



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO**

RANIERI GIUDICI

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA
FOTOVOLTAICO PARA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**

VITÓRIA – ES
Agosto, 2016

RANIERI GIUDICI

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Ranieri Giudici**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em 30 de agosto de 2016.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Lucas Frizera Encarnação
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES
Orientador

Prof.^a Dr.^a Jussara Farias Fardin
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES
Comissão Avaliadora

Eng.^o Luiz Celso Calvi
Ápice Projetos de Gestão em SMS
Comissão Avaliadora

VITÓRIA – ES
Agosto, 2016

AGRADECIMENTOS

A meus pais, Gianercole e Graciema, que com paciência e amor, souberam me confortar e estimular a seguir em frente, sendo minha base, meu pilar principal.

A meus familiares e amigos, pelo apoio e acolhimento dado.

A meus professores e colegas, que pelo conhecimento compartilhado foram fundamentais à formação do profissional que me tornei.

E por fim, a Deus, que se faz presente e que pela fé me guia a seguir o caminho certo.

RESUMO

Este projeto consiste na elaboração de uma simulação, na plataforma de software Simulink, que faz parte da suíte Matlab, mostrando o funcionamento, em sua plenitude, de uma planta fotovoltaica conectada à rede elétrica de baixa tensão. O projeto tem potência de 74kWp e tem como objetivo fornecer energia para 15 apartamentos.

Todo o estudo, modelagem e implementação deste modelo foi embasado em conceitos teóricos encontrados nas literaturas de eletrônica de potência, em teorias e artigos sobre modelagem de células fotovoltaicas, no estudo dos Procedimentos de Distribuição de Energia do Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), bem como na análise da legislação vigente relativa à Geração Distribuída.

A partir dos resultados obtidos, foi abordada uma análise econômica e financeira visando a real viabilidade do projeto no estado do Espírito Santo, bem como uma verificação das limitações e oportunidades que a legislação vigente da ANEEL proporciona aos investidores que acreditam no potencial desta tecnologia.

Palavras-chave: Geração Distribuída, Matlab, Planta Fotovoltaica, ANEEL, Simulação.

ABSTRACT

This project consists in the development of a simulation, under the Simulink software platform, which is part of the Matlab suite, showing the operation, in its entirety, of a photovoltaic plant connected to the low voltage grid. The project has a power of 74kWp and aims to provide energy for 15 apartments.

The entire study, modeling and implementation of this model was based on theoretical concepts found in power electronics literatures, theories and modeling articles about photovoltaic cells, on the study of Power Distribution Procedures of the National Electric System (PRODIST) and the analysis of the current legislation of Distributed Generation.

From the results obtained, an economic and financial analysis aimed at the real feasibility of the project in the state of Espírito Santo, as well as a check of the constraints and opportunities that ANEEL's legislation provides to investors who believe in the potential of this technology.

Palavras-chave: Distributed Generation, Matlab, Photovoltaic Plant, ANEEL, Simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Histórico do consumo mundial de energia primária.....	14
Figura 2 - Matriz elétrica mundial	14
Figura 3 – Composição da Tarifa de Energia Elétrica	21
Figura 4 - Detalhes de um medidor analógico	26
Figura 5 - Medidor digital	27
Figura 6 – Sistema de Compensação de Energia	29
Figura 7 – Procedimentos para acesso e conexão da geração distribuída	31
Figura 8 - Esquema de uma planta FV conectada à rede elétrica	32
Figura 9 - Funcionamento de uma célula fotovoltaica	33
Figura 10 - Aproveitamento do comprimento de onda.....	34
Figura 11 - materiais utilizados e suas eficiências.....	35
Figura 12 - Circuito equivalente da célula fotovoltaica: (a) Modelo Ideal, (b) Modelo de um diodo, (c) Modelo de dois diodos.....	36
Figura 13 - Circuito equivalente do modelo de um diodo.....	37
Figura 14 - Exemplo de curva I-V de um painel fotovoltaico.....	41
Figura 15 - Tipos de conversor CC-CC: (a) Conversor Boost; (b) Conversor Buck; (c) Conversor Buck-Boost.....	42
Figura 16 - Circuito do conversor Buck.....	43
Figura 17 - Formas de onda típicas	43
Figura 18 - Tensão sobre a indutância em regime	44
Figura 19 - Inversor monofásico de meia ponte	46
Figura 20 - Formas de onda com carga resistiva	47
Figura 21 - Formas de onda SPWM trifásico e espectro harmônico.....	48
Figura 22 - Controle de corrente fixed-frequency	48
Figura 23 - Fluxograma do algoritmo P&O	49
Figura 24 - Bloco de função do gerador fotovoltaico	51
Figura 25 - Curvas I-V e P-V do painel (condições STC)	52
Figura 26 - Curvas I-V e P-V do painel (1000W/m ² e temperatura variável).....	52
Figura 27 - Curvas I-V e P-V com 25°C e radiação variável	53
Figura 28 - Curvas I-V e P-V com Rsh variável	54
Figura 29 - Curvas I-V e P-V com Rs variável	54

Figura 30 - Curvas I-V e P-V do arranjo fotovoltaico	55
Figura 31 - Sistema com gerador, Buck e carga fixa	56
Figura 32 - Circuito do conversor Buck.....	57
Figura 33 - Controlador do conversor Buck	58
Figura 34 - Simulação do conversor Buck	59
Figura 35 - Sistema com o inversor, a rede elétrica e a carga	60
Figura 36 - Circuito do inversor de meia ponte	61
Figura 37 - Circuito para cálculo da corrente de referência	62
Figura 38 - Controlador PI com feedforward.....	62
Figura 39 - Circuito de disparo do inversor.....	63
Figura 40 - Bloco MPPT	64
Figura 41 - Teste do projeto com <i>step</i> de 2kW	65
Figura 42 - Teste do projeto com <i>step</i> 0,5kW	66
Figura 43 - Fluxo de caixa simples e acumulado.....	71
Figura 44 - Datasheet do módulo CS6P-255P	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Consumo mundial de energia primária	13
Tabela 2 – Empreendimentos em Operação no Brasil em 01/08/2016	15
Tabela 3 – Empreendimentos em Construção no Brasil em 01/08/2016.....	16
Tabela 4 – Tarifas EDP Escelsa BT agosto 2015.....	22
Tabela 5 – Tarifas EDP Escelsa AT Verde agosto 2015	24
Tabela 6 – Tarifas EDP Escelsa AT Azul agosto 2015.....	25
Tabela 7 – Características elétricas do módulo CS6P-255P	50
Tabela 8 - Custo da energia consumida - EDP	67
Tabela 9 - Dados de produção mensal de energia elétrica fotovoltaica - ES	68
Tabela 10 - Dados de janeiro	79
Tabela 11 - Dados de fevereiro	80
Tabela 12 - Dados de março	81
Tabela 13 - Dados de abril	82
Tabela 14 - Dados de maio	83
Tabela 15 - Dados de junho	84
Tabela 16 - Dados de julho.....	85
Tabela 17 - Dados de agosto	86
Tabela 18 - Dados de setembro	87
Tabela 19 - Dados de outubro	88
Tabela 20 - Dados de novembro	89
Tabela 21 - Dados de dezembro	90

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACL	Ambiente de Contratação Livre
ACR	Ambiente de Contratação Regulada
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CGH	Central de Geração Hidrelétrica
CONFAZ	Conselho Nacional de Política Fazendária
EDP	Energias de Portugal S.A.
IFES	Instituto Federal do Espírito Santo
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia do Sistema Elétrico Nacional
REH	Resolução Homologatória
REN	Resolução Normativa
TE	Tarifa de Energia
TUSD	Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
UFV	Usina Fotovoltaica
UHE	Usina Hidrelétrica
UTE	Usina Termelétrica
UTN	Usina Termonuclear

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Ampere (Unidade de medida de corrente)
eV	Elétron Volt (Unidade de medida de energia)
Hz	Hertz (Unidade de medida de frequência)
I	Corrente
P	Potência Ativa
Q	Potência Reativa
S	Potência Aparente
U	Tensão
V	Volt (Unidade de medida de tensão)
VA	Volt-Ampere (Unidade de medida de potência aparente)
Var	Volt-Ampere Reativo
W	Watt (Unidade de medida de potência ativa)
Wh	Watt-Hora (Unidade de medida de energia consumida)
Wp	Watt de pico (unidade de medida de potência ativa)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Apresentação	13
1.2	Justificativa	16
1.3	Objetivo	17
1.3.1	Objetivos Específicos	18
1.4	Análise de Literatura Especializada	18
2	VISÃO GERAL	20
2.1	As Tarifas do ACR	20
2.1.1	Baixa Tensão	22
2.1.2	Alta Tensão	22
2.1.2.1	Modalidade Tarifária Verde	23
2.1.2.2	Modalidade Tarifária Azul	24
2.2	Smart Grid	25
2.3	Geração Distribuída	27
2.3.1	REN 687 – 2015	28
2.3.2	Procedimentos para Viabilização de Acesso	30
3	TEORIAS APLICADAS	32
3.1	O Painel Fotovoltaico	32
3.1.1	Silício Monocristalino	35
3.1.2	Silício Multicristalino	35
3.1.3	Silício Amorfo	36
3.1.4	Modelagem da célula fotovoltaica	36
3.1.4.1	Modelo de um diodo	37
3.1.4.2	Arranjo fotovoltaico	40
3.2	Conversor CC-CC	41
3.2.1	Conversor Buck	42
3.2.1.1	Modo de Condução Contínua	43
3.2.1.2	Dimensionamento do conversor	44
3.3	Conversor CC-CA trifásico	46
3.4	MPPT	49
4	SIMULAÇÃO	50
4.1	O Projeto	50

4.2	O Gerador fotovoltaico.....	50
4.3	O Conversor Buck.....	55
4.4	O Inversor	60
5	ANÁLISE ECONÔMICO-FINANCEIRA.....	67
6	CONCLUSÕES.....	72
7	BIBLIOGRAFIA	73
8	ANEXOS.....	76
8.1	Datasheet do módulo CS6P-255P	76
8.2	Código Matlab do Arranjo Fotovoltaico	77
8.3	Código Matlab do MPPT.....	78
8.4	Dados de Insolação, Temperatura e Energia	79

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

A população do planeta, durante o ano passado, ultrapassou a marca de 7 bilhões e 300 milhões de habitantes. Está em rápido e constante crescimento, tanto que as estimativas mais recentes apontam que a mesma atingirá o incrível número de 10 bilhões no ano de 2050 (1). Conseqüentemente, para garantir um padrão de vida que atenda a mínima e necessária qualidade de vida, deverá haver um aumento constante e gradual da produção de energia.

A Tabela 1, a seguir, mostra a proporção da utilização de fontes primárias de energia no mundo referente ao ano de 2014 (2).

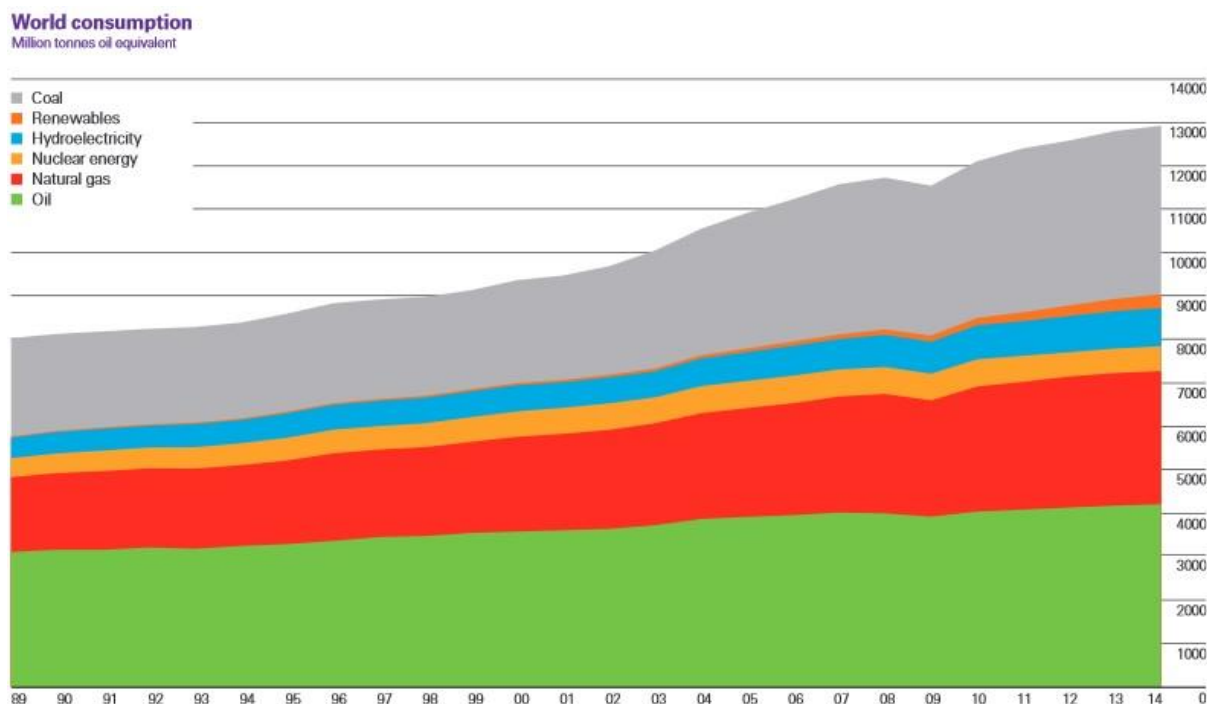
Tabela 1 – Consumo mundial de energia primária

Fonte Primária	Quantidade (milhões de toneladas de equivalente de petróleo)	Quantidade (%)
Petróleo	4211,1	32,57
Gás Natural	3065,5	23,71
Carvão Mineral	3881,8	30,03
Nuclear	574,0	4,44
Hidrelétrica	879,0	6,80
Renováveis	316,9	2,45
Total	12928,4	100

Fonte: Produção do próprio autor. Baseado em (2).

Percebe-se que 86,31% da energia primária produzida no mundo ainda é obtida graças à utilização e queima de combustíveis fósseis, que inevitavelmente serão esgotados em caso de exploração intensiva e crescente. E, conforme mostra a Figura 1, é exatamente este o caminho que está sendo seguido. Nos últimos 25 anos, a participação dos combustíveis fósseis aumentou consideravelmente.

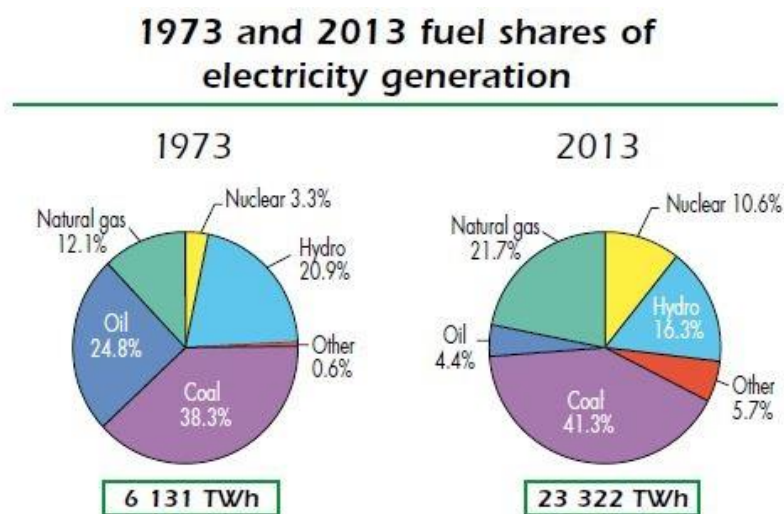
Figura 1 - Histórico do consumo mundial de energia primária



Fonte: BP's Statistical Review of World Energy June 2015 (2).

A matriz elétrica mundial segue o mesmo padrão em sua estrutura, sendo composta por fontes de origem majoritariamente não renovável, com grande participação dos combustíveis fósseis (3), perto de 68% em 2013, fato que acabou preocupando os governos de grande parte do mundo devido à crescente produção de dióxido de carbono (CO₂) lançado no meio ambiente. A situação está descrita na Figura 2.

Figura 2 - Matriz elétrica mundial



Fonte: International Energy Agency (3).

No Brasil, a matriz elétrica é, em sua maioria, orientada na direção das fontes renováveis, graças à conformação de seu território (4). A exploração de grandes usinas hidrelétricas é um fator determinante para que se possa afirmar que a produção de energia elétrica brasileira é mais limpa que a média mundial, conforme mostra a Tabela 2. Entretanto, a recente crise hídrica que atingiu o país obrigou o despacho de grande parte das usinas termelétricas de reserva, fato que repercutiu até na estrutura tarifária, que sofreu profundas mudanças (5). Isto de certa forma mostrou a fragilidade por trás da limpeza da matriz, fazendo com que um cenário de aparente conforto se transformasse em um alerta. Vale a pena lembrar que em 2008, o percentual de energia proveniente de grandes usinas hidrelétricas era de 71,20% (6), contra os atuais 60,94%, enquanto a utilização de termelétricas aumentou de 24,22% para 27,72%, com um preocupante pico de 46.614MW de potência outorgada em janeiro de 2014, no auge da crise hídrica (7).

Tabela 2 – Empreendimentos em Operação no Brasil em 01/08/2016

Empreendimentos em Operação no Brasil				
Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (kW)	Potência Fiscalizada (kW)	(%)
CGH	556	433.672	435.753	0,3
EOL	379	9.315.408	9.264.730	6,35
PCH	449	4.856.182	4.835.543	3,31
UFV	40	26.962	22.962	0,02
UHE	220	101.063.425	88.962.703	60,94
UTE	2.910	42.302.138	40.464.376	27,72
UTN	2	1.990.000	1.990.000	1,36
Total	4.556	159.987.787	145.976.067	100

Fonte: Produção do próprio autor. Baseado em (4).

Neste cenário, tornam-se atrativas as fontes de energia renovável, dentre as quais está presente a energia solar, que será aqui analisada, a qual através do efeito fotovoltaico converte diretamente a luz do Sol em eletricidade. Dentre as vantagens desta tecnologia, pode-se destacar o fato de utilizar uma fonte de energia abundante, virtualmente inesgotável e limpa, pois durante a operação não há emissão de poluentes. Além de todos estes pontos de força, funciona de forma silenciosa e é altamente modular, podendo ser aplicada em diferentes escalas. Na

Tabela 3 podemos notar um grande interesse na construção de novas usinas eólicas, assim como um tímido, mas importante, sinal de começo para a tecnologia fotovoltaica, para a qual este trabalho busca uma justificativa econômica.

Tabela 3 – Empreendimentos em Construção no Brasil em 01/08/2016

Empreendimentos em Construção no Brasil			
Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (kW)	(%)
CGH	1	848	0,01
EOL	148	3.385.330	37,86
PCH	34	454.959	5,09
UFV	3	90.000	1,01
UHE	7	1.967.100	22,00
UTE	25	1.694.486	18,95
UTN	1	1.350.000	15,1
Total	219	8.942.723	100

Fonte: Produção do próprio autor. Baseado em (4).

1.2 Justificativa

A atual situação do sistema elétrico brasileiro demanda algumas importantes reflexões. A crescente utilização de usinas termelétricas, além dos já citados problemas ambientais relacionados à emissão de CO₂, tem afetado de forma direta a vida de muitos cidadãos, devido à sua inevitável proximidade com os centros urbanos, proximidade esta, que se deve à necessidade de redução dos custos de transmissão, e que pode causar problemas respiratórios com vários níveis de gravidade devido à emissão de particulado, como no caso do município de Candiota, RS (8).

Outro ponto a ser analisado é o grande aumento no valor da tarifa que esta tendência está causando. A produção de energia nas termelétricas é extremamente cara, devido à necessidade constante de combustível para a queima, e acaba por afetar de forma negativa o preço do mix de energia do sistema. A tarifa residencial B1 da EDP Escelsa, por exemplo, saltou de R\$288,68/MWh em 2013 (9) para

R\$464,52/MWh em 2015 (10), valores estes que não incluem os impostos federais e estaduais. Vale lembrar que neste aumento não está contemplada a bandeira tarifária, incluída em 2015, que pode chegar a R\$45,00/MWh no cenário mais negativo de produção. Fica clara a necessidade de buscar alternativas para reduzir o custo da energia elétrica consumida, tanto no contexto residencial, quanto comercial e industrial abaixo de 500kW. Ou seja, toda a faixa de consumidores que não são beneficiados pela possibilidade de migrar para o Ambiente de Contratação Livre (ACL), que hoje possui condições mais favoráveis para a aquisição de energia.

Neste contexto, a geração distribuída promete entregar uma alternativa à distribuidora, e a tecnologia fotovoltaica se encaixa perfeitamente neste conceito. A modularidade, a facilidade de instalação e o baixo custo de manutenção a tornam muito atraente, além do fator climático extremamente favorável. A irradiação média anual brasileira varia entre 1.200 e 2.400kWh/m²/ano, valores que são muito melhores que os da Alemanha, por exemplo, onde se tem algo em torno de 900 a 1250kWh/m²/ano. E os alemães são os maiores utilizadores da tecnologia, mesmo com uma irradiação muito inferior à brasileira (11).

Seguindo esta linha de raciocínio, fica claro que este é um caminho a ser seguido e estudado, de modo a trazer benefícios aos usuários da rede e à população como um todo, criando um círculo virtuoso que além dos benefícios anteriormente citados, possa criar novos negócios e gerar novos empregos.

1.3 Objetivo

O objetivo principal deste projeto é simular um gerador fotovoltaico de 74kWp, utilizando a plataforma de software Simulink, incluída na suíte Matlab, descrevendo o sistema em sua plenitude, partindo dos modelos matemáticos e chegando até o funcionamento do mesmo. O gerador será dividido em 15 cotas, referentes a 15 apartamentos, e ligado à rede elétrica de baixa tensão. Posteriormente será feita uma análise econômico-financeira para aferir a real viabilidade do projeto. Uma análise completa da legislação vigente no estado do Espírito Santo dará sustentação e credibilidade ao projeto, de modo que o mesmo possa ser replicado sem dificuldades em uma situação real.

1.3.1 Objetivos Específicos

1. Definir de forma clara e precisa a teoria envolvida em todo o processo de criação do sistema fotovoltaico, mostrando todos os passos necessários desde o desenvolvimento até o funcionamento do mesmo no ambiente Simulink. As informações mostradas poderão ser utilizadas para auxiliar em um projeto similar;
2. Testar a qualidade do sistema, bem como sua eficiência, e demonstrar como os fatores climáticos interferem no desempenho do mesmo, comprovando assim a veracidade das fórmulas teóricas;
3. Efetuar uma análise completa da legislação envolvida, mostrando as oportunidades e as limitações decorrentes da mesma, bem como as informações necessárias para instalar uma planta fotovoltaica real;
4. Simular o comportamento da planta durante um ano de funcionamento, utilizando um banco de dados do estado do Espírito Santo, de modo a obter dados convincentes sobre a produtividade do local;
5. Fazer uma análise econômico-financeira, utilizando os dados obtidos para verificar a real viabilidade do projeto no estado.

1.4 Análise de Literatura Especializada

De livros sobre Sistemas Fotovoltaicos (12), foram obtidas informações sobre as tecnologias de células hoje disponíveis no mercado, cada uma com seus pontos positivos e negativos, dentre as quais foi escolhida aquela com a melhor relação entre custo e benefício. Dissertações sobre temas similares (13) (14) e artigos científicos (15) auxiliaram na exposição do modelo matemático, já amplamente demonstrado e utilizado, permitindo obter resultados muito próximos da realidade.

A partir de três livros de Eletrônica de Potência (16) (17) (18), foram estudados os modelos de conversores CC-CC e CC-CA implementáveis no projeto. A escolha final foi justificada pelo arranjo do gerador fotovoltaico e pelos níveis de tensão esperados na saída do sistema.

Por fim, foi utilizada uma literatura de Engenharia Econômica (19), de onde foram adquiridos todos os conceitos e os parâmetros econômicos necessários para uma estimativa precisa do custo do sistema ao longo do seu tempo de vida.

2 VISÃO GERAL

É necessário obter conhecimento do contexto a ser analisado. Com esta finalidade, será feito o detalhamento de todos os tópicos necessários para o completo entendimento do Ambiente de Contratação Regulada (ACR). O foco da pesquisa é a distribuidora EDP Escelsa, portanto alguns detalhes podem diferir com relação à outras distribuidoras do país, mas as regulamentações da ANEEL são válidas em todo o território nacional.

2.1 As Tarifas do ACR

A ANEEL regula e calcula diretamente o preço da tarifa, com base nos dados obtidos das geradoras e distribuidoras. O seu valor deve ser suficiente para cobrir os custos e garantir os investimentos necessários à expansão e à manutenção da qualidade de atendimento (20). A tarifa é dividida em três custos distintos, conforme mostra a Figura 3:

- Energia Gerada: constituído pelo custo de geração da energia pelas Geradoras. Vale lembrar que cada distribuidora compra, através de um leilão, energia de várias geradoras, constituindo assim um pacote que tem custo variável;
- Transporte de Energia: constituído pelo custo do trânsito da energia da geradora até a unidade consumidora. Compreende os custos de transmissão e distribuição, lembrando que esta é uma situação de monopólio natural regulada pela ANEEL;
- Encargos Setoriais: encargos instituídos por lei, aplicados sobre os custos de geração, transmissão e distribuição.

Figura 3 – Composição da Tarifa de Energia Elétrica



Fonte: ANEEL (20).

Para fins de cobrança, estas três partes são divididas em apenas duas:

- Parcela A (TE): parcela de energia, transmissão e encargos setoriais;
- Parcela B (TUSD): distribuição de energia.

São aplicados tributos federais (PIS/COFINS, variando de 3 a 8%) e estaduais (ICMS, 25%) sobre o valor total da tarifa, além da Contribuição para Iluminação Pública. Estas alíquotas são cobradas “por dentro”, através da fórmula descrita a seguir:

$$\text{Valor Cobrado} = \frac{(TUSD + TE)}{(1 - (PIS + COFINS + ICMS))} \quad (1.1)$$

Em 2015, foi introduzido o conceito de bandeira tarifária (5), que consiste na aplicação de um valor extra na tarifa relacionado ao custo do pacote de energia contratado pela distribuidora, conforme segue:

- Bandeira Verde: condições favoráveis para a geração de energia. A tarifa não sofre acréscimo;
- Bandeira Amarela: condições menos favoráveis para a geração de energia. A tarifa sofre acréscimo de R\$15,00 a cada 1000kWh consumidos;
- Bandeira Vermelha - Patamar 1: condições desfavoráveis para a geração de energia. A tarifa sofre acréscimo de R\$30,00 a cada 1000kWh consumidos;

- Bandeira Vermelha - Patamar 2: condições extremamente desfavoráveis para a geração de energia. A tarifa sofre acréscimo de R\$45,00 a cada 1000kWh consumidos.

As informações expostas até o presente momento são válidas para qualquer classe consumidora no ACR, mas os valores e o tipo de cobrança exercidos pela distribuidora diferem entre os consumidores de baixa e alta tensão. Os tópicos seguintes explicarão estas diferenças.

2.1.1 Baixa Tensão

A tarifa aplicada na baixa tensão é chamada de tarifa monômnia, pois é constituída apenas por uma parcela, formada por TUSD e TE, diretamente proporcional à quantidade de energia consumida, conforme mostrado na Tabela 4. O reajuste tarifário aplicado pela EDP Escelsa é atualizado todo mês de agosto (10).

Tabela 4 – Tarifas EDP Escelsa BT agosto 2015

Tarifa EDP Escelsa B1 – REH 1.928 agosto 2015	
Parcela	Valor
TUSD (R\$/kW)	0,00
TUSD (R\$/MWh)	219,71
TE (R\$/MWh)	244,81
Bandeira (R\$/MWh)	0 a 45
Total Energia (R\$/kWh)	464,52 a 509,52

Fonte: Produção do próprio autor. Baseado em (10).

2.1.2 Alta Tensão

A tarifa de alta tensão difere da que é cobrada na baixa tensão, sendo chamada de tarifa binômnia, pois é constituída por duas parcelas. A primeira parcela é relativa à Demanda de Energia (TUSD), um valor relativo à potência de pico desenvolvida pela instalação consumidora (valor integralizado em 15 minutos), que a distribuidora tem

obrigação de fornecer em qualquer instante. A segunda, exatamente como na baixa tensão, é composta por TUSD e TE, sendo proporcional à quantidade de energia consumida pelo cliente.

Neste grupo consumidor há também o conceito de Posto Horário (21), uma diferenciação na tarifa aplicada conforme o horário do dia em que há consumo de energia. A divisão é realizada conforme segue:

- Horário de Ponta: período de três horas diárias consecutivas definidas pela distribuidora (na EDP Escelsa é de 18h às 21h), onde é cobrado um valor adicional por se tratar de um momento com alto pico de carga. É feita exceção aos sábados, domingos e feriados nacionais;
- Horário fora de ponta: período de horas diárias consecutivas complementares ao horário de ponta.

Com base na situação até aqui apresentada, a ANEEL prevê dois tipos de modalidade tarifária, de modo a não prejudicar de forma excessiva as empresas que são obrigadas a fazer grande uso de energia no horário de ponta. As modalidades tarifárias chamam-se Verde e Azul e serão discutidas nos tópicos seguintes.

2.1.2.1 Modalidade Tarifária Verde

A modalidade tarifária verde é composta por uma única tarifa de demanda, aplicada em todos os postos horários, e duas tarifas de consumo, que variam conforme o horário de utilização. O custo final é dado pela seguinte fórmula:

$$\begin{aligned} Total = & (Tarifa D. x kW) + (Tarifa P. x kWh P.) \\ & + (Tarifa F.P. x kWh F.P.) \end{aligned} \quad (1.2)$$

Pode-se perceber, pela conformação da tarifa, que é indicada para aqueles consumidores com baixo consumo no horário de ponta. Os valores estão indicados na Tabela 5.

Tabela 5 – Tarifas EDP Escelsa AT Verde agosto 2015

Tarifa EDP Escelsa A4 VERDE – REH 1.928 agosto 2015	
Parcela	Valor
TUSD (R\$/kW)	13,56
TUSD Ponta (R\$/MWh)	1.053,35
TE Ponta (R\$/MWh)	373,12
TUSD Fora Ponta (R\$/MWh)	84,71
TE Fora Ponta (R\$/MWh)	233,14
Bandeira (R\$/MWh)	0 a 45
Total Energia (R\$/kWh)	Variável

Fonte: Produção do próprio autor. Baseado em (10).

2.1.2.2 Modalidade Tarifária Azul

A modalidade tarifária azul é composta por duas tarifas de Demanda e duas de consumo, que variam conforme o horário de utilização. O custo final é dado pela seguinte fórmula:

$$\begin{aligned}
 Total = & (Tarifa D.P. \times kW P.) + (Tarifa D.F.P. \times kW F.P.) \\
 & + (Tarifa P. \times kWh P.) + (Tarifa F.P. \times kWh F.P.)
 \end{aligned}
 \tag{1.3}$$

Pode-se perceber, pela conformação da tarifa, que é indicada para aqueles consumidores com alto consumo no horário de ponta, de modo que o mesmo justifique o valor adicional na demanda. Os valores estão indicados na Tabela 6.

Tabela 6 – Tarifas EDP Escelsa AT Azul agosto 2015

Tarifa EDP Escelsa A4 AZUL – REH 1.928 agosto 2015	
Parcela	Valor
TUSD Ponta (R\$/kW)	39,88
TUSD Fora Ponta (R\$/kWh)	13,56
TUSD Ponta (R\$/MWh)	84,71
TE Ponta (R\$/MWh)	373,12
TUSD Fora Ponta (R\$/MWh)	84,71
TE Fora Ponta (R\$/MWh)	233,14
Bandeira (R\$/MWh)	0 a 45
Total Energia (R\$/kWh)	Variável

Fonte: Produção do próprio autor. Baseado em (10).

2.2 Smart Grid

Tendo como objetivo estimular o consumo consciente, promover o combate ao uso indiscriminado de energia, garantir alto padrão de qualidade no fornecimento e prover o controle das tarifas, o setor elétrico busca cada vez mais soluções práticas que ajudem tanto as distribuidoras quanto os consumidores. Neste cenário, surge como ferramenta o conceito de Rede Inteligente, ou *Smart Grid*.

O conceito de *Smart Grid*, possui diferentes versões, pois quem define pode trilhar vários caminhos. Automação de rede, combate às falhas, controle de qualidade de fornecimento, melhoria de canais de comunicação com o consumidor e sistemas de geração distribuída são apenas alguns dos conceitos abordados. Buscando unificar e homogeneizar todas as opiniões acerca do tema, o U.S. Department of Energy (22) definiu que:

“Smart Grid não é uma “coisa”, mas uma visão, a ser completada e, que deve ser construída de acordo com as necessidades do mercado onde será implantado e tomando em conta múltiplas perspectivas, tais como tecnológica, ambiental, socioeconômica e político-regulatória”.

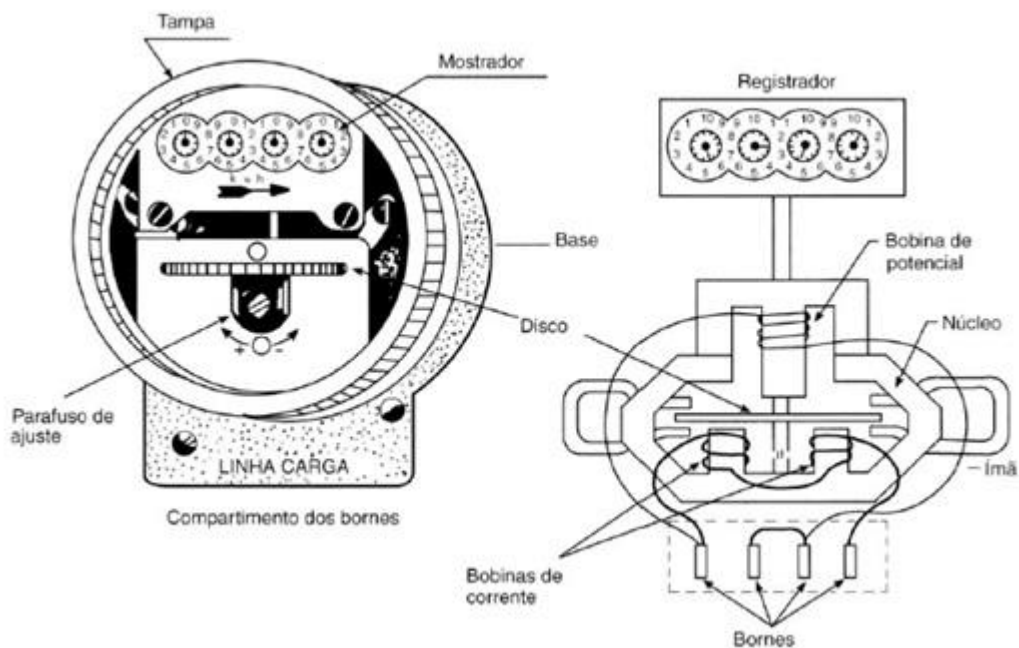
(U.S. Dept. of Energy - The Modern Grid: A vision for the Smart Grid, 2009)

Este tipo de rede inteligente aplica-se a partir da geração, chegando até as etapas de transmissão, distribuição e local de consumo, independentemente do tipo de unidade (residencial, comercial, industrial). Deste modo, torna-se possível

automatizar a rede de forma integrada e segura, permitindo uma análise precisa e em tempo real de todo o sistema, garantindo eficácia, eficiência e rapidez. Mas para tal, um grande investimento em infraestrutura é necessário.

Um dos maiores problemas relacionados à ampla difusão do conceito de *Smart Grid* no Brasil vem das unidades consumidoras. Segundo a ANEEL (23), no país estão instalados cerca de 62 milhões de medidores do modelo analógico (Figura 4). A substituição pelo modelo digital (Figura 5) é extremamente necessária, de modo que o monitoramento e o controle remoto sejam implementáveis no sistema como um todo. Além do mais, para a implementação da geração distribuída, foco central deste trabalho, é obrigatório o uso de um medidor digital bidirecional, segundo o Módulo 3 do PRODIST (24). Estima-se que em aproximadamente dez anos todos os medidores utilizados serão do novo modelo.

Figura 4 - Detalhes de um medidor analógico



Fonte: Instalações Elétricas, Hélio CREDER

Figura 5 - Medidor digital



Fonte: ANEEL, site.

2.3 Geração Distribuída

Geração distribuída é uma expressão utilizada para designar a geração elétrica realizada junto ou próxima do consumidor. Isto significa que o consumidor pode produzir sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada, podendo inclusive fornecer o excedente à rede de distribuição de sua localidade. No Brasil, começou a ser regulamentada a partir de 2012, com a REN N° 482 (25). Vale a pena ressaltar que a primeira versão foi apresentada de forma bastante primitiva, sofrendo revisões e atualizações até se tornar o que é hoje. Atualmente a ANEEL utiliza a seguinte classificação (26):

- Microgeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada à rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;
- Minigeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW para fontes hídricas ou menor ou igual a 5 MW para cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou para as demais fontes renováveis de

energia elétrica, conectada à rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;

A seguir, será detalhada a REN N° 687, que regula todos os aspectos da geração distribuída.

2.3.1 REN 687 – 2015

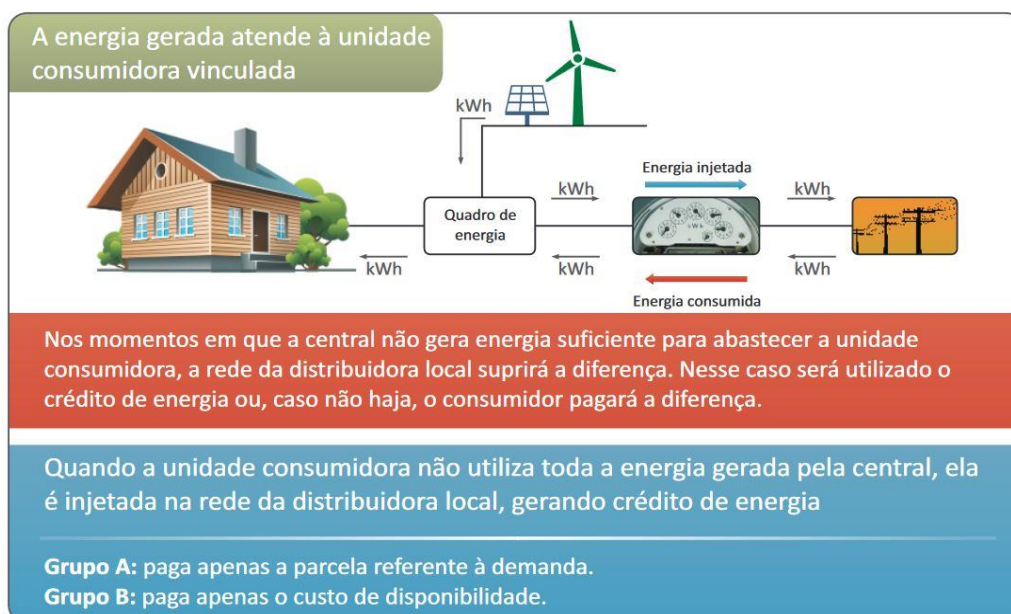
No dia 24 de novembro de 2015, a ANEEL publicou a REN N° 687, que substituiu a REN N° 482 de 2012 e sua retificação N° 517, que foi apresentada sempre no mesmo ano. Além das definições de microgeração e minigeração, anteriormente mencionadas, a Resolução Normativa descreve os seguintes pontos:

- Sistema de compensação de energia elétrica: sistema no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa (Figura 6);
- Empreendimento com múltiplas unidades consumidoras: caracterizado pela utilização da energia elétrica de forma independente, no qual cada fração com uso individualizado constitua uma unidade consumidora e as instalações para atendimento das áreas de uso comum constituam uma unidade consumidora distinta, de responsabilidade do condomínio, da administração ou do proprietário do empreendimento, com microgeração ou minigeração distribuída, e desde que as unidades consumidoras estejam localizadas em uma mesma propriedade ou em propriedades contíguas, sendo vedada a utilização de vias públicas, de passagem aérea ou subterrânea e de propriedades de terceiros não integrantes do empreendimento;
- Geração compartilhada: caracterizada pela reunião de consumidores, dentro da mesma área de concessão ou permissão, por meio de consórcio ou cooperativa, composta por pessoa física ou jurídica, que possua unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída em

local diferente das unidades consumidoras nas quais a energia excedente será compensada;

- Autoconsumo remoto: caracterizado por unidades consumidoras de titularidade de uma mesma Pessoa Jurídica, incluídas matriz e filial, ou Pessoa Física que possua unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída em local diferente das unidades consumidoras, dentro da mesma área de concessão ou permissão, nas quais a energia excedente será compensada

Figura 6 – Sistema de Compensação de Energia



Fonte: ANEEL (27)

É necessário enfatizar que a potência máxima do gerador fica limitada a 75kW no caso de unidades em baixa tensão, que também é o limite máximo para a condição de microgerador. No caso de clientes em alta tensão, a potência máxima do gerador deve ser limitada à potência disponibilizada pela concessionária (Demanda Contratada), podendo a mesma ser alterada caso o proprietário queira instalar um gerador de maior potência. Em todo caso, mesmo que o consumo da unidade seja nulo, o valor de Demanda será cobrado. Fica evidente que na baixa tensão, por causa do maior custo da parcela relativa à energia consumida (R\$454,52 contra R\$317,85), seria muito mais fácil atingir a viabilidade de um projeto fotovoltaico.

Já o sistema de compensação de energia (*net metering*) prevê que a energia ativa injetada na rede possa ser reaproveitada em até 60 meses. Após esse prazo, não poderá ser recuperada. No momento em que esta energia retorna à unidade consumidora, incide na mesma a alíquota do ICMS, no caso do Estado do Espírito Santo 25% por dentro, com relação à tarifa de energia aplicável. O Conselho Nacional de Política Fazendária (CONFAZ), publicou o Convênio ICMS 16, de 22/04/2015, que permite aos Estados isentar o tributo das operações com compensação de energia (27). Apesar de alguns Estados já terem feito a adesão ao Convênio, o Espírito Santo, até presente data, não tomou posição.

2.3.2 Procedimentos para Viabilização de Acesso

Todos os procedimentos necessários para o acesso e a conexão da micro e minigeração distribuída estão estabelecidos na Seção 3.7 do módulo 3 do PRODIST (24), e serão detalhados a seguir.

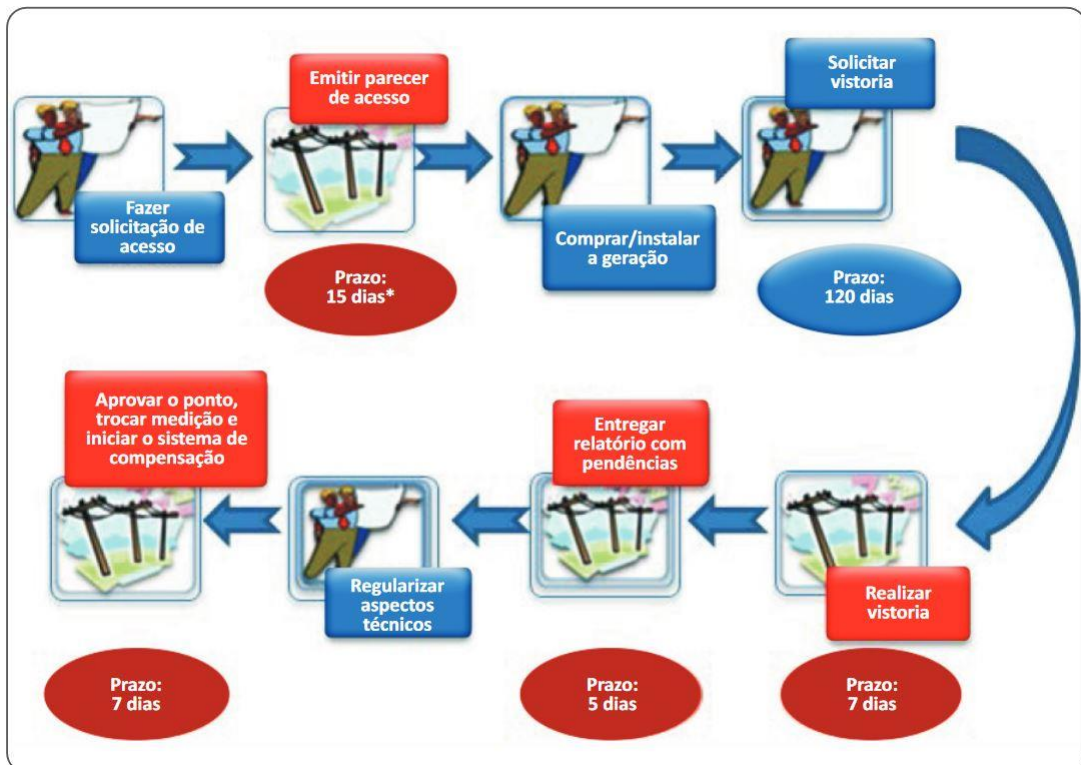
Primeiramente o consumidor deve passar pelas etapas de solicitação e parecer de acesso. A solicitação é um requerimento formulado pelo acessante, que deve conter o Formulário de Solicitação, disponível no PRODIST. A distribuidora deverá protocolar este formulário, junto aos documentos necessários, reservando-se o direito de recusar o pedido caso a documentação esteja incompleta. Caso esteja tudo nos conformes, será emitido, respeitando o prazo de 15 dias, o parecer de acesso, um documento formal onde são informadas as condições de acesso e os requisitos técnicos necessários para a conexão das instalações. O documento também apresenta o orçamento de eventuais obras necessárias, informando as responsabilidades do cliente e da concessionária com relação à participação financeira.

A próxima etapa é a compra e instalação dos equipamentos, respeitando todas as normas vigentes. O cliente tem até 120 dias após a emissão do parecer para solicitar a vistoria da obra concluída, que será realizada pela distribuidora em até 7 dias contados da data da solicitação formal. Caso sejam detectadas pendências nas instalações da unidade consumidora que impeçam sua conexão à rede, será encaminhado ao cliente, por escrito, em até 5 dias, o relatório contendo os

respectivos motivos e uma lista exaustiva com todas as providências corretivas necessárias. Caso a vistoria seja aprovada, o medidor convencional será substituído pelo modelo bidirecional, cujo valor de cerca de R\$500,00 será cobrado ao consumidor, completando assim a conexão.

O procedimento está descrito, de forma gráfica e simplificada, na Figura 7.

Figura 7 – Procedimentos para acesso e conexão da geração distribuída



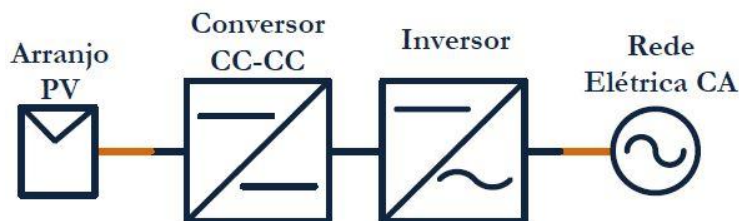
Fonte: ANEEL (27)

3 TEORIAS APLICADAS

Neste capítulo será descrita toda a teoria necessária para projetar e simular uma planta fotovoltaica conectada à rede elétrica de baixa tensão. Este tipo de sistema opera de forma complementar à mesma, não possuindo mecanismos de armazenamento de energia, pois toda a energia produzida é utilizada instantaneamente, e o excedente é injetado no sistema elétrico de distribuição.

O gerador fotovoltaico produz uma corrente contínua com tensão variável, que traz a necessidade de um conversor de dois estágios CC-CC e CC-CA que mantenha o seu valor constante e posteriormente a compatibilize com a rede elétrica, tornando seu formato senoidal e sincronizando frequência, módulo e ângulo de fase com a rede elétrica. A Figura 8 exemplifica o conceito base do projeto.

Figura 8 - Esquema de uma planta FV conectada à rede elétrica



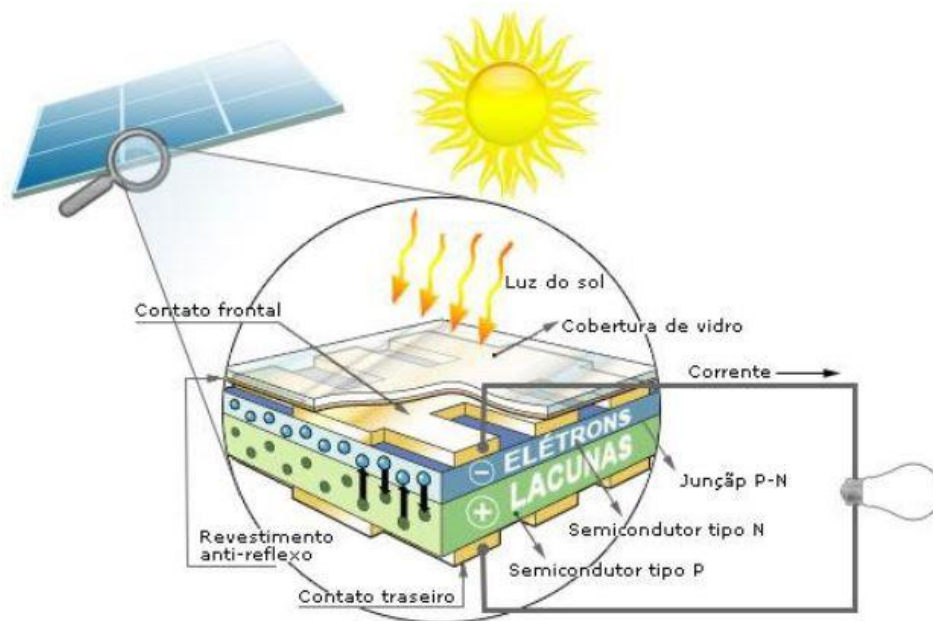
Fonte: Mattos (28)

3.1 O Painel Fotovoltaico

As células fotovoltaicas, como o próprio nome sugere, têm o seu funcionamento baseado no efeito fotovoltaico, descoberto em 1839 pelo físico francês Edmund Becquerel. Este efeito converte a radiação solar em energia elétrica CC de forma direta. Para tanto, é utilizado um material semicondutor, capaz de gerar uma diferença de potencial quando atingida pela radiação eletromagnética solar, mais precisamente a luz visível. Os semicondutores puros, desde que a energia da radiação incidente seja maior que o *gap* do material, da ordem de 1eV, já conseguem reproduzir o efeito, mas para obter uma corrente útil é necessário criar uma estrutura que permita a coleta dos elétrons excitados (29).

Hoje o semicondutor mais utilizado é o Silício, devido à sua abundância no planeta e aos bons resultados que é capaz de oferecer. O elemento possui 4 elétrons de ligação, que formam uma rede cristalina ao se juntar com os vizinhos. Coloca-se de um lado Silício dopado com um elemento com átomos com 5 elétrons na última camada de valência (Fósforo por exemplo), que inevitavelmente ficará com um elétron sobrando, fortemente susceptível a ser deslocado. Deste modo, pode-se dizer que o Fósforo é um dopante doador de elétrons, chamado dopante N. Do outro lado coloca-se Silício dopado com um elemento com átomos com 3 elétrons na última camada de valência (Boro por exemplo), que contrariamente ao caso anterior, ficará com um elétron faltando, com susceptibilidade a recebê-lo caso apareça. Deste modo, pode-se dizer que o Fósforo é um dopante receptor de elétrons, chamado dopante P. A união entre estas duas camadas chama-se junção P-N. A Figura 9 mostra os conceitos aqui descritos.

Figura 9 - Funcionamento de uma célula fotovoltaica



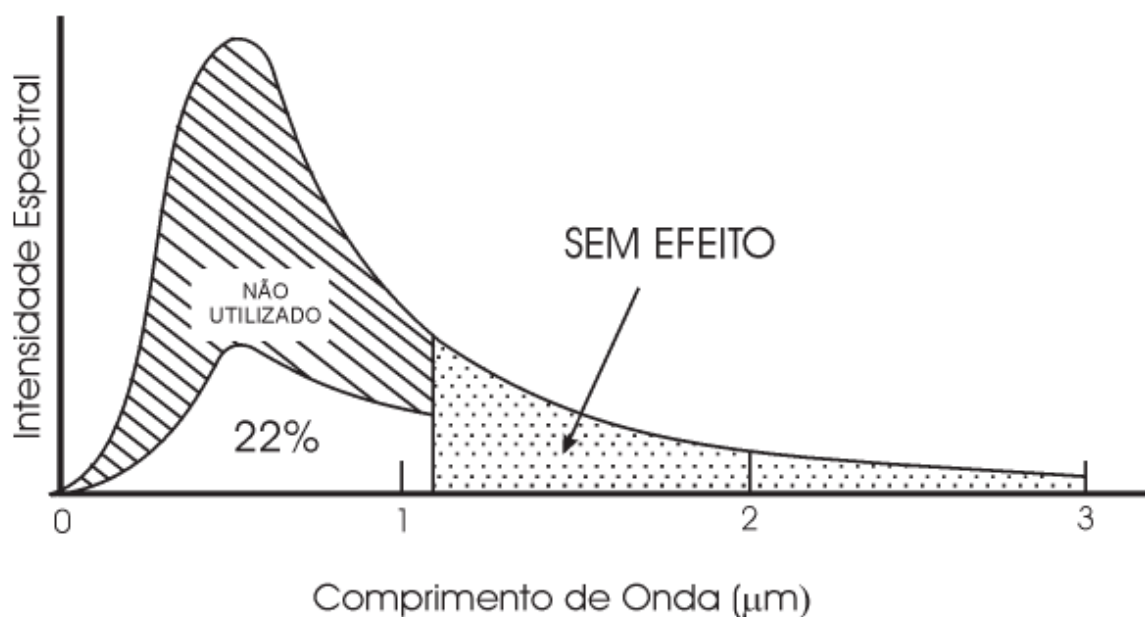
Fonte: Tavares (13).

Quando é criada a junção P-N, à temperatura ambiente, ocorre um deslocamento natural de elétrons da camada N, que se torna eletricamente positiva, para a camada P, que se torna eletricamente negativa. Deste modo forma-se um campo elétrico permanente que dificulta o deslocamento de novos elétrons, até criar uma situação de equilíbrio. Quando a célula é exposta à radiação solar com energia maior que o

gap, voltará a ocorrer o efeito, de forma mais intensa, gerando novos pares elétron-lacuna. O campo elétrico atrai o elétron para a região N, enquanto a lacuna o atrai para o lado P. Isto faz com que haja uma diferença de potencial causado pelo acúmulo de portadores de carga em cada lado da junção. Se em cada junção colocarmos terminais metálicos ligados a um condutor, haverá o estabelecimento de uma corrente elétrica.

Existe um limite na conversão fotovoltaica. Primeiramente, o espectro luminoso não consegue ser totalmente aproveitado, pois somente comprimentos de onda inferiores a $1\mu\text{m}$ possuem energia suficiente para excitar os elétrons. Além disso, cada fóton só consegue energizar um elétron e há possibilidade de que um elétron deslocado não seja coletado, tornando inútil a energia do fóton. Na Figura 10 é possível ver o aproveitamento do espectro.

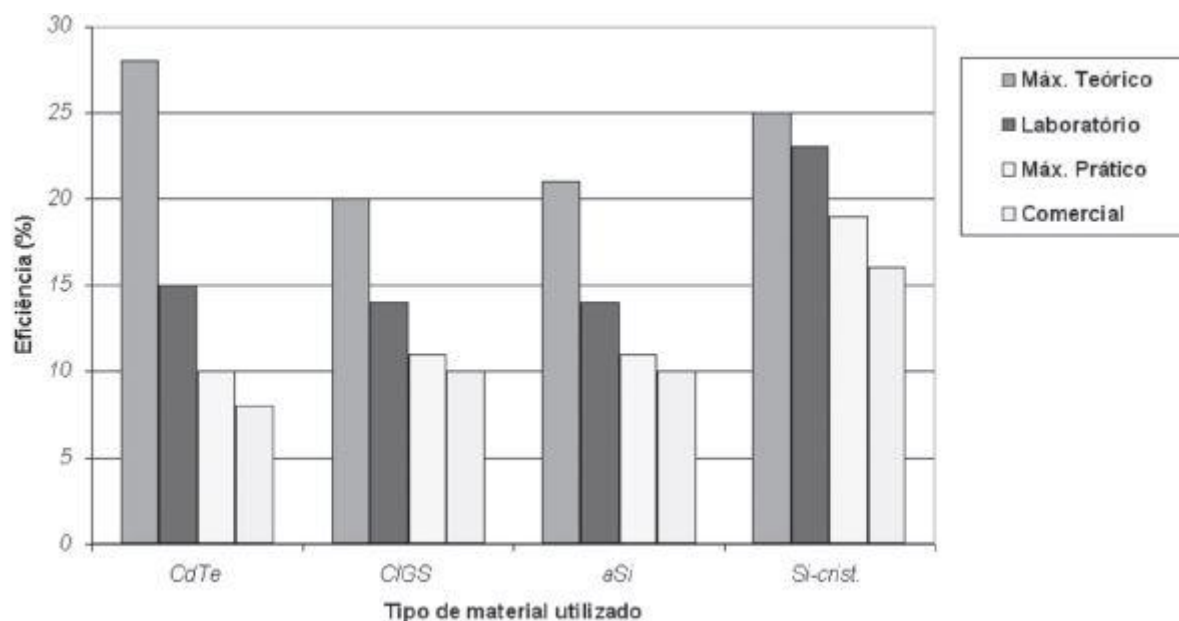
Figura 10 - Aproveitamento do comprimento de onda



Fonte: Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos (29).

Como explicado no início, o silício é o semicondutor mais utilizado, devido à uma grande disponibilidade no meio ambiente, o que reduz drasticamente o seu custo. Existem, porém, materiais mais eficientes, como demonstrado na Figura 11. A seguir, serão mostrados os tipos de células hoje disponíveis.

Figura 11 - materiais utilizados e suas eficiências



Fonte: Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos (29).

Onde:

CdTe	Telureto de cádmio
CIGS	Grupo – cobre, índio, gálio, enxofre, selênio
aSi	Silício amorfo
Si-crist	Silício cristalino

3.1.1 Silício Monocristalino

É um material muito parecido com o silício utilizado para a fabricação de circuitos integrados. As células são constituídas por um único grande cristal, de extrema pureza e alta eficiência. É o tipo de silício mais eficiente, mas ao mesmo tempo, o que possui a cadeia de produção mais cara. E devido ao tipo de material, a tecnologia tem sérios problemas para reduzir seu custo (29).

3.1.2 Silício Multicristalino

O material é criado a partir do mesmo do silício utilizado para a produção do monocristalino, com uma diferença muito importante: não é utilizado o processo para

obter o cristal único, que necessita de uma grande quantidade de energia, mas forma-se o um bloco formado por vários pequenos cristais. Claramente perde-se eficiência por causa da presença de interfaces entre os cristais, mas a relação entre custo e benefício é superior, tornando o silício multicristalino o mais utilizado para a fabricação de painéis.

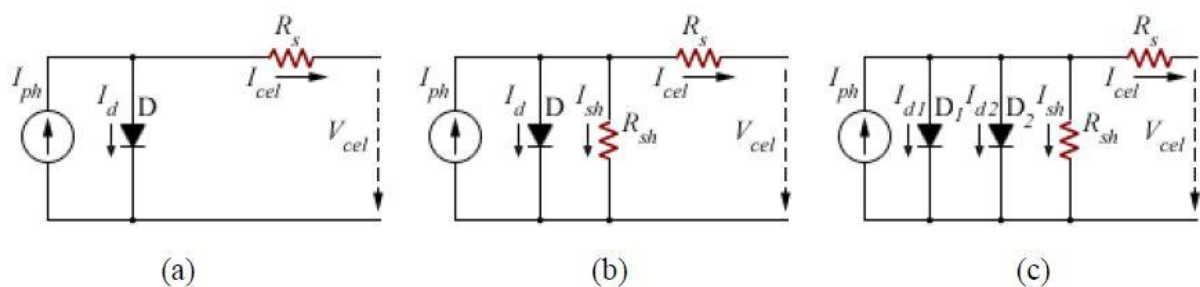
3.1.3 Silício Amorfo

O material é utilizado para a produção de filmes finos (13). O silício é colocado diretamente sobre chapas finas metálicas, normalmente de aço inoxidável. Caso o objetivo seja obter filmes flexíveis, no lugar do metal pode-se utilizar plástico. É a tecnologia mais barata de todas, e ao mesmo tempo a que possui menor eficiência devido à sua estrutura pouco homogênea. Em contrapartida, devido à sua flexibilidade, permite uma utilização muito mais criativa.

3.1.4 Modelagem da célula fotovoltaica

A característica mais importante da célula fotovoltaica, para fins de projeto, é a curva I-V (curva corrente-tensão). Esta curva descreve todo o comportamento da mesma em qualquer situação, permitindo assim realizar a simulação de forma precisa com qualquer carga e condição climática. Existem três principais modelagens aceitas hoje: a modelagem ideal (modelo empírico), o modelo de um diodo e o modelo de dois diodos (14). A Figura 12 exemplifica estes três modelos.

Figura 12 - Circuito equivalente da célula fotovoltaica: (a) Modelo Ideal, (b) Modelo de um diodo, (c) Modelo de dois diodos.



Fonte: Tavares (13).

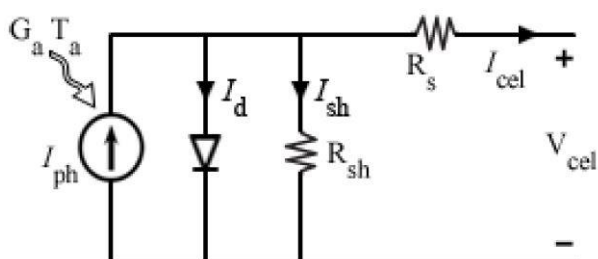
Onde:

I_{ph}	Fotocorrente
I_d	Corrente no diodo
I_{d1}	Corrente no diodo 1 (modelo de dois diodos)
I_{d2}	Corrente no diodo 2 (modelo de dois diodos)
I_{sh}	Corrente no resistor shunt
R_{sh}	Resistor shunt
R_s	Resistor série
I_{cel}	Corrente de saída da célula
V_{cel}	Tensão nos terminais da célula

3.1.4.1 Modelo de um diodo

Devido à sua complexidade média, fato que garante uma satisfatória relação entre custo computacional e precisão, este trabalho utilizará o modelo de um diodo, que também é chamado de modelo real. A Figura 13 retoma os conceitos mostrados anteriormente.

Figura 13 - Circuito equivalente do modelo de um diodo



Fonte: Tavares (13).

Onde:

G_a	Irradiação ambiente
T_a	Temperatura ambiente

Analisando o circuito e aplicando a Lei das Correntes de Kirchhoff, obtemos a Equação (2.1), que expressa a corrente da célula I_{cel} em função da fotocorrente I_{ph} , da corrente do diodo I_d e da corrente shunt I_{sh} .

$$I_{cel} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (2.1)$$

Como mostrado na Equação (2.2), a fotocorrente I_{ph} é diretamente proporcional à corrente gerada pelo fóton durante a irradiação ambiente (I_0), corrigida pelo fator K_I , coeficiente de temperatura da corrente de curto circuito. Este último dado é fornecido pelo fabricante da célula. Os termos T_c e T_r correspondem à temperatura da célula e temperatura de referência (298K).

$$I_{ph} = I_0(1 + K_I(T_c - T_r)) \quad (2.2)$$

A corrente I_0 é diretamente proporcional à irradiação ambiente G_a , que é relacionada com a corrente de curto circuito I_{sc} , também fornecida pelo fabricante, e a irradiação de referência G_0 (1000W/m²), conforme Equação (2.3).

$$I_0 = \frac{G_a I_{sc}}{G_0} \quad (2.3)$$

É interessante lembrar que os valores 298K (25°C) para a temperatura da célula e 1000W/m² para a irradiação são padronizados pelo STC (*Standard Test Conditions*). São valores que permitem à célula desenvolver o que chamamos de potência de pico, algo praticamente impossível de ser reproduzido fora de laboratório. Deste modo, existe outro padrão de testes, chamado NOCT (*Nominal Operating Cell Temperature*), onde a célula é submetida a uma temperatura ambiente de 20°C e irradiação de 800W/m². Fica claro que nestas condições, a potência real é menor que a potência de pico. Conforme a Equação (2.4), sabendo o valor do NOCT, que é normalmente fornecido pelo fabricante, é possível obter a temperatura da célula com qualquer condição de irradiação e temperatura (12).

$$T_c = T_a + G_a \frac{(NOCT - 20^\circ C)}{800W/m^2} \quad (2.4)$$

A Equação (2.5) determina I_d , a corrente no diodo (15), sendo a mesma determinada pela sua corrente de saturação na temperatura ambiente I_{sat} (Equação (2.6)). Esta corrente de saturação, por sua vez, é obtida a partir da corrente de saturação do diodo na temperatura da célula (I_{0r}), determinada a partir da sua corrente de curto circuito, tensão de circuito aberto e do fator de idealidade do diodo, conforme Equação (2.7).

$$I_d = I_{sat} \left[\exp \left(\frac{q}{AkT_c} (V_{cel} + R_s I_{cel}) \right) - 1 \right] \quad (2.5)$$

$$I_{sat} = I_{0r} \left(\frac{T_c}{T_r} \right)^{\frac{3}{A}} \exp \left[\frac{qEg}{Ak} \left(\frac{1}{T_c} - \frac{1}{T_r} \right) \right] \quad (2.6)$$

$$I_{0r} = \frac{I_{sc}}{\left[\exp \left(\frac{qV_{oc}}{AkT_r} \right) - 1 \right]} \quad (2.7)$$

Onde:

I_{sat}	Corrente de saturação do diodo [A]
A	Fator de idealidade do diodo
k	Constante de Boltzmann: 1.38×10^{-23} [J/K]
T_c	Temperatura da célula [K]
T_r	Temperatura de referência [K]
R_s	Resistência Série [Ω]
q	Carga elementar do elétron: 1.60×10^{-19} [C]
Eg	Gap Energy [eV]
I_{0r}	Corrente de saturação do diodo na T_c [A]
V_{oc}	Tensão de circuito aberto da célula [V]
I_{sc}	Corrente de curto circuito da célula [A]

Por fim, é necessário calcular a corrente shunt:

$$I_{sh} = \frac{V_{cel} + R_s I_{cel}}{R_{sh}} \quad (2.8)$$

Graças à qual é possível obter a tensão da célula, na Equação (2.9).

$$V_{cel} = V_d - R_s I_{cel} \quad (2.9)$$

É possível obter os valores de R_s e R_{sh} de forma gráfica, utilizando o datasheet fornecido pelo fabricante. Neste trabalho, porém, foram utilizados os valores do bloco “PV Array” do Simulink, de modo a comparar os valores obtidos pela simulação com os da suíte e aferir a qualidade do código criado.

3.1.4.2 Arranjo fotovoltaico

É possível conectar múltiplos módulos, de modo a formar um arranjo fotovoltaico (*array*). Sabe-se que de forma geral, quanto maior a área do módulo, maior a quantidade de eletricidade produzida, e que geralmente os módulos possuem apenas células em série. A curva I-V de um arranjo é idêntica à curva do módulo, mas a corrente e a tensão gerados são proporcionais ao número de módulos em série e paralelo, conforme as equações a seguir:

$$I_{arranjo} = I_{cel} M_p N_p \quad (3.1)$$

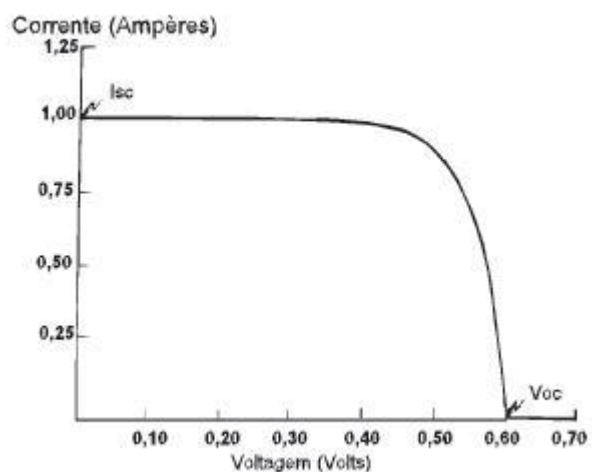
$$V_{arranjo} = V_{cel} M_s N_s \quad (3.2)$$

Onde:

M_p	Número de painéis em paralelo
N_p	Número de células em paralelo
M_s	Número de painéis em série
N_s	Número de células em série

Deste modo, é possível criar qualquer arranjo, com as características I-V necessárias para o projeto, facilitando a escolha dos equipamentos em volta dos módulos (Figura 14).

Figura 14 - Exemplo de curva I-V de um painel fotovoltaico

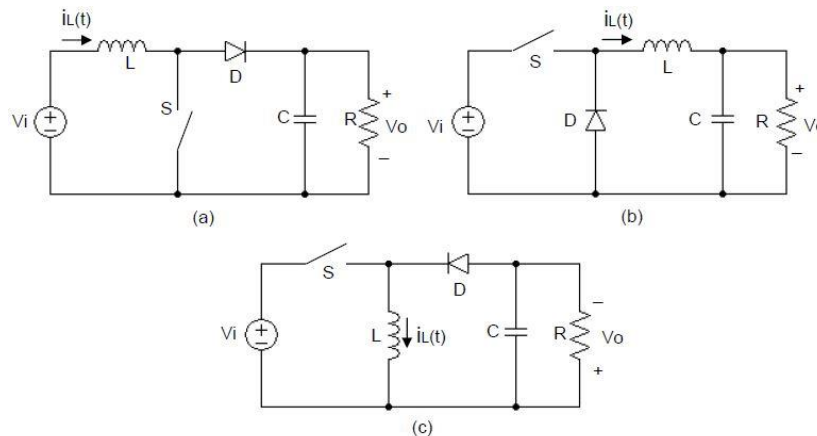


Fonte: Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos (29).

3.2 Conversor CC-CC

O conversor estático CC-CC nada mais é que um dispositivo que recebe um nível de tensão ou corrente contínua variável e o ajusta para um valor fixo, sempre de formato contínuo, de acordo com as especificações de projeto. Existem 3 topologias de conversores: o abaixador de tensão (*Step Down* ou *Buck*), o elevador de tensão (*Step Up* ou *Boost*) e o abaixador-elevador (*Buck-Boost*). A Figura 15 mostra os 3 tipos de conversor, sendo:

- L Indutor para armazenamento de energia
- D Diodo de potência
- S Chave estática de potência
- C Capacitor para filtro de saída
- V_i Tensão de entrada
- V_o Tensão de saída

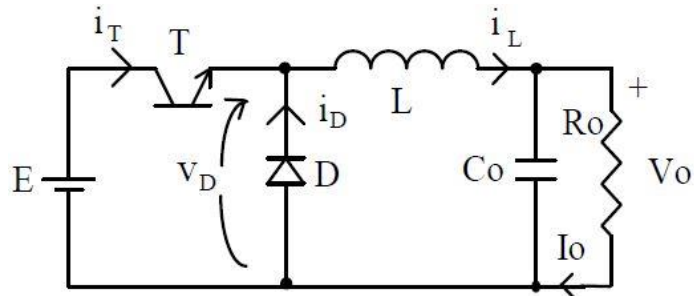
Figura 15 - Tipos de conversor CC-CC: (a) Conversor *Boost*; (b) Conversor *Buck*; (c) Conversor *Buck-Boost*.

Fonte: Seguel (30).

O conversor CC-CC possui dois modos de operação, classificados de acordo com a corrente que passa pelo indutor L . O MCC (modo de condução contínua), onde a corrente é sempre maior que zero, e MCD (modo de condução descontínua), onde a mesma pode ser zero durante alguns instantes do período de chaveamento. Como será mostrado no próximo capítulo, por questões de projeto será utilizado o conversor *Buck*, em modo de condução contínua.

3.2.1 Conversor Buck

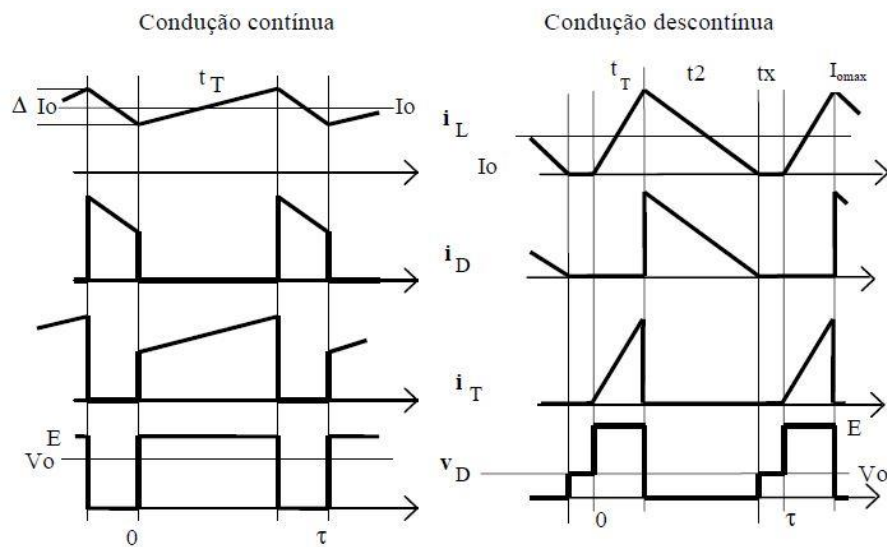
O projeto prevê 29 painéis em série, totalizando 1084,6V de tensão máxima e uma tensão de saída de 600V. Este tipo de conversor foi escolhido exatamente porque é utilizado quando a tensão de saída precisa ser menor que a tensão de entrada. A chave T recorta a tensão de entrada E (Figura 16), fazendo com que a tensão de saída fique praticamente constante. Quando a chave conduz, cortando o diodo, a energia da fonte é transferida para o indutor, aumentando a corrente I_L , e para o capacitor (desde que $I_L > V_0/R$). No momento em que T desliga, o diodo começa a conduzir, dando continuidade à corrente do indutor. A carga e o capacitor recebem a energia armazenada em L . Se a corrente do indutor for maior que a corrente drenada pela carga, o capacitor é carregado com esta diferença. Em caso contrário, o capacitor descarrega para manter a corrente da carga constante (17).

Figura 16 - Circuito do conversor *Buck*

Fonte: Pomilio (17).

Conforme mencionado anteriormente, caso a corrente do indutor permaneça sempre acima de zero, classifica-se a operação do conversor *Buck* como MCC, e em caso contrário MDC. A Figura 17 mostra as formas de onda típicas do conversor.

Figura 17 - Formas de onda típicas

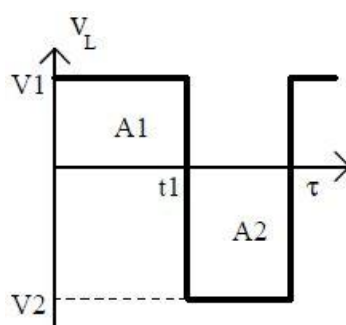


Fonte: Pomilio (17).

3.2.1.1 Modo de Condução Contínua

Para obter a relação entrada/saída é necessário analisar o comportamento do elemento que transfere energia neste percurso. A tensão média sobre a indutância, em regime é zero, conforme mostra a Figura 18.

Figura 18 - Tensão sobre a indutância em regime



Fonte: Pomilio (17).

Tendo em vista que a tensão média é zero, podemos afirmar que as áreas A1 e A2, acima definidas, são iguais. Portanto:

$$V_1 \cdot t_1 = V_2 \cdot (\tau - t_1) \quad (4.1)$$

No caso do *Buck*, no momento que T está conduzindo, $V_L = E - V_0$, e quando D conduz, $V_L = -V_0$.

$$(E - V_0) t_T = V_0 \cdot (\tau - t_T) \quad (4.2)$$

De onde deduzimos:

$$\frac{V_0}{E} = \frac{t_T}{\tau} = D \quad (4.3)$$

A relação entre a tensão de saída e a tensão de entrada é definida em regime permanente, e recebe o nome de ganho estático.

3.2.1.2 Dimensionamento do conversor

Primeiramente, como é necessária uma constante transferência de potência da fonte para a carga, escolhe-se o modo de condução contínua. Existe uma condição limite que define o ponto onde se inicia o MCC, dada pela seguinte Equação:

$$I_{0min} = \frac{(E - V_0) \cdot \tau \cdot D}{2L} \quad (4.4)$$

A partir da qual podemos obter:

$$L_{min} = \frac{E(1-D) \cdot D \cdot \tau}{2I_{0min}} \quad (4.5)$$

Pode-se também escrever a Equação (3.5) em função da carga:

$$L_{min} = \frac{(1-D) \cdot R_0 \cdot \tau}{2} \quad (4.6)$$

Para dimensionar o capacitor, devemos levar em consideração que o fato dele carregar e descarregar, vai causar uma variação de tensão ΔV_0 , que será definida pelo projetista.

$$\Delta Q = \frac{1}{2} \cdot \frac{\tau}{2} \cdot \frac{\Delta I_0}{2} = \frac{\tau \cdot \Delta I_0}{8} \quad (4.7)$$

Sabendo-se que a variação de corrente é dada por:

$$\Delta I_0 = \frac{(E - V_0) \cdot t_T}{L} = \frac{E \cdot D \cdot \tau \cdot (1 - D)}{L} \quad (4.8)$$

Pode-se finalmente substituir (4.8) em (4.7) e chegar na variação de tensão:

$$\Delta V_0 = \frac{\Delta Q}{C_0} = \frac{\tau^2 \cdot E \cdot D \cdot (1 - D)}{8 \cdot L \cdot C_0} \quad (4.9)$$

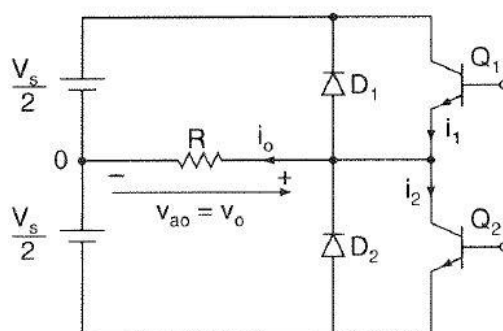
Por último, remaneja-se (4.9) para encontrar o valor do capacitor:

$$C_0 = \frac{V_0 \cdot (1 - D) \cdot \tau^2}{8 \cdot L \cdot \Delta V_0} \quad (4.10)$$

3.3 Conversor CC-CA trifásico

O conversor CC-CA trifásico, também conhecido como inversor trifásico, é um dispositivo que recebe uma tensão de entrada CC e a converte em uma tensão de saída CA, com módulo, fase e frequência compatíveis aos da rede elétrica e garantindo a perfeita distribuição de carga entre as 3 fases. O modelo escolhido é o conversor de meia ponte, formado por 3 conversores monofásicos de meia ponte defasados de 120° elétricos um em relação ao outro (16), conforme mostra a Figura 19. A seguir será explicado o seu funcionamento.

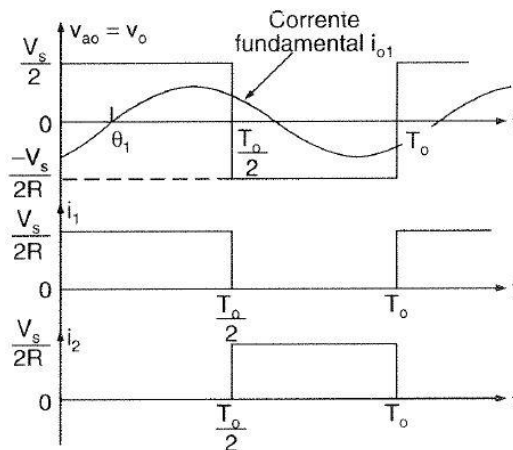
Figura 19 - Inversor monofásico de meia ponte



Fonte: Rashid (18).

No primeiro instante, apenas o transistor Q1 está conduzindo, durante um tempo $T_0/2$. A tensão na carga, portanto, é dada por $V_s/2$. Na segunda metade do ciclo, apenas o transistor Q2 conduz, e a carga desta vez estará submetida a uma tensão de $-V_s/2$. O circuito lógico é projetado de modo que os 2 transistores (que podem muito bem ser substituídos por GTOs ou tiristores de comutação forçada) nunca sejam acionados simultaneamente, evitando uma situação de curto circuito. A Figura 20 mostra as formas de onda obtidas com uma carga resistiva.

Figura 20 - Formas de onda com carga resistiva



Fonte: Rashid (18).

De modo a controlar e formatar a onda de tensão na saída, é necessário atuar uma modulação de largura de pulso (PWM), de modo que os transistores conduzam por períodos de tempo variáveis. Foi escolhida para este projeto a modulação SPWM (modulação por largura de pulso senoidal), onde uma onda triangular em alta frequência é comparada à amplitude de uma onda senoidal de referência, modulando a largura dos pulsos conforme explicado na Figura 21. Chama-se operação na região linear quando a componente de tensão da saída varia linearmente com o fator de modulação de amplitude m_a , sendo seu valor de pico instantâneo definido por:

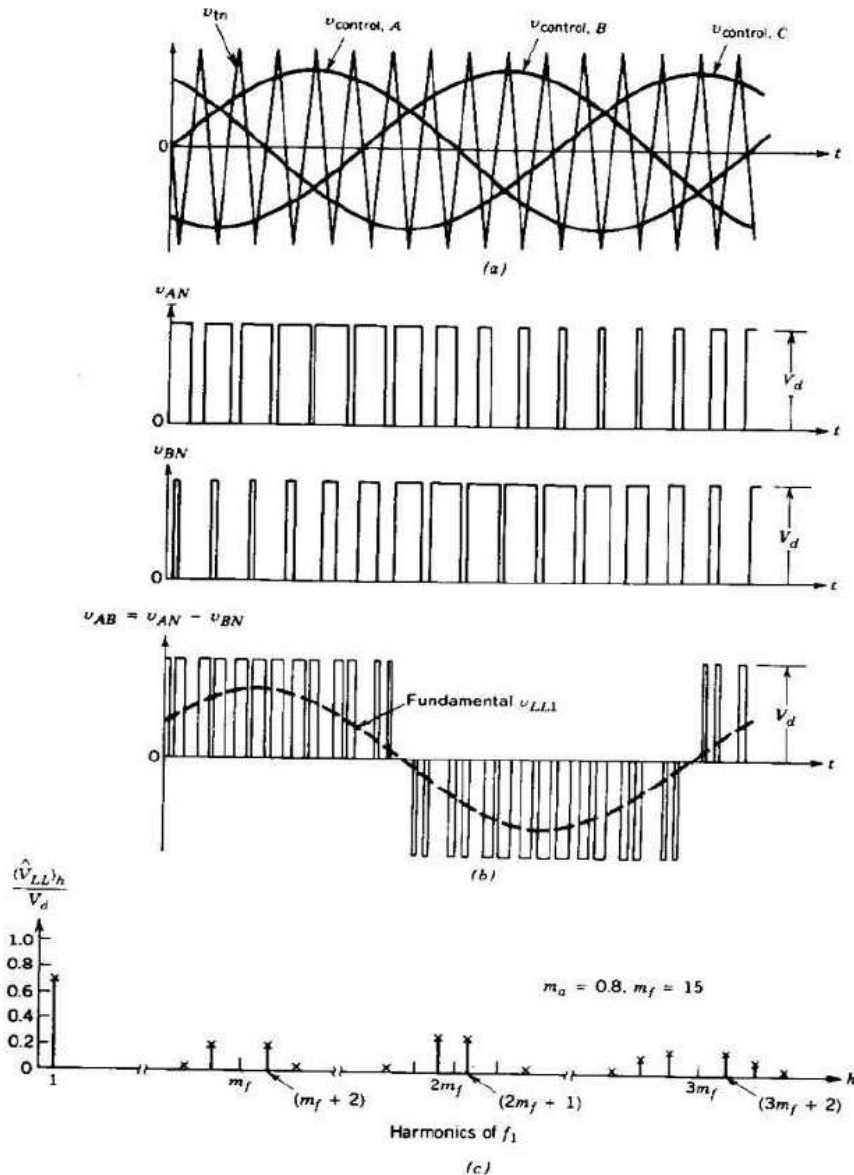
$$(V_{AN})_1 = m_a \frac{V_s}{2} \quad (5.1)$$

O ideal é que a frequência da onda triangular seja pelo menos 20 vezes maior que a máxima frequência da onda de referência, de modo a ter uma reprodução aceitável da forma de onda (17).

A fim de garantir mais robustez ao controle da tensão de saída, que pode sofrer distúrbios de grandes variações da rede elétrica, é possível também controlar a corrente do inversor. Será analisado aqui o controle de corrente *fixed-frequency*, mostrado na Figura 22. Primeiramente, o erro entre a corrente de referência e a corrente atual é amplificado pelo controlador PI. A saída $V_{control}$ é comparada à onda triangular com frequência fixa para acionar os transistores. Um erro positivo e, portanto, um sinal $V_{control}$ positivo, resultará em uma saída maior, levando assim a

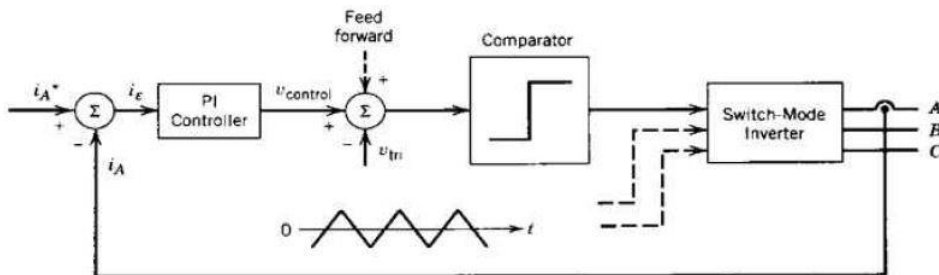
corrente I_A para seu valor de referência. Às vezes a tensão da carga pode ser utilizada como compensador *feedforward*, que também será utilizado neste projeto.

Figura 21 - Formas de onda SPWM trifásico e espectro harmônico.



Fonte: Mohan (16).

Figura 22 - Controle de corrente fixed-frequency



Fonte: Mohan (16).

3.4 MPPT

Conforme será demonstrado nas próximas seções, o ponto de máxima potência de um painel fotovoltaico não é estático. A tensão e a corrente necessárias para alcançar este ponto são sempre diferentes, portanto um inversor que baseia sua referência em um destes dois valores, precisa de um dispositivo capaz de alterá-lo em tempo real. Existem vários métodos de realização para o MPPT, com níveis de complexidade e precisão variáveis. Para este projeto foi escolhido o método P&O (perturba e observa), devido à sua simplicidade conceitual e de implementação.

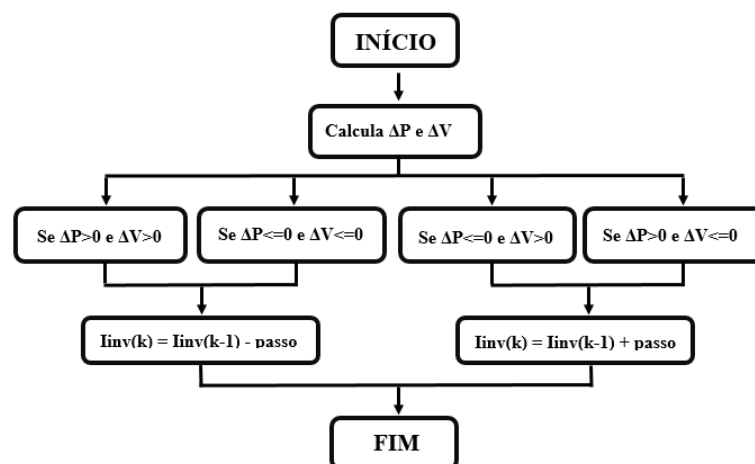
O dispositivo analisa de forma contínua e constante a diferença de potência e de tensão instantâneas de saída do inversor. Conhecendo o comportamento das curvas P-V e I-V do painel, ele muda a referência da corrente do inversor com uma amplitude definida, de modo a buscar um ponto melhor na mesma (Figura 23).

Há 4 casos principais definidos no MPPT:

- $\Delta P > 0$ e $\Delta V > 0$: diminui-se a referência de corrente;
- $\Delta P \leq 0$ e $\Delta V \leq 0$: diminui-se a referência de corrente;
- $\Delta P \leq 0$ e $\Delta V > 0$: aumenta-se a referência de corrente;
- $\Delta P > 0$ e $\Delta V \leq 0$: aumenta-se a referência de corrente.

O ponto negativo deste sistema é que mesmo quando é atingida a potência máxima o código continua atuando. Como consequência, há uma oscilação da potência de saída e uma ligeira perda de eficiência.

Figura 23 - Fluxograma do algoritmo P&O



Fonte: Produção do próprio autor.

4 SIMULAÇÃO

4.1 O Projeto

Neste capítulo será apresentada a simulação, em ambiente Simulink, da planta fotovoltaica. Este projeto é constituído por:

- Gerador Fotovoltaico de 73.950Wp
- Conversor CC-CC *Buck* com saída de 600V
- Inversor trifásico de meia-ponte ligado à rede de 220V (fase-fase)
- MPPT com método perturba&observa
- Carga de 100kW

4.2 O Gerador fotovoltaico

Para compor o gerador fotovoltaico, foi escolhido o painel Canadian Solar CS6P-255P de 255Wp, devido ao fato de ser presente em grande quantidade no mercado. A Tabela 7 resume as suas características elétricas.

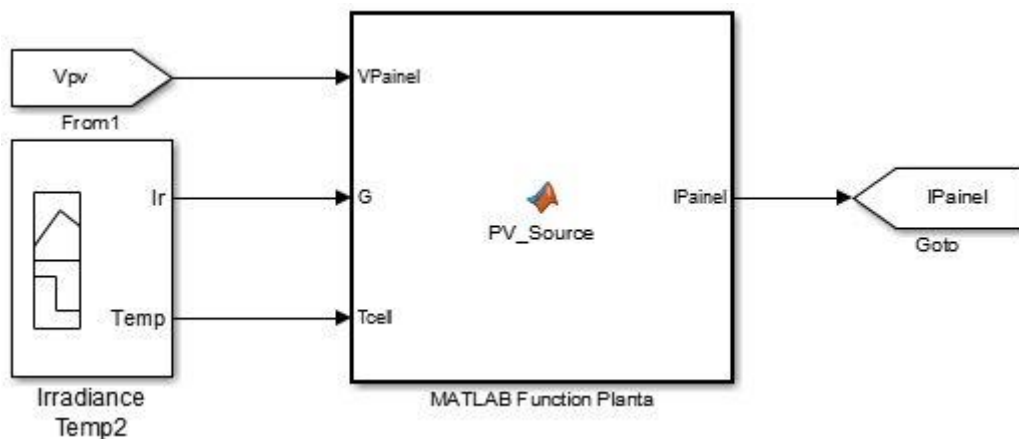
Tabela 7 – Características elétricas do módulo CS6P-255P

Características Elétricas	Canadian CS6P-255P
Potência máxima	255W
Tensão na Pmax	30,2V
Corrente na Pmax	8,43A
Corrente de curto circuito	9,00A
Tensão de circuito aberto	37,4V
Coeficiente de temperatura Isc	0,065%/°C
Coeficiente de temperatura Voc	-0,34%/°C
NOCT	45°C
Número de células em série	60

Fonte: Produção do próprio autor. Baseado no datasheet da Canadian Solar.

Existem basicamente dois modos para simular o painel fotovoltaico no Simulink: a primeira alternativa consiste em criar manualmente uma estrutura de blocos que atenda a formulação dada na Seção 3.1. A outra, que foi a escolhida, consiste na utilização do bloco de funções, onde é executada uma rotina criada no Matlab que reproduz todas as equações previamente mostradas. Este bloco, apresentado na Figura 24, é atualizado no mesmo período de amostragem de todo o sistema, $5\mu\text{s}$. Percebe-se também o funcionamento da rotina executada: o código recebe os dados de temperatura e irradiação, e utiliza a tensão do próprio painel como *input*. A saída é dada pela corrente do mesmo.

Figura 24 - Bloco de função do gerador fotovoltaico



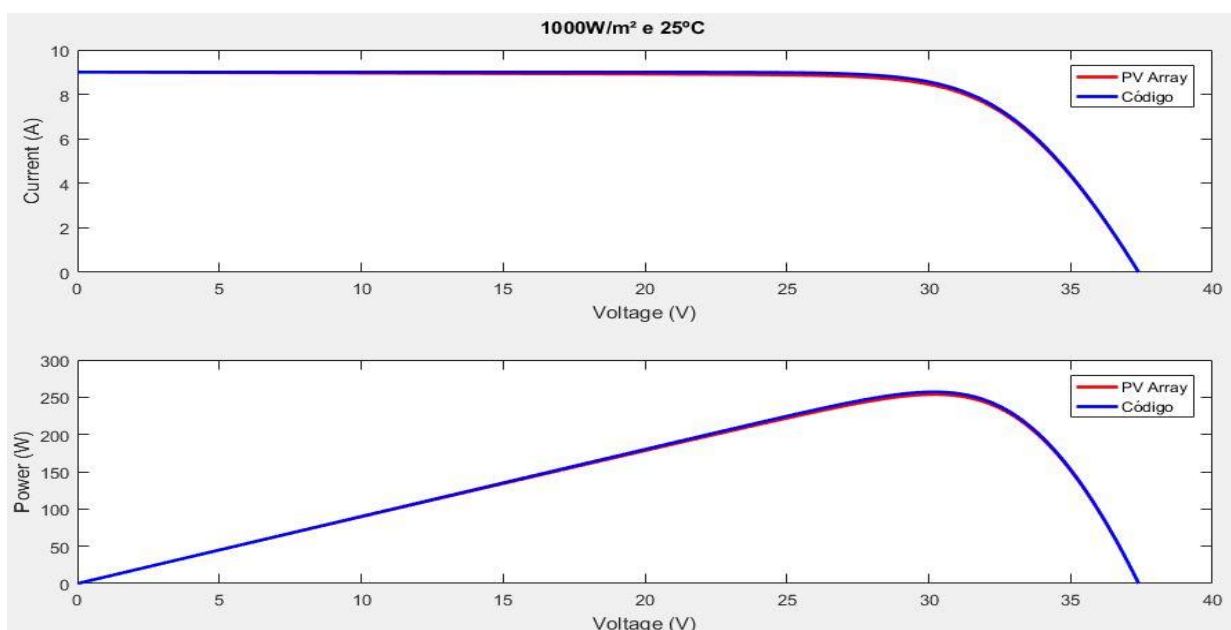
Fonte: Produção do próprio autor.

O código reproduz de forma fiel todos os passos mostrados, até chegar na condição de determinar a corrente da célula. Os termos I_d e I_{sh} dependem da resposta, tornando a Equação não linear. Para resolver este inconveniente, utiliza-se o método de Newton-Raphson de modo a encontrar as raízes, conforme a Equação abaixo:

$$x_{n+1} = x - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (6.1)$$

A seguir, será analisada a curva I-V da célula fotovoltaica, que como já foi antecipado, será comparada com a curva gerada pelo bloco “PV Array” do Simulink, que já contém os dados do painel utilizado. Para tal, serão utilizadas as condições de potência de pico (Figura 25).

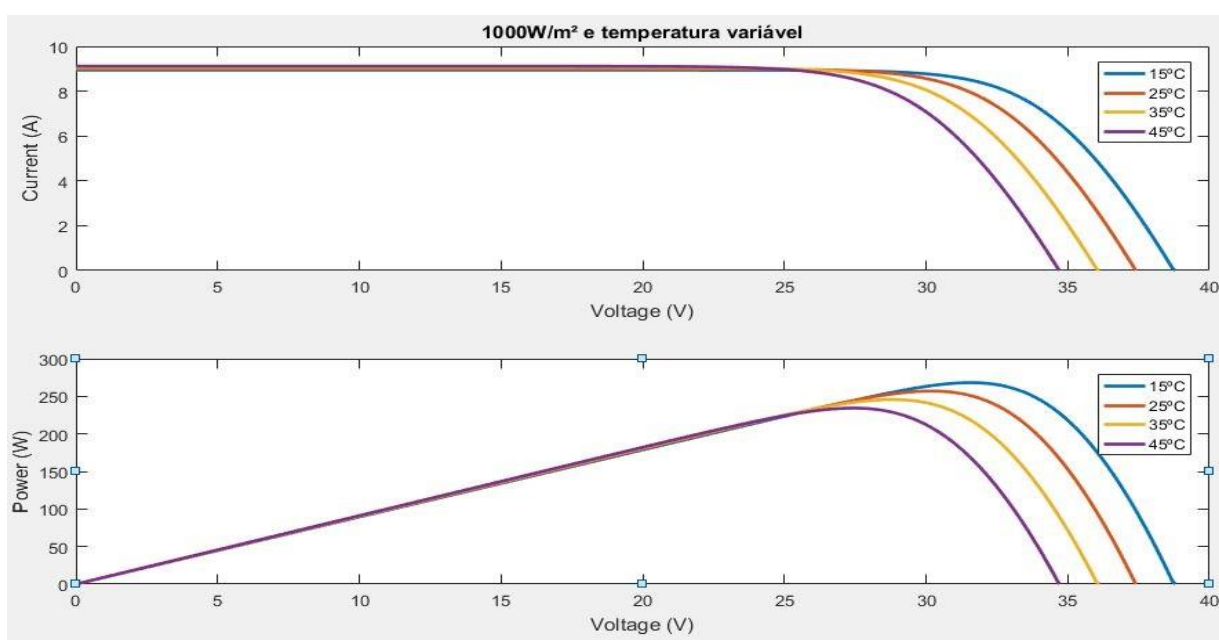
Figura 25 - Curvas I-V e P-V do painel (condições STC)



Fonte: Produção do próprio autor.

Percebe-se uma boa precisão, com erro da ordem de 1W, dentro do que pode ser considerada uma margem segura. É interessante notar que o aumento de temperatura da célula, mantendo constante a radiação solar, comporta um pequeno aumento da corrente, contraposto a uma grande diminuição da tensão, que acaba causando perda de potência (Figura 26).

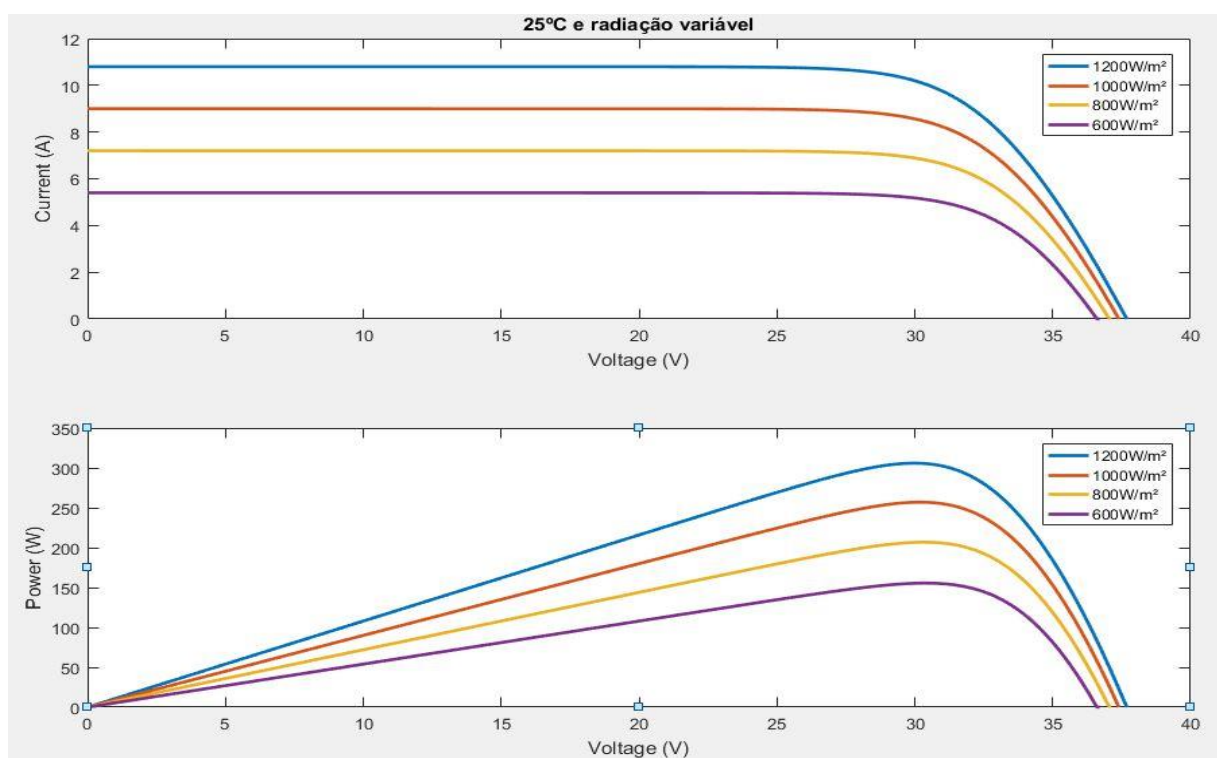
Figura 26 - Curvas I-V e P-V do painel (1000W/m² e temperatura variável)



Fonte: Produção do próprio autor.

Por outro lado, mantendo a temperatura da célula constante e diminuindo a insolação, temos uma diminuição proporcional da corrente gerada (Figura 27). Este comportamento também é percebido claramente pelas fórmulas utilizadas na modelagem, confirmando os resultados.

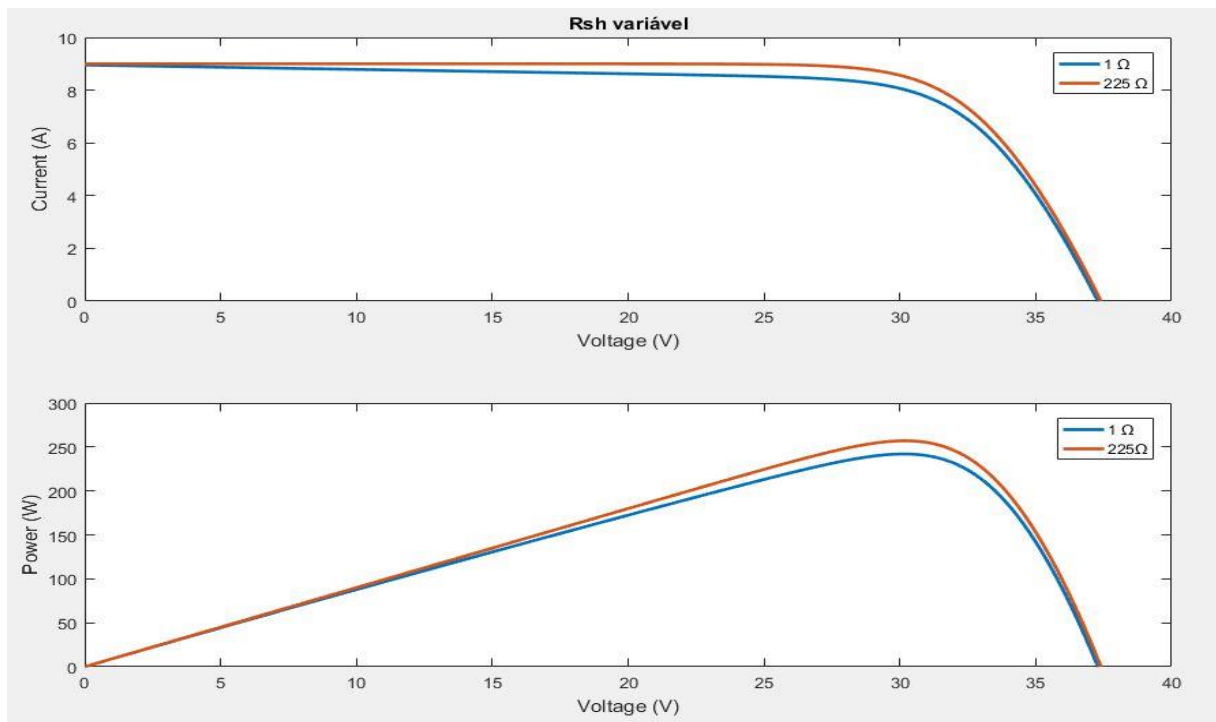
Figura 27 - Curvas I-V e P-V com 25°C e radiação variável



Fonte: Produção do próprio autor.

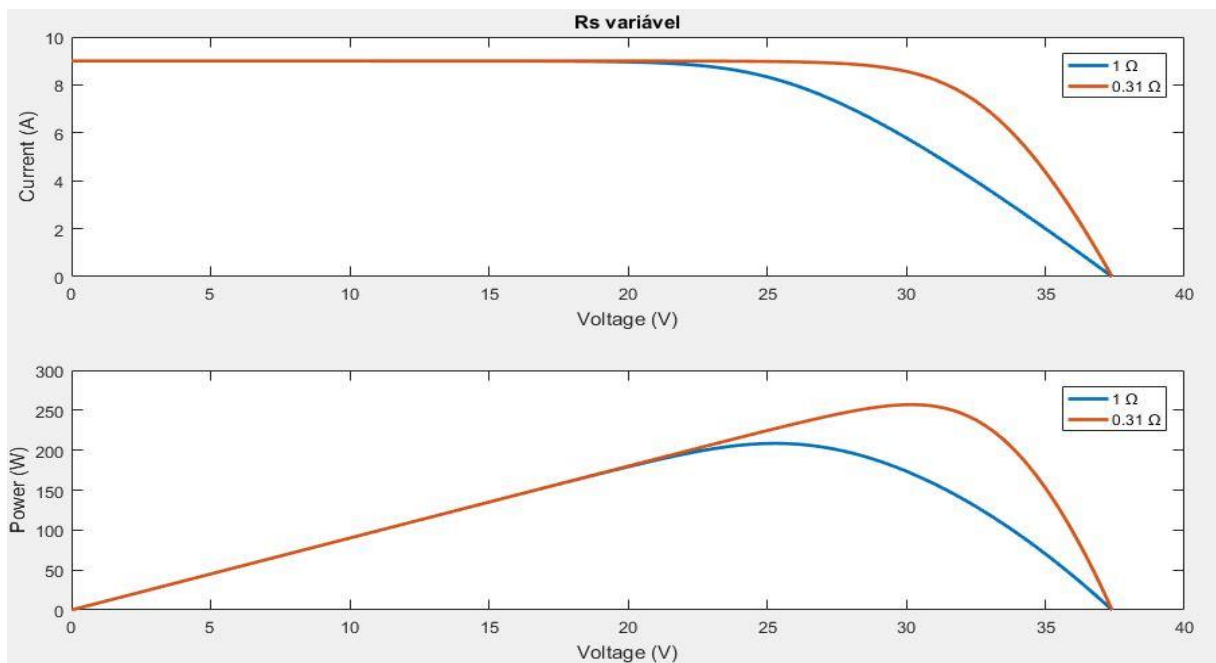
A seguir, será analisado o comportamento das curvas I-V e P-V quando há uma variação de R_s e R_{sh} . Conceitualmente, ambas são resistências que diminuem a eficiência de conversão energética da célula. Sendo R_{sh} uma resistência paralela, causadora de correntes parasitas, é de se esperar que uma diminuição da sua magnitude diminua a potência máxima produzida, pois uma maior parcela da corrente vai utilizá-la como caminho preferencial. Já R_s , por ser uma resistência série, vai causar uma queda de tensão proporcional à sua magnitude. Nas imagens a seguir (Figura 28 e Figura 29) podemos confirmar este comportamento. Vale lembrar que os valores corretos obtidos para R_s e R_{sh} , válidos para este painel, são $0,31\Omega$ e 255Ω , respectivamente. Os outros valores estão sendo apresentados para demonstrar o efeito.

Figura 28 - Curvas I-V e P-V com Rsh variável



Fonte: Produção do próprio autor.

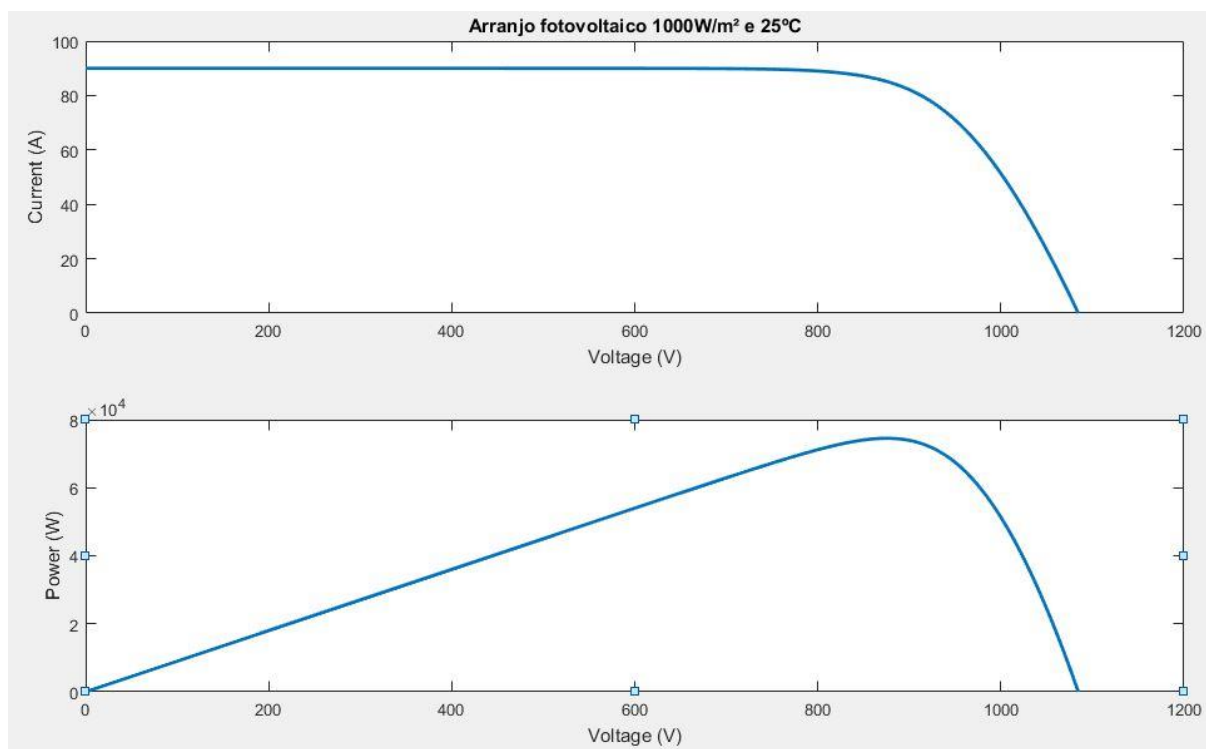
Figura 29 - Curvas I-V e P-V com Rs variável



Fonte: Produção do próprio autor.

Por fim, obtidos os valores de um único painel, foi criado o arranjo fotovoltaico, de modo a obter os 73.950Wp. Utilizando os conceitos da Seção 3.1, o projeto contempla 29 painéis em série e 10 painéis em paralelo. Deste modo, a tensão de operação do conjunto foi aumentada 29 vezes, enquanto a corrente gerada é multiplicada por 10. A Figura 30 mostra as curvas I-V e P-V do arranjo.

Figura 30 - Curvas I-V e P-V do arranjo fotovoltaico



Fonte: Produção do próprio autor.

4.3 O Conversor Buck

A primeira etapa necessária foi o dimensionamento dos componentes do conversor *Buck*. Sabendo-se que a tensão de circuito aberto do painel é de 37,4V, foi calculada uma tensão máxima de 1084,6V para o arranjo, multiplicando o valor pelo número de painéis em série. Sabendo-se que a tensão de saída é 600V, obtemos:

$$D = \frac{V_0}{V_d} = \frac{600}{1184,6} = 0,5535$$

$$R = \frac{V_0^2}{P} = \frac{360.000}{73.950} = 4,87\Omega$$

Deste modo, escolhendo uma frequência de comutação dos transistores de 20.000Hz, podemos calcular a indutância mínima para manter o conversor em MCC, utilizando a Equação (4.6):

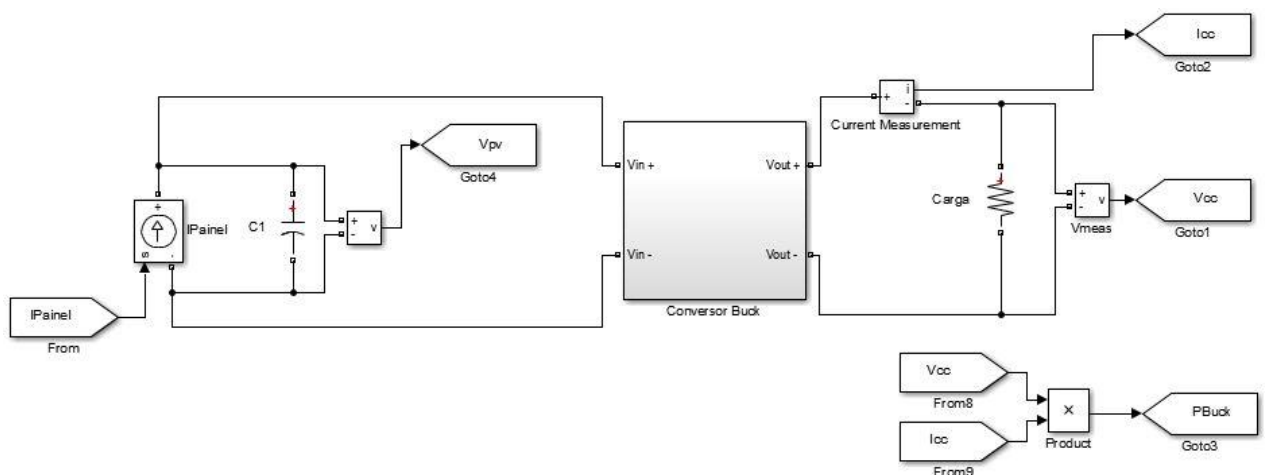
$$L_{Bmin} = \frac{(1 - D) \cdot R}{2f} = 54 * 10^{-6} H$$

Sendo permitido o uso de indutores maiores, foi escolhida uma indutância de $60 * 10^{-6} H$. O passo seguinte foi dimensionar o valor mínimo do capacitor do conversor, utilizando a Equação (4.10), tendo escolhido para o projeto uma variação de tensão da ordem de 1V:

$$C_{0min} = \frac{V_0 \cdot (1 - D) \cdot \tau^2}{8 \cdot L \cdot \Delta V_0} = 1.395 * 10^{-3} F$$

Também neste caso, foi escolhido um valor um pouco maior, $1.56 * 10^{-3} F$. O passo seguinte, foi montar o circuito do conversor *Buck* no Simulink, utilizando os valores obtidos acima. Figura 31 descreve o sistema como um todo, onde o *Buck* é apenas uma caixa que contém o circuito. Pode-se notar que para fazer a realimentação do gerador foi utilizado um capacitor de 50uF, de modo que a corrente de saída do painel gere uma tensão que será utilizada como *input* para o código. A utilização do mesmo, que em um sistema real não existe, tornou-se obrigatória para evitar que a fonte de tensão do modelo fique em série com o indutor do *Buck* no momento em que a sua chave entra em condução.

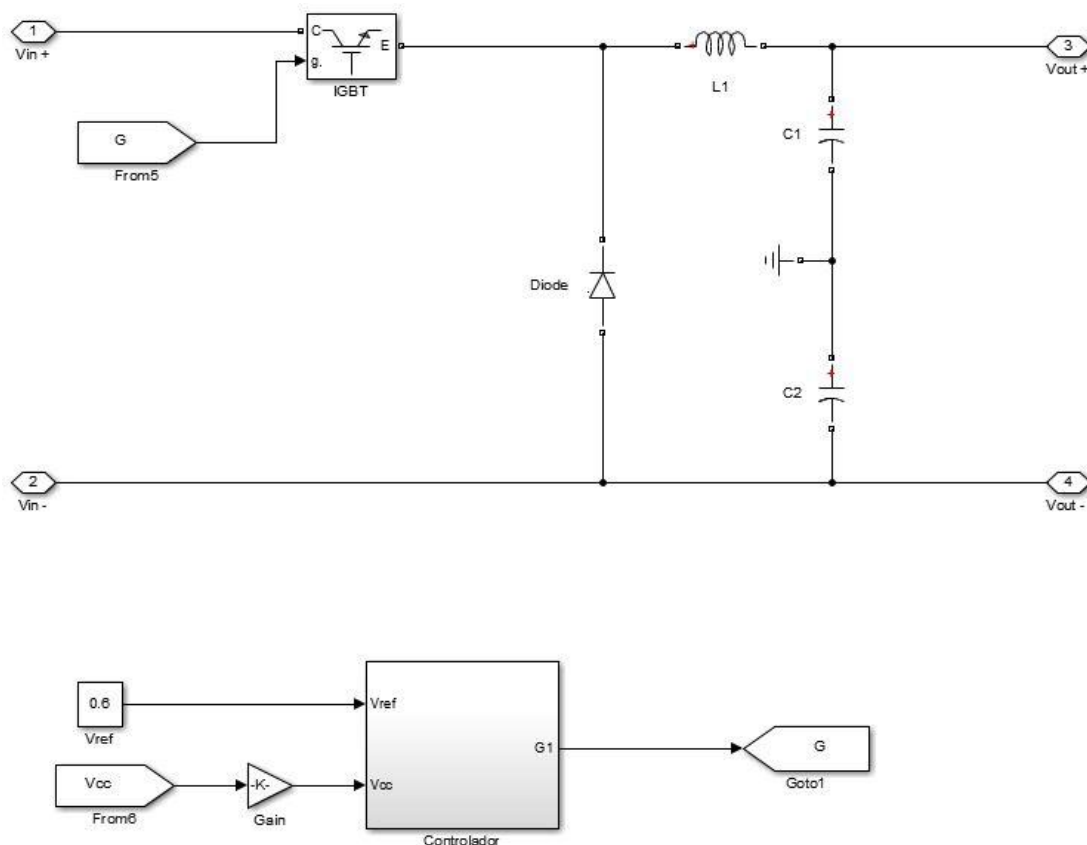
Figura 31 - Sistema com gerador, *Buck* e carga fixa



Fonte: Produção do próprio autor.

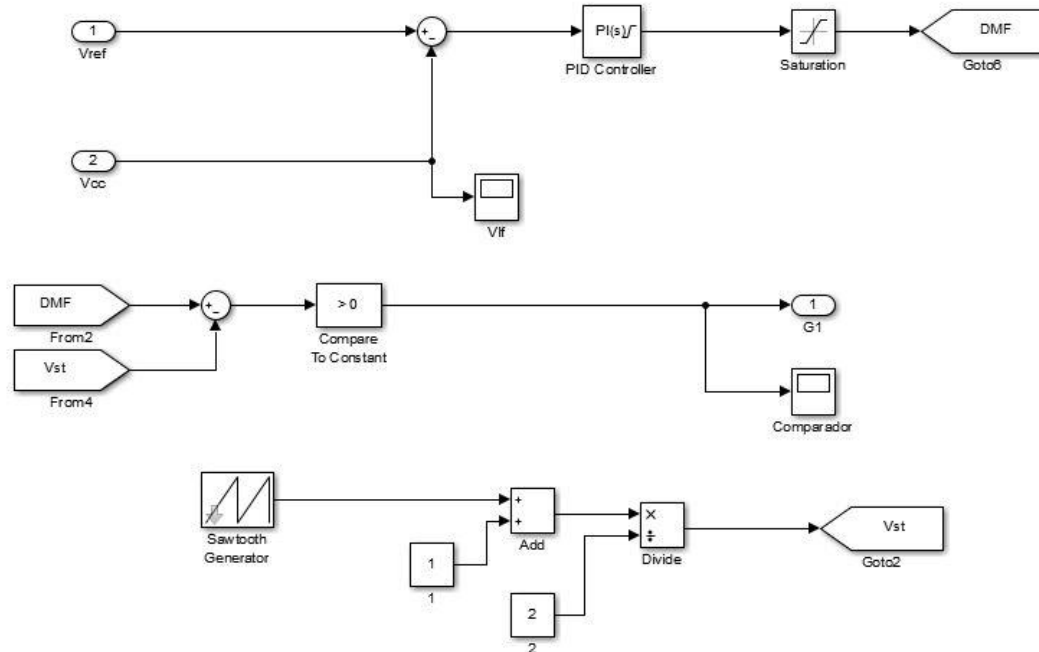
O circuito principal foi criado com base na descrição apresentada na Seção 3.2. Para executar o chaveamento, foi escolhido o bloco IGBT (Figura 32). Todos os componentes são reais, o que significa que possuem valores resistivos mesmo quando estão conduzindo.

Figura 32 - Circuito do conversor *Buck*



Fonte: Produção do próprio autor.

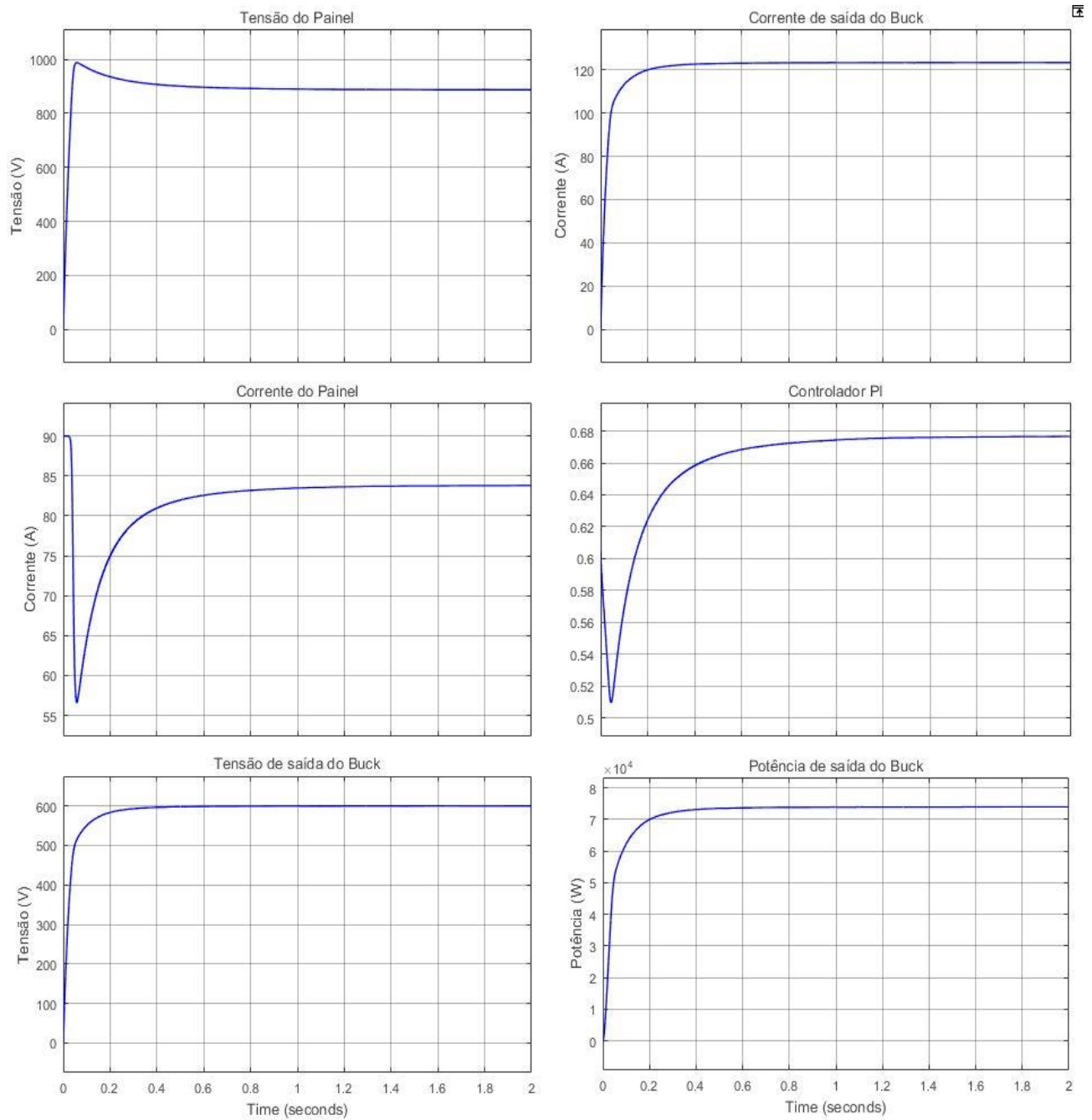
O último componente a ser apresentado é o controlador. Ele recebe o erro de tensão na entrada, e um controlador PI tenta manter o valor do erro num valor entre zero e um (Figura 33). Este valor é comparado com um sinal dente de serra, também variando entre zero e um com uma frequência de 20.000Hz, de modo a regular a condução do transistor e, portanto, a tensão de saída. Vale lembrar que não é objetivo deste trabalho encontrar a solução mais eficiente para o controlador, portanto foi apenas encontrado um valor que garantisse uma resposta satisfatória, sem outras otimizações.

Figura 33 - Controlador do conversor *Buck*

Fonte: Produção do próprio autor.

Por fim, com o circuito completo, foi executada a simulação relativa ao seu funcionamento. Foram utilizados os parâmetros STC para os painéis, de modo a forçá-los a fornecer a potência de pico, 73.950Wp a uma tensão de 875,8V. Na Figura 34, a seguir, pode-se notar que os valores foram alcançados. O pico de tensão inicial causa uma abrupta queda da corrente, que é recuperada graças ao trabalho do controlador. Ele mantém o erro de tensão entre zero e um, e permite o correto funcionamento do transistor, que consegue manter a tensão de saída de forma correta em 600V.

Figura 34 - Simulação do conversor Buck

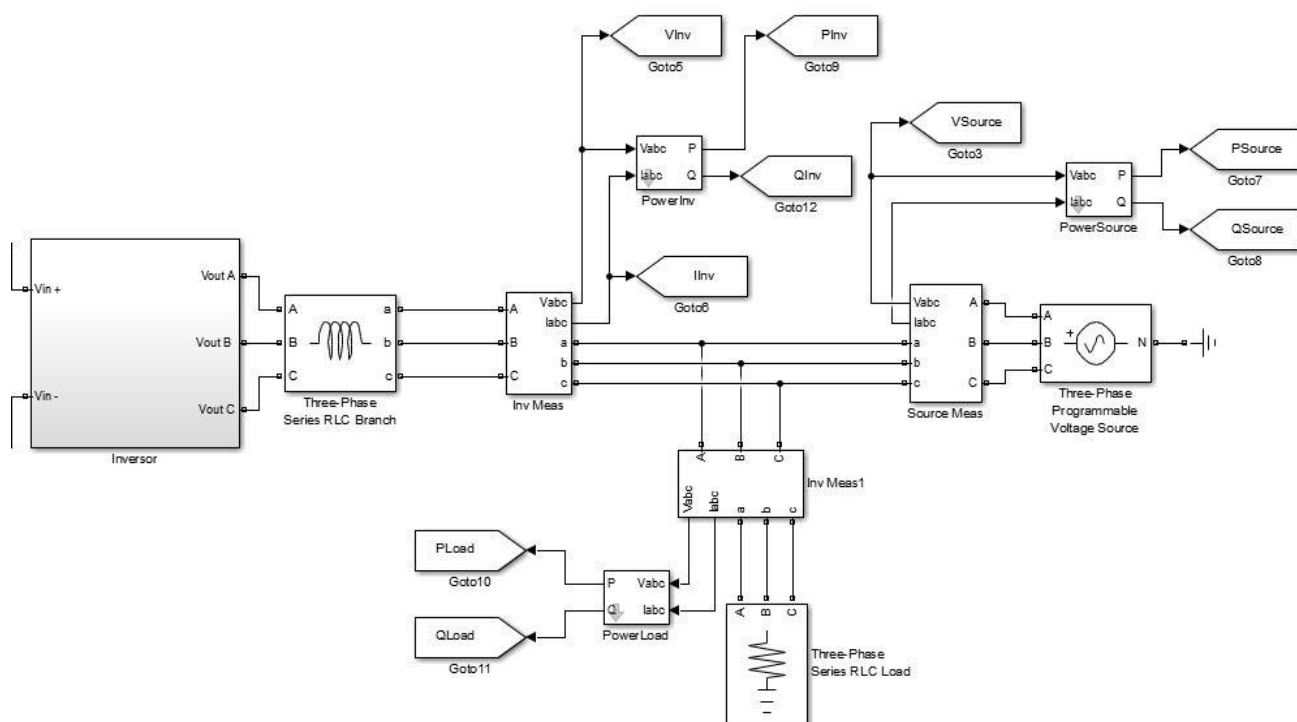


Fonte: Produção do próprio autor.

4.4 O Inversor

Para criar o circuito do inversor de frequência, o procedimento foi similar ao do controlador *Buck*. Primeiramente, foi decidida a conformação do sistema. Para simular a rede foi utilizada uma fonte trifásica de 220V (fase-fase), 60Hz e perfeitamente equilibrada, com uma iniciação suave em rampa com 0,05s de duração. A sua função é fornecer a potência necessária a completar os 100kW da carga, além de servir como referência para o inversor. A carga é puramente resistiva, de valor 100kW, e está ligada tanto à rede quanto ao terminal do inversor, de modo a receber potência das duas fontes. A Figura 35 mostra o esquema do sistema, com o inversor representado por uma caixa, que está diretamente ligada à saída do conversor *Buck*.

Figura 35 - Sistema com o inversor, a rede elétrica e a carga

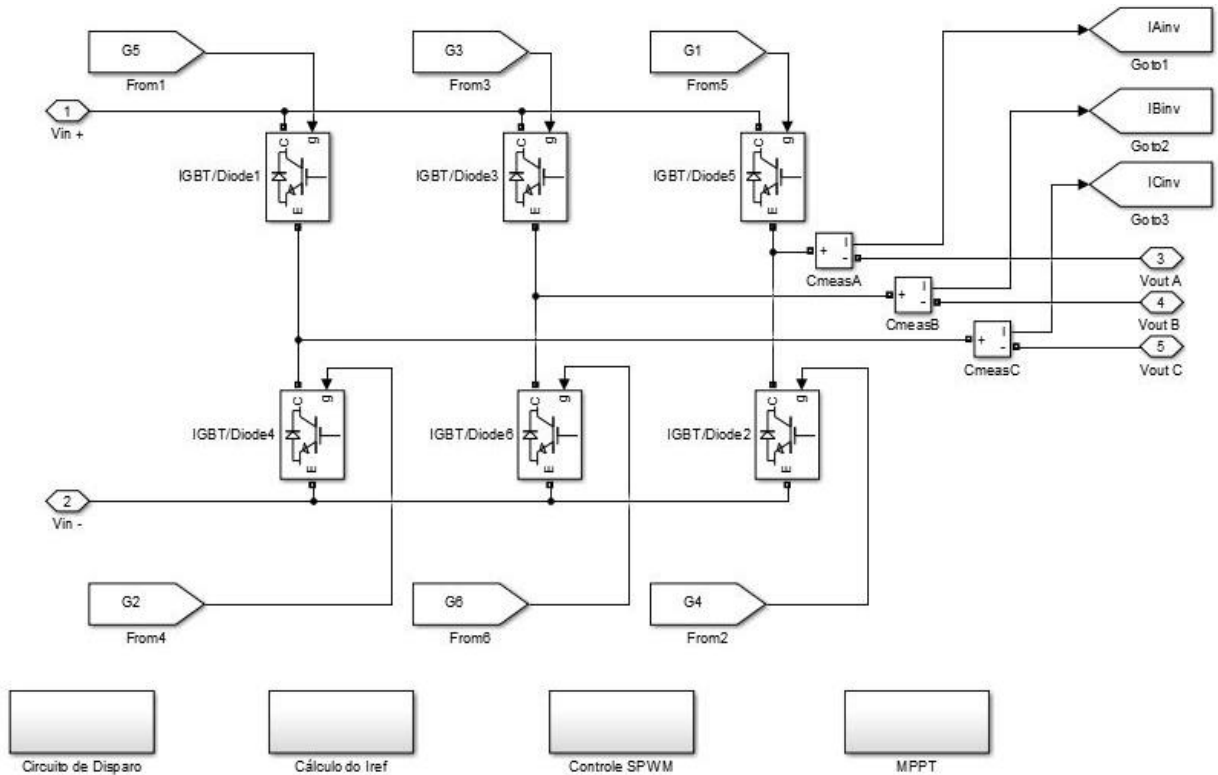


Fonte: Produção do próprio autor.

Em seguida, foi criado o circuito do inversor com base no modelo apresentado na Seção 3.3. De forma análoga ao conversor *Buck*, para a função de chaveamento, foram utilizados 6 blocos IGBT/Diode. Eles são acionados conforme ordenado pelo

circuito de disparo, de modo a modular as formas de onda de saída (Figura 36). Os contatos de entrada e saída são contatos elétricos, portanto conectáveis aos terminais dos demais dispositivos.

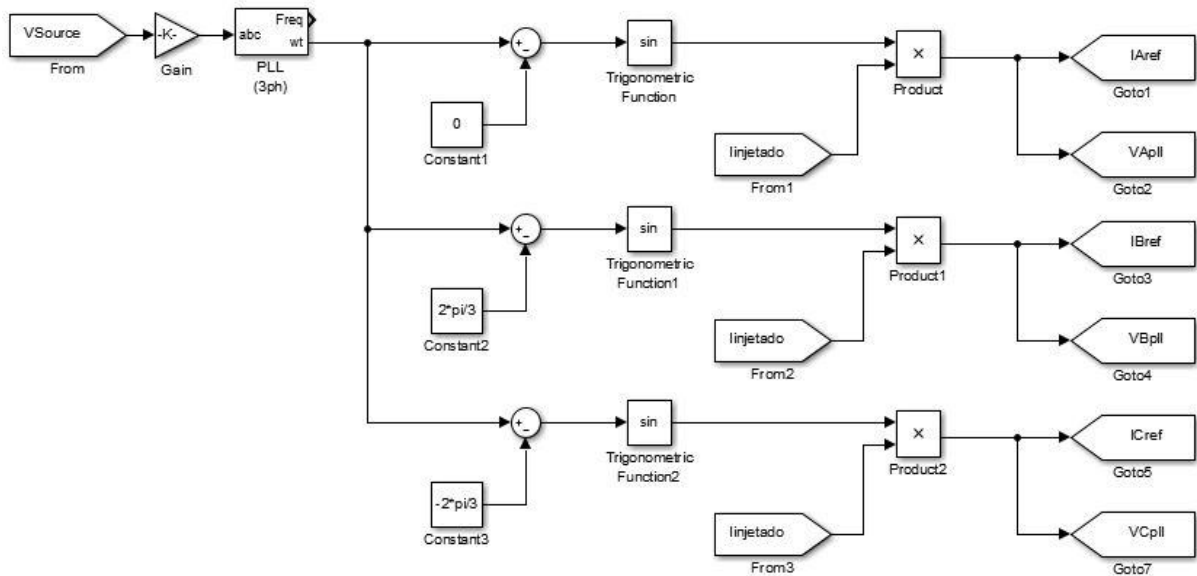
Figura 36 - Circuito do inversor de meia ponte



Fonte: Produção do próprio autor.

A etapa seguinte foi construir o circuito responsável pelo cálculo da corrente de referência (Figura 37). A entrada é constituída pelo sinal de tensão da rede, que passa por um PLL que tem como objetivo obter o seu ângulo de uma de suas fases. A seguir, este ângulo é dividido em três sinais, deslocado de 0° , 120° e -120° e é multiplicado pelo sinal de referência de corrente, que provém do MPPT. Os três sinais obtidos são as correntes de referência do inversor, que determinarão a potência de saída.

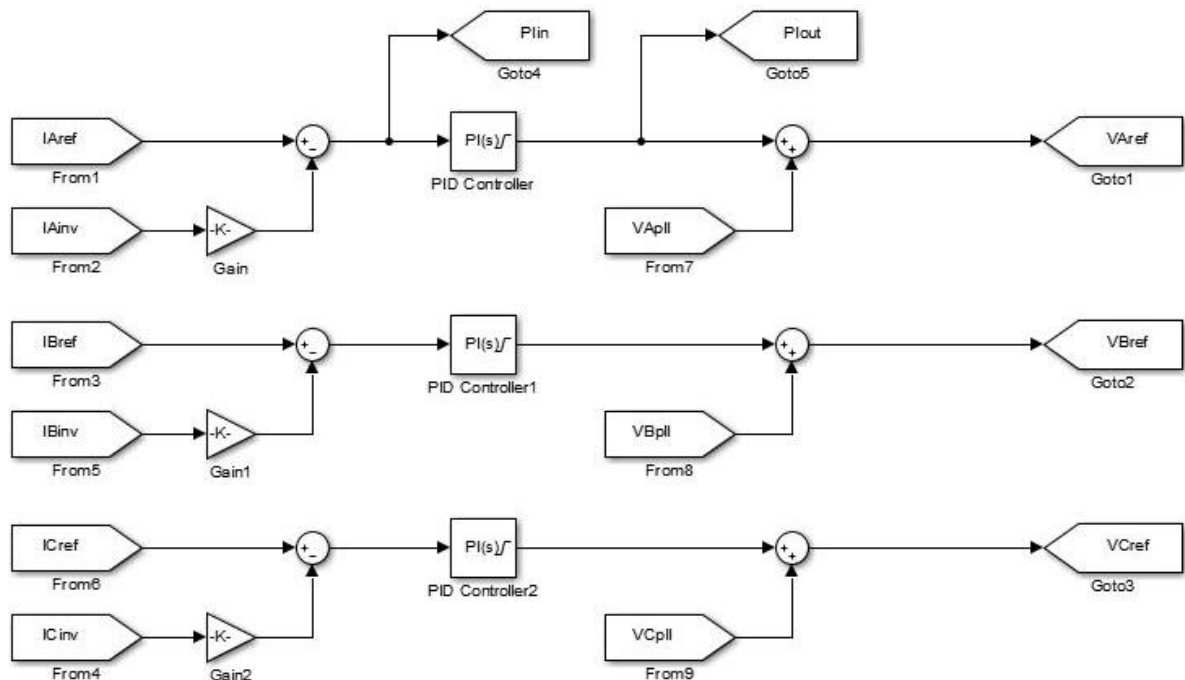
Figura 37 - Circuito para cálculo da corrente de referência



Fonte: Produção do próprio autor.

A corrente de referência é comparada com a corrente de saída do inversor, e o erro é tratado por um controlador PI. Como no caso do conversor *Buck*, o controlador não foi projetado visando a máxima eficiência, mas somente um resultado satisfatório. A saída do PI é realimentada em *feedforward*, de modo a compensar variações abruptas (Figura 38). O sinal obtido será enviado ao circuito de disparo.

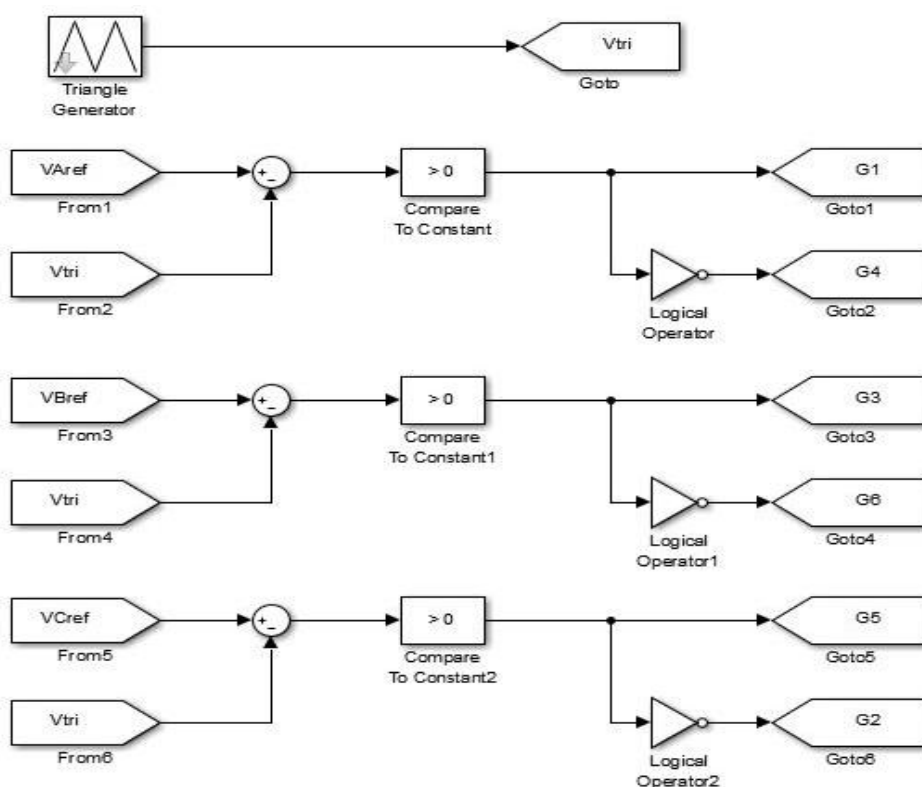
Figura 38 - Controlador PI com *feedforward*



Fonte: Produção do próprio autor.

O circuito de disparo recebe o sinal senoidal do controlador PI, que tem amplitude entre -1 e 1, e o compara com uma onda triangular de mesma amplitude máxima. Um operador lógico impede que os dois transistores da mesma fase entrem em modo de condução simultaneamente, causando um curto circuito (Figura 39).

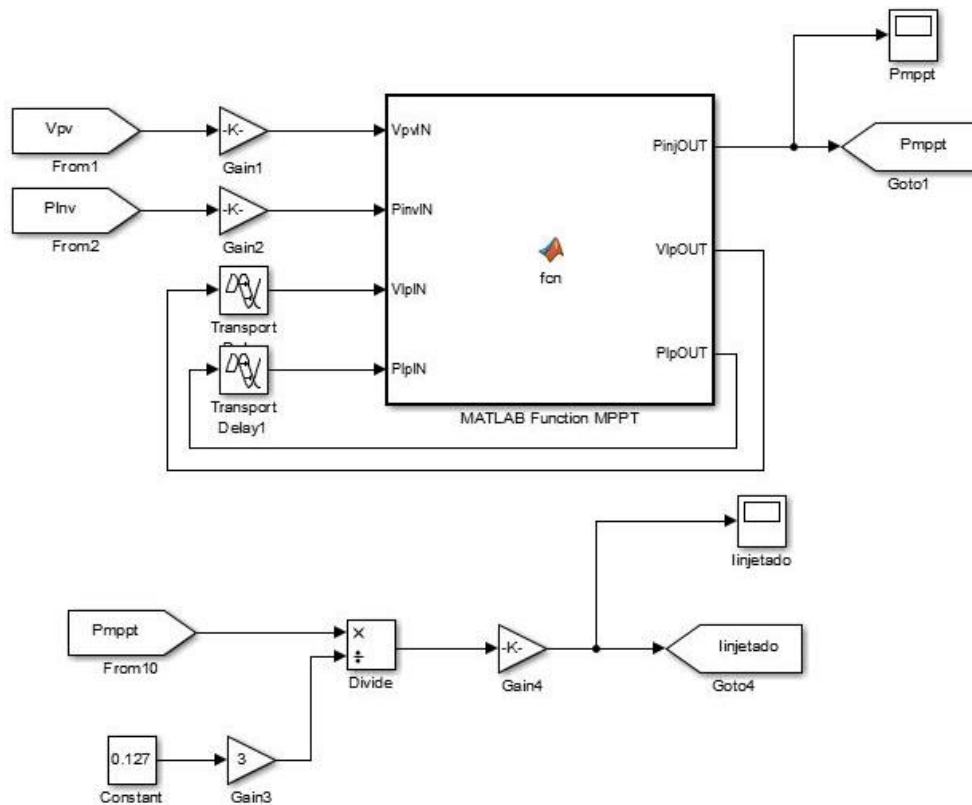
Figura 39 - Circuito de disparo do inversor



Fonte: Produção do próprio autor.

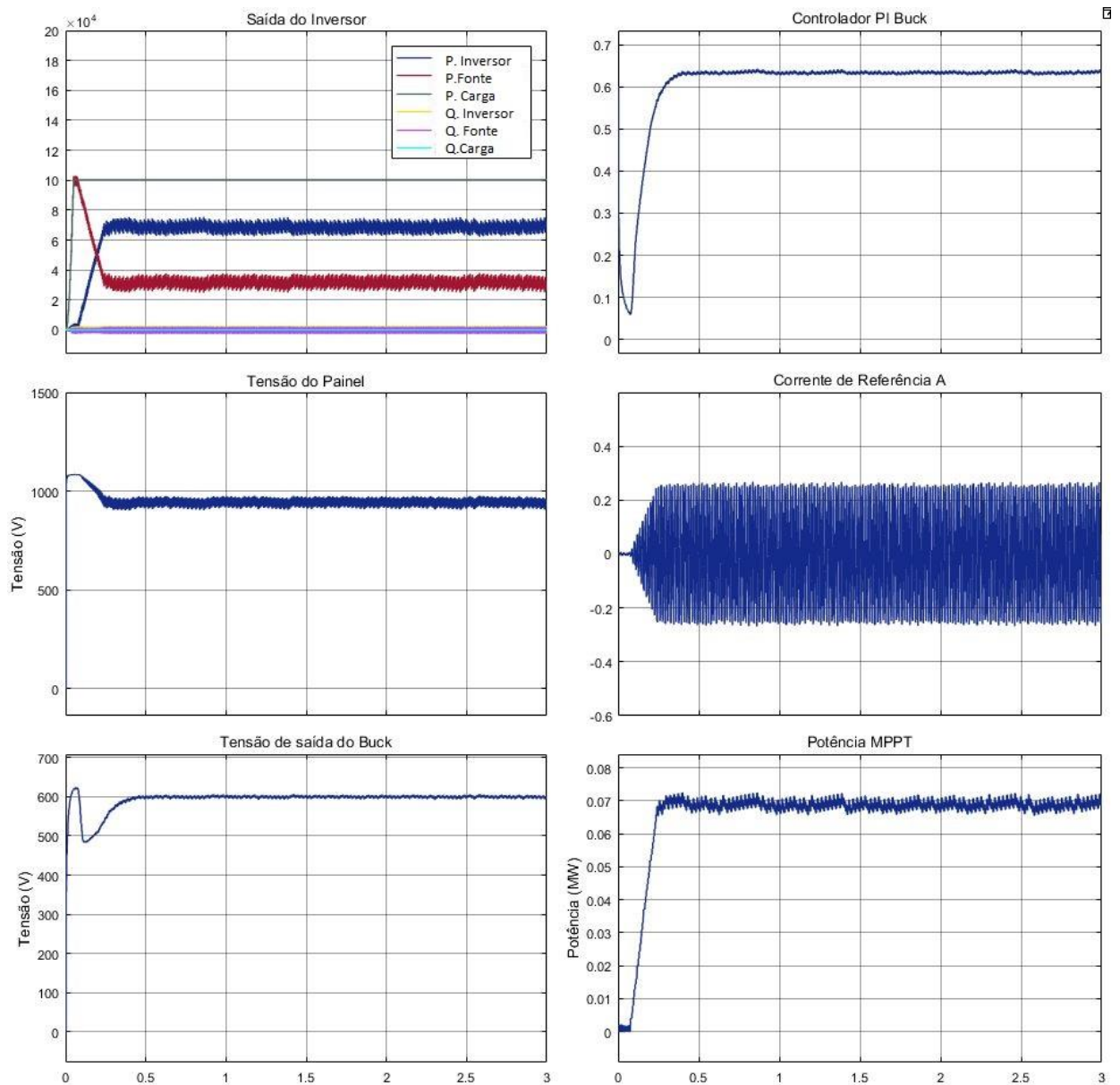
Foram inicialmente feitos testes com a referência de corrente constante, de modo a verificar o funcionamento do sistema como um todo. Após esta etapa, foi utilizado um bloco de funções do Matlab, de forma similar ao arranjo fotovoltaico, onde foi programado o MPPT seguindo o fluxograma apresentado na Seção 3.4. Como ele recebe um valor de tensão e de potência, a saída do bloco é formada pelos dois sinais antigos, que posteriormente serão a nova referência, e pelo novo sinal de potência. Um circuito matemático divide o valor pela tensão nominal da rede para obter a corrente (Figura 40). Vale lembrar que o MPPT precisa ser atualizado com uma frequência maior que os 60Hz da rede, mas ao mesmo tempo não pode ser alta demais para não amplificar qualquer variação de tensão ou potência. Foi escolhida uma frequência de operação de 200Hz.

Figura 40 - Bloco MPPT



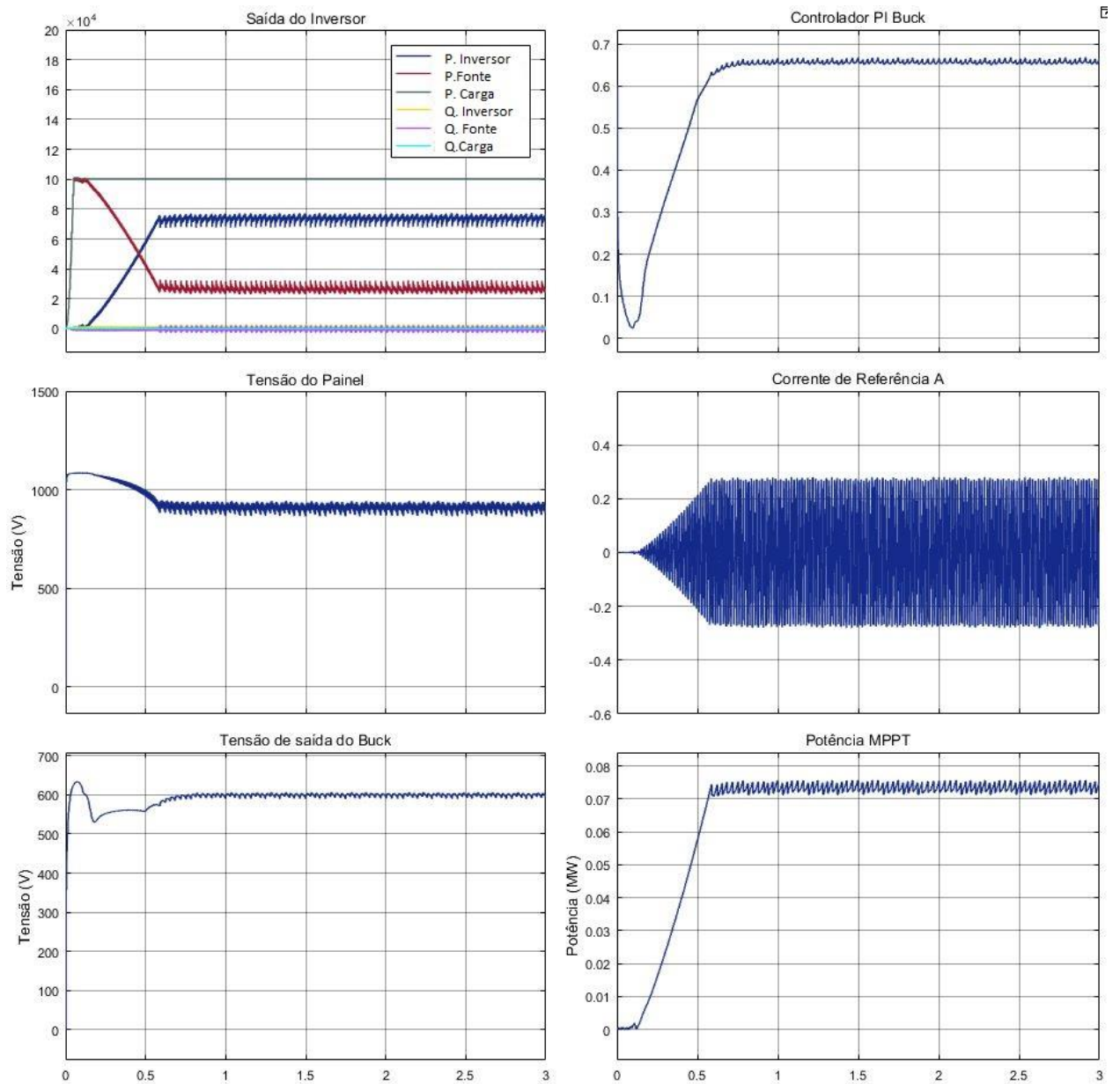
Fonte: Produção do próprio autor.

Com todos os dispositivos prontos, foi executada a simulação do projeto. Foram feitos dois testes com os parâmetros STC, de forma similar ao que foi feito com o conversor *Buck*, de modo a tirar a máxima potência do arranjo. O primeiro teste foi executado com o *step* do MPPT em 2kW, enquanto o segundo com um *step* menor, de 0,5kW (Figura 41 e Figura 42). As diferenças são claras: um salto maior garante uma resposta mais rápida, mas ao mesmo tempo causa uma maior oscilação na potência de saída. Inclusive no caso do salto mais acentuado, devido à oscilação, o MPPT não garante a mesma eficiência, entregando apenas 70kW contra os 72,5kW do *step* menor.

Figura 41 - Teste do projeto com *step* de 2kW

Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 42 - Teste do projeto com step 0,5kW



Fonte: Produção do próprio autor.

5 ANÁLISE ECONÔMICO-FINANCEIRA

Neste capítulo será feita a avaliação econômico-financeira deste projeto, que beneficia condomínios de casas e apartamentos. Devido ao alto custo das plantas fotovoltaicas de pequeno porte, este projeto visa a construção de uma planta de maiores proporções, 73.950Wp, para obter uma interessante redução de custo por economia de escala, posteriormente dividindo a energia produzida em 15 cotas de 4.930Wp. Para isso será utilizada a nova norma sobre empreendimentos com múltiplas unidades consumidoras, onde a planta é de responsabilidade do condomínio, que por contrato dividirá a energia produzida proporcionalmente.

A primeira coisa a ser avaliada, é o custo total da energia consumida na condição atual, ou seja, no Ambiente de Contratação Regulada. Para questões de padronização, foi utilizado um valor médio de impostos de 5% e 25% para PIS/COFINS e ICMS, respectivamente, o que resultou em 42,86% de impostos totais. A Tabela 8 apresenta os valores obtidos. Vale a pena lembrar que o objetivo deste projeto é aferir a viabilidade na baixa tensão, mas com os dados a seguir é simples fazer uma comparação com as demais classes de consumo.

Tabela 8 - Custo da energia consumida - EDP

Custo da energia consumida (EDP Escelsa – agosto 2015)		
Classe de Consumo	Sem impostos (R\$/MWh)	Com impostos (R\$/MWh)
B1	464,52	663,58
A4 Verde Fora Ponta	317,85	454,08
A4 Verde Ponta	1.426,47	2.037,85
A4 Azul Fora Ponta	317,85	454,08
A4 Azul Ponta	542,54	775,07

Fonte: Produção do próprio autor. Baseado em (10).

Para obter as informações necessárias sobre a produtividade do local, foram utilizados dados gentilmente fornecidos por um Professor do IFES, relativos a uma localidade do estado do Espírito Santo. Estes dados, que estão tabelados no anexo, foram colhidos durante 5 anos (de janeiro de 2010 até dezembro de 2014) e integralizados de hora em hora, formando um dia típico. Ou seja, cada mês possui 24 horas tabeladas que são a média de cada dia relativo ao mesmo, durante o período de 5 anos. Foi utilizada a simulação para cada um destes pontos, de modo a

obter a quantidade de energia produzida durante um ano. A Tabela 9 apresenta os dados obtidos.

Tabela 9 - Dados de produção mensal de energia elétrica fotovoltaica - ES

Energia produzida por mês no estado do ES		
Mês	Mensal (kWh)	Total (kWh)
Janeiro	12.282,49	
Fevereiro	11.229,24	
Março	9.882,08	
Abril	8.447,66	
Mai	7.515,40	
Junho	6.736,20	
Julho	7.080,37	110.901,29
Agosto	8.499,68	
Setembro	9.336,99	
Outubro	9.256,47	
Novembro	9.390,32	
Dezembro	11.244,39	

Fonte: Produção do próprio autor.

A planta consegue produzir, anualmente, 110.901,29kWh de energia elétrica, o que significa que cada uma das 15 cotas de 4930Wp produz cerca de 616kWh mensais. Um valor aceitável para um apartamento ou casa de classe média, mesmo usando aparelho de ar condicionado. O fator de capacidade da planta é dado por:

$$FC = \frac{110.901,29}{73,95 * 24 * 365} = 23,5\% \quad (7.1)$$

Para auxiliar nestes cálculos, uma empresa do ramo solar que atua em Vitória, ES, forneceu um preço aproximado de R\$7.000,00/kWp para uma solução deste porte, totalizando R\$ 569.415,00 para o inteiro projeto. Cada cota, portanto, teria um custo de R\$34.510,00. Vale lembrar que estas cotações são muito voláteis, pois os painéis são dolarizados. Deste modo, o preço fica sujeito ao câmbio.

Com a finalidade de determinar o custo real da energia produzida pela planta fotovoltaica, foi construída uma planilha no Excel, onde são colocados como *input* todos os dados da planta e os índices econômicos:

- Vida útil da planta: 25 anos
- Produtividade: 1499 kWh/kWp*Ano (obtida dividindo a produção anual pela potência do gerador)
- Potência instalada: 73,950kWp
- Inflação: 6,00% a.a. (lembrando que é uma média para 25 anos)
- Custo de capital: 5% a.a (valor real, sem inflação)
- Perda de eficiência dos painéis: 0,65% a.a
- Custo de manutenção: 1% do valor de investimento a.a
- Custo da planta: R\$569.415,00

A planilha executa uma rotina que, primeiramente, calcula o total de energia produzido a cada ano, durante o período de 25 anos. Em seguida, começa a computar os custos gerados pela planta. O primeiro é o próprio investimento inicial. Depois, pega o valor do investimento e calcula o ganho de capital devido aos juros bancários (formados por inflação e custo de capital) e também os coloca como custo. Isto deve ser feito, afinal este é um capital que está deixando de ser ganho, pois foi efetuado um investimento inicial. Por último, o custo de manutenção, sempre corrigido pela inflação.

No final, temos 25 anos de custos formando um fluxo de caixa, que será trazido a Valor Presente (19) para obter o custo total como se fosse pago inteiramente no período inicial. O último passo é dividir este valor monetário pelo montante de energia produzida, de modo a obter o seu real custo.

Com os dados colocados acima, obtemos um custo de R\$482,13/MWh. Um valor bem abaixo dos R\$663,58/MWh da distribuidora, que demonstra plena viabilidade do projeto e o torna extremamente interessante.

Para efeito de comparação, o livro *Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica* (31) apresenta uma Equação fechada para determinar o custo da energia elétrica:

$$C = \left[\frac{r \cdot (1 + r)^n}{(1 + r)^n - 1} + OM \right] \times \frac{Inv}{8,76 \cdot FC} \quad (7.2)$$

Onde:

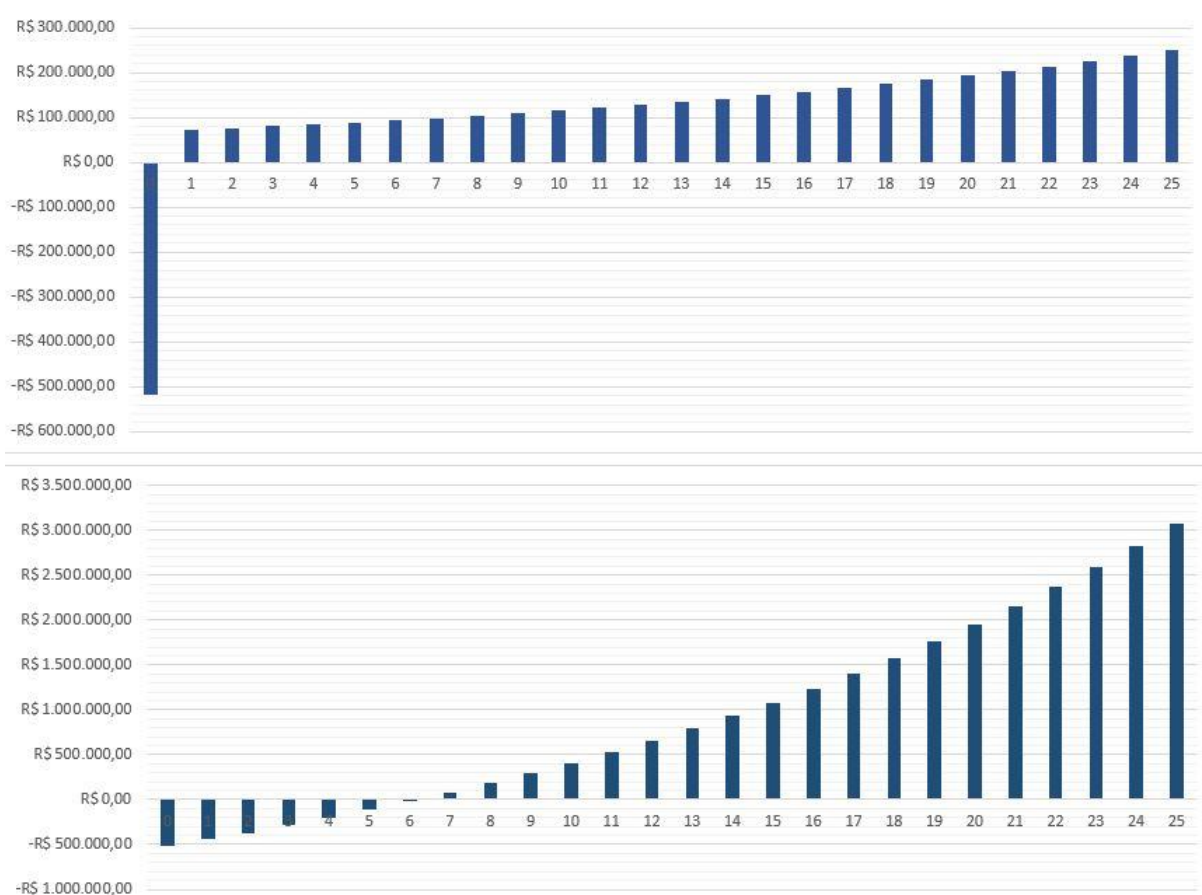
C	Custo da energia
r	Taxa de desconto anual
n	Tempo de vida útil
OM	Gastos com manutenção (%)
Inv	Investimento inicial (de 1kWp)
FC	Fator de capacidade

Utