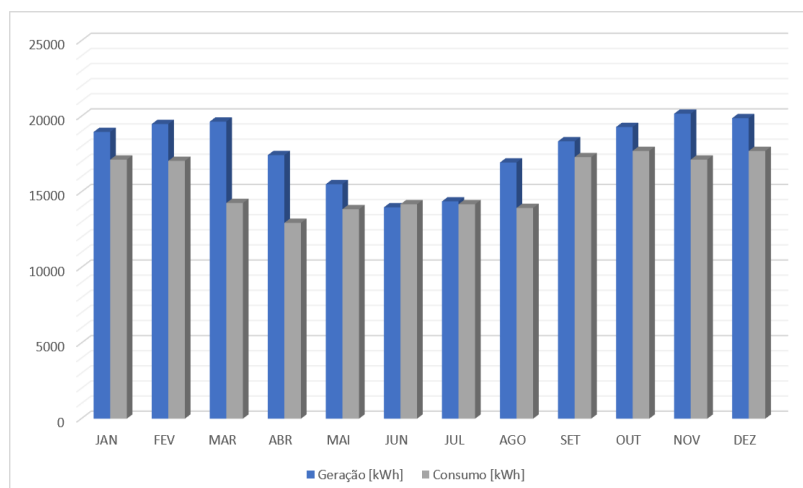


Figura 16 – Estimativa Mensal de Geração X Consumo.

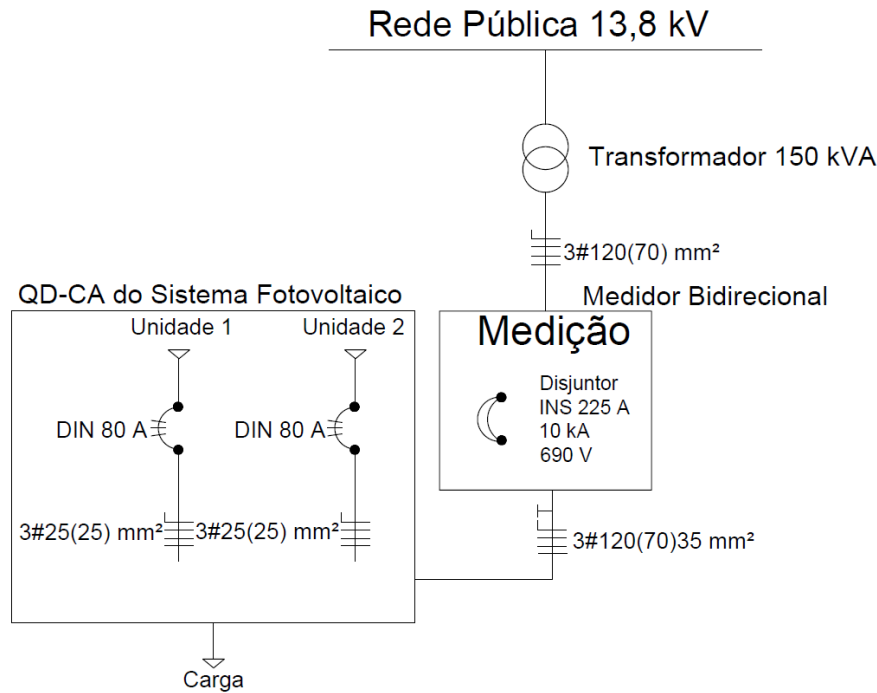


Figura 17 – Diagrama unifilar da entrada do sistema.

4.2 Viabilidade Econômica

Pelo tamanho do projeto, se faz necessário a utilização de técnicas de análise financeira, para definir se dará lucro ou prejuízo durante a vida útil, e a partir dessa informação, saber se é viável.

Na seção 3.2 são descritas as análises de VPL, TIR e *payback time*, que serão utilizados neste projeto. Para isso foram levantados os valores dos componentes principais do projeto, conforme a tabela 7.

Tabela 7 – Orçamento do Sistema FV.

Item	Quantidade	Valor Unid.	Valor Total
Módulo	330	R\$ 652,00	R\$ 215.160,00
Inversor	2	R\$ 24.875,00	R\$ 49.750,00
<i>StringBox</i>	2	R\$ 6.918,00	R\$ 13.836,00
Estrutura Fixação	-	-	R\$ 22.949,00
Cabos	1800 m	R\$ 3,80	R\$ 6.840,00
Serviços/Materiais	-	-	R\$ 70.124,00
Total	-	-	R\$ 378.659,00

A linha da tabela 7 referente a "Serviços/Materiais" corresponde ao valor cobrado pelo projetista de R\$ 20,00 por m^2 , frete simulado em torno de R\$ 50.000,00 e outros serviços como instalação e aterramento.

Como visto na tabela 7, o valor total do investimento é de R\$ 378.659,00. Neste valor não está incluído os custos da construção das garagens mencionadas na seção anterior.

A modalidade tarifária da empresa Pandel, de acordo com a Energisa, é a do Grupo A, cuja tarifa no posto tarifário Fora-Ponta é de R\$0,34907/kWh, e no Ponta é de R\$2,33102/kWh ambos com tributos incluídos. Segundo a resolução número 687 da ANEEL, o eventual crédito de energia acumulado deve ser deduzido no posto tarifário aonde foi gerado, ou seja, a grande maioria da geração só será descontada no horário Fora-Ponta pois esse acaba de 17:30 (de acordo com a distribuidora Energisa Paraíba), e a partir desse horário a insolação começa a diminuir. Portanto, para os cálculos da viabilidade econômica será considerado geração apenas em horário Fora-Ponta.

Nessa categoria temos a demanda contratada com valor de R\$24,98563/kW. Como dito antes, a demanda contratada deve aumentar de 55 kW para 100 kW, totalizando um valor mínimo que deve ser cobrado cada mês de R\$2.498,56.

Para a análise financeira foi considerado um reajuste da tarifa de 6,5% ao ano nos próximos 25 anos subsequentes. Esta é feita em 25 anos porque é o tempo de vida útil dos módulos. O *payback time* esperado deve ser de no máximo 10 anos porque é o tempo da garantia do fabricante dos inversores ABB, visto no documento de Condições de Garantia da fornecedora ABB no Anexo C.

Utilizou-se das ferramentas do software *Office Excel* e o fluxo de caixa deste projeto no Apêndice B, e calculou-se os valores de VPL, TIR e *payback time*:

- O projeto terá um VPL positivo de $VPL = R\$ 350.637,49$;
- Um TIR de 17%;
- Um *payback time* de 7 anos e 5 meses, mostrado na figura 18.

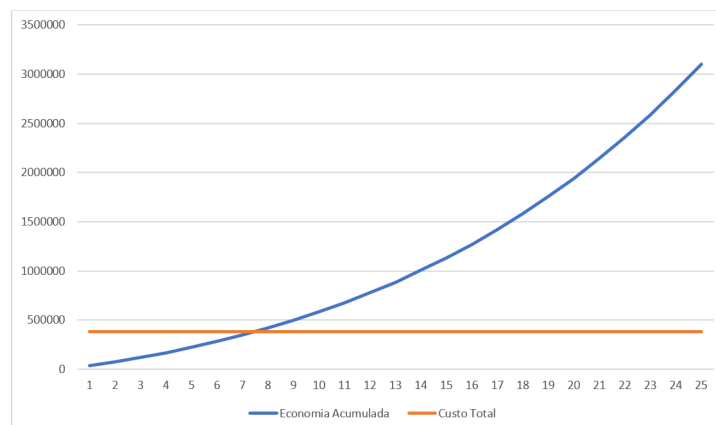


Figura 18 – Gráfico Comparativo do Custo X Retorno Financeiro.

Com resultados positivos para as três análises financeiras: VPL, TIR e o *payback time*, o projeto se paga no seu tempo de vida útil e se torna viável.

4.3 Financiamento

Mesmo o projeto passando no teste da viabilidade econômica, ele continuaria sendo um grande investimento com um tempo de *payback* extenso. Então se faz necessário a ajuda de investidores externos que são os bancos e governo. Para isso existem linhas de financiamento específicas para energias renováveis com vantagens diferentes. Exemplos de investidores são o Banco do Nordeste Sol, ou a Bradesco Leasing ambiental.

As empresas fornecedoras de equipamentos relacionados à energia solar procuram facilitar o contato do consumidor com essas linhas de financiamento, por exemplo a WEG que possui sua própria cartilha com dados de vários bancos [WEG Automação 2014]. Na tabela 8 são mostradas algumas linhas de financiamento conhecidas do Brasil.

Tabela 8 – Linhas de Financiamento para Energia Solar conhecidas. Fonte: próprio autor.

Banco	Cobertura	Taxa de Juros	Prazo	Carência	Valor Máximo
BNDS Finem	Até 80% do investimento	Até 0,9% a.a.	24 anos	6 meses	-
BNB Sol	Até 100% do investimento	Depende do valor total	12 anos	De 6 a 12 meses	-
Bradesco Leasing Ambiental	Até 70% do investimento	2,9% a.m.	De 30 a 60 meses	-	-
Desen- volve SP	Até 80% do investimento	A partir de 0,17%.	10 anos	2 anos	-

5 Conclusão

O desenvolvimento do presente trabalho, com um resultado viável, possibilitou uma análise de como um sistema fotovoltaico pode tanto reduzir a necessidade da energia da rede pública, como também obter lucro a partir dele. Além disso, também permitiu o estudo do funcionamento dos componentes desses sistemas, desde a energia solar e os módulos até a energia elétrica sendo descontada por créditos pela distribuidora.

Atualmente no Brasil a energia solar FV é utilizada em micro e minigeradoras, principalmente sistemas isolados ou autônomos, o que compreende uma participação no sistema brasileiro desprezível, apesar de suas vantagens. Há barreiras técnicas e regulatórias que precisam ser rompidas para aumentar essa cultura de geração de eletricidade com sistemas fotovoltaicos. Esses sistemas, quando ligados a rede pública, produzem eletricidade a custos competitivos e se torna ainda mais vantajoso quando se considera a inflação do preço da energia elétrica. Eles podem ter até 25 anos de vida útil, e durante esse tempo uma empresa ou residência com módulos em seus telhados garante energia e fica imune ao aumento de preços.

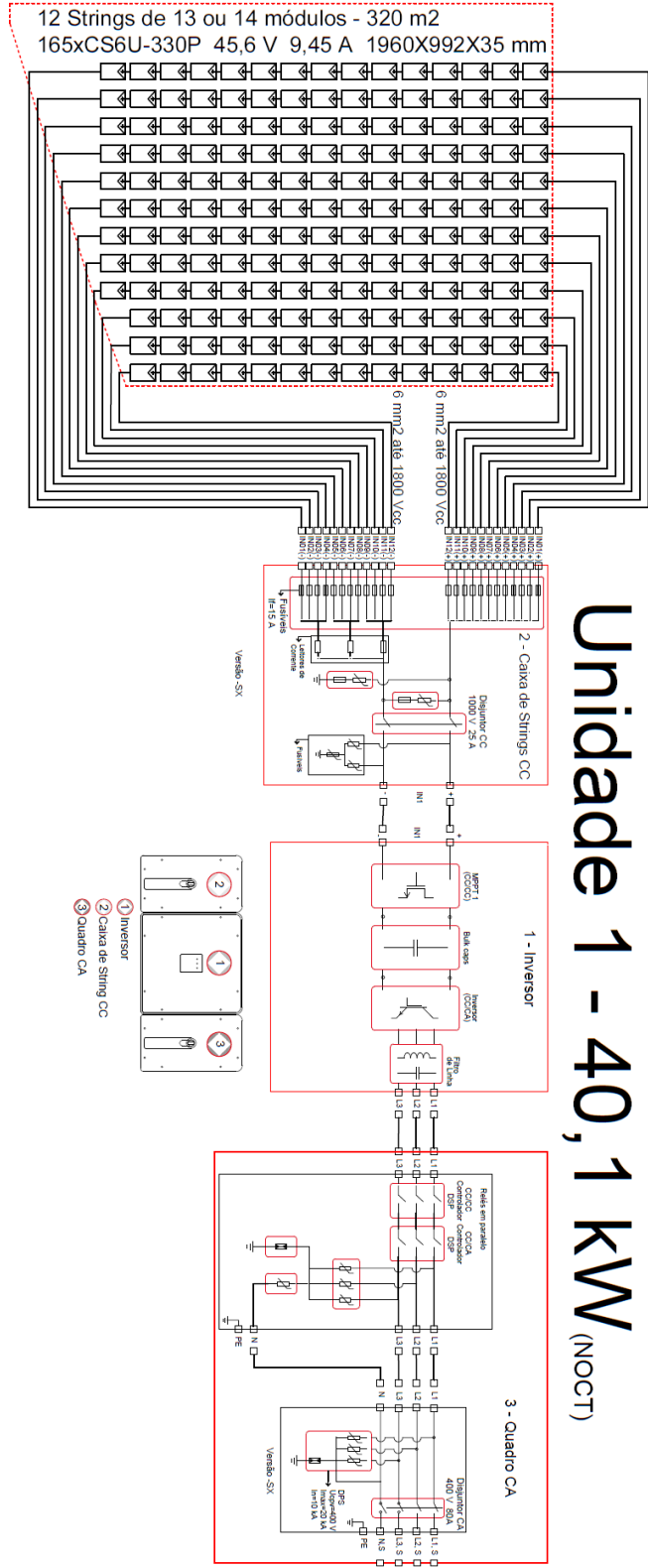
Na empresa, usada como exemplo para dimensionamento de sistema fotovoltaico, podemos notar essas vantagens, como a demanda média de 15000 kWh pode ser gerada no próprio local. Para aproveitar ainda mais o sistema fotovoltaico, há geração excedente transformada em créditos de energia que podem ser compensados em outras unidades consumidoras, o que pode mudar todo o fluxo de caixa. Então como atividades futuras pode-se analisar o consumo dessas outras unidades, e a possibilidade de transferência de créditos para a mesma.

Referências

- ABB. *Data Sheet string inverters*. [S.l.], 2017. Citado 4 vezes nas páginas 9, 28, 29 e 36.
- ABB COMPANY. *Technical Application Papers No.10 Photovoltaic plants*. [S.l.], 2014. Citado 4 vezes nas páginas 9, 16, 27 e 28.
- ABNT. *Instalações elétricas de baixa tensão*. [S.l.], 2004. Citado na página 29.
- ANEEL. *Resolução Normativa No 482*. [S.l.], 2012. Citado na página 26.
- ANEEL, A. N. de E. E. Expansão da oferta de energia elétrica. *Superintendência de Fiscalização dos Serviços de Geração*, 2018. Citado na página 14.
- BANCO DO NORDESTE. *Cartilha Financiamento à Micro e à Minigeração Distribuída de Energia Elétrica*. [S.l.], 2016. Citado na página 14.
- BOSCH SOLAR ENERGY CORP. *Installation and Safety Manual*. [S.l.], 2011. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 18.
- CARNEIRO, J. *Módulos Fotovoltaicos Características e Associações*. Dissertação (Mestrado) — University of Minho, 2010. Citado 4 vezes nas páginas 9, 22, 23 e 24.
- MEDEIROS, A. C. d. R. *Relatório de Estágio Supervisionado*. 2017. UFCG. Citado na página 30.
- PINHO JOÃO T.; GALDINO, M. A. *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*. [S.l.], 2014. Citado 6 vezes nas páginas 9, 10, 19, 20, 25 e 27.
- SAMANEZ, C. P. *Engenharia Econômica*. [S.l.]: São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 33.
- VILLALVA M. G.; GAZOLI, J. R. *Energia Solar Fotovoltaica Conceitos e Aplicações*. [S.l.]: Editora Ética Ltda., 2013. Citado 14 vezes nas páginas 14, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 24, 25, 26, 28, 29, 30 e 31.
- WEG AUTOMAÇÃO. *Linhas de Financiamento para Energia Solar*. [S.l.], 2014. Citado na página 41.

Apêndices

APÊNDICE A – Diagrama Elétrico



APÊNDICE B – Fluxo de Caixa e Análises Financeiras

Ano	Tarifa [R\$/kWh]	Economia Mensal	Economia Anual	Saldo
-	-	-	-378,659.00	-378,659.00
2019	0.35	2,954.26	35,451.11	-343,207.89
2020	0.37	3,308.69	39,704.32	-303,503.57
2021	0.40	3,686.16	44,233.97	-259,269.60
2022	0.42	4,088.17	49,058.06	-210,211.53
2023	0.45	4,516.31	54,195.72	-156,015.82
2024	0.48	4,972.28	59,667.32	-96,348.50
2025	0.51	5,457.88	65,494.57	-30,853.93
2026	0.54	5,975.05	71,700.60	40,846.67
2027	0.58	6,525.83	78,310.02	119,156.68
2028	0.62	7,112.42	85,349.05	204,505.73
2029	0.66	7,737.13	92,845.61	297,351.34
2030	0.70	8,402.45	100,829.46	398,180.79
2031	0.74	9,111.02	109,332.25	507,513.04
2032	0.79	9,865.64	118,387.73	625,900.77
2033	0.84	10,669.32	128,031.81	753,932.58
2034	0.90	11,525.23	138,302.75	892,235.33
2035	0.96	12,436.78	149,241.31	1,041,476.64
2036	1.02	13,407.57	160,890.88	1,202,367.52
2037	1.08	14,441.47	173,297.66	1,375,665.18
2038	1.15	15,542.57	186,510.89	1,562,176.07
2039	1.23	16,715.25	200,582.98	1,762,759.04
2040	1.31	17,964.15	215,569.75	1,978,328.79
2041	1.40	19,294.22	231,530.66	2,209,859.45
2042	1.49	20,710.75	248,529.03	2,458,388.48
2043	1.58	22,219.36	266,632.30	2,725,020.78

VPL	TIR	<i>Payback Time</i>
R\$350,637.49	17%	7 anos e 5 meses

Anexos

ANEXO A – Folha de Dados do Módulo Solar CS6U-330P.

ELECTRICAL DATA | STC*

CS6U	325P	330P	335P
Nominal Max. Power (Pmax)	325 W	330 W	335 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	37.0 V	37.2 V	37.4 V
Opt. Operating Current (Imp)	8.78 A	8.88 A	8.96 A
Open Circuit Voltage (Voc)	45.5 V	45.6 V	45.8 V
Short Circuit Current (Isc)	9.34 A	9.45 A	9.54 A
Module Efficiency	16.72%	16.97%	17.23%
Operating Temperature	-40°C ~ +85°C		
Max. System Voltage	1000 V (IEC/UL) or 1500 V (IEC/UL)		
Module Fire Performance	TYPE 1 (UL 1703) or CLASS C (IEC 61730)		
Max. Series Fuse Rating	15 A		
Application Classification	Class A		
Power Tolerance	0 ~ + 5 W		

* Under Standard Test Conditions (STC) of irradiance of 1000 W/m², spectrum AM 1.5 and cell temperature of 25°C.

ELECTRICAL DATA | NMOT*

CS6U	325P	330P	335P
Nominal Max. Power (Pmax)	239 W	243 W	247 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	34.0 V	34.2 V	34.4 V
Opt. Operating Current (Imp)	7.03 A	7.10 A	7.17 A
Open Circuit Voltage (Voc)	42.4 V	42.5 V	42.6 V
Short Circuit Current (Isc)	7.54 A	7.63 A	7.70 A

* Under Nominal Module Operating Temperature (NMOT), irradiance of 800 W/m², spectrum AM 1.5, ambient temperature 20°C, wind speed 1 m/s.

MECHANICAL DATA

Specification	Data
Cell Type	Poly-crystalline, 6 inch
Cell Arrangement	72 (6 × 12)
Dimensions	1960 × 992 × 35 mm (77.2 × 39.1 × 1.38 in)
Weight	22.4 kg (49.4 lbs)
Front Cover	3.2 mm tempered glass
Frame Material	Anodized aluminium alloy
J-Box	IP68, 3 bypass diodes
Cable	4.0 mm ² (IEC), 12 AWG (UL), 1160 mm (45.7 in)
Connector	T4 series
Per Pallet	30 pieces
Per Container (40' HQ)	720 pieces

TEMPERATURE CHARACTERISTICS

Specification	Data
Temperature Coefficient (Pmax)	-0.40 % / °C
Temperature Coefficient (Voc)	-0.31 % / °C
Temperature Coefficient (Isc)	0.05 % / °C
Nominal Module Operating Temperature (NMOT)	43 ± 3 °C

ANEXO B – Folha de Dados do Inversor de Frequência ABB.

Technical data and types

Type code	TRIO-50.0-TL-OUTD	TRIO-60.0-TL-OUTD-480
Input side		
Absolute maximum DC input voltage ($V_{max,abs}$)	1000 V	
Start-up DC input voltage (V_{start})	420...700 V (Default 420 V)	420...700 V (Default 500 V)
Operating DC input voltage range ($V_{dmin}...V_{dmax}$)	0,7 V_{start} ...950 V (min 300 V)	0,7 V_{start} ...950 V (min 360 V)
Rated DC input voltage (V_{dc})	610 Vdc	720 Vdc
Rated DC input power (P_{dc})	52000 W	61800 W
Number of independent MPPT	1	
MPPT input DC voltage range ($V_{MPPTmin}...V_{MPPTmax}$) at P_{acr}	480-800 Vdc	570-800 Vdc
Maximum DC input current (I_{dcmax})	108 A	
Maximum input short circuit current	160 A	
Number of DC input pairs	12 (-SX/-SY), 16 (-SX)	16 (-SX)
Output side		
AC grid connection type	Three-phase (3W+PE or 4W+PE)	
Rated AC power (P_{acr} @ $\cos\phi=1$)	50000 W	60000 W
Maximum AC output power (P_{acmax} @ $\cos\phi=1$)	50000 W	60000 W
Maximum apparent power (S_{max})	50000 VA	60000 VA
Rated AC grid voltage ($V_{ac,r}$)	400 V	480 V
AC voltage range	320...480 V ¹⁾	384...571 V ¹⁾
Maximum AC output current ($I_{ac,max}$)	77 A	

ANEXO C – Condições de Garantia para Inversores de String ABB.

STANDARD, ASSURE and Accessories

Table 1: details of the Service terms and conditions

Definition	Inverter		Accessories
	STANDARD Warranty	ASSURE Warranty	ACCESSORIES Warranty
Default duration (years)	5	5	2 when sold separately 5 when integrated in Inverter
Extended duration (total years) Must be purchased when the inverter is purchased	10	10	No extension
Repair material and labor costs in repair center	Included	Included	Included
Removal and reinstall costs (See conditions in description)	Not included	Included	Not included
Parameter setup of replacement product	Not included	Included	Not included
Material freight costs returning defective unit (to location defined by ABB)	Not included	Included	Not included
Material freight costs of repaired (or replacement) unit to customer	Not included	Included	Not included
Advanced replacement unit (where technically possible, the alternative is on-site repair)	Not included	Included	Not included
Technical hotline	A list of countries offering hotline is available on ABB Web site	Included	Ask your local ABB Representative for covered countries
Effective availability (percentage)	Not included	Not included	Not applicable
Preventive maintenance	Not included	Not included	Not included
Ready to ship indication After acceptance of claim, subject to material availability	Usually 10 working days After reception of inverter at the ABB repair center	Usually 5 working days	Usually 15 working days After reception at the ABB repair center
Where available	Worldwide	See list in page 1	Worldwide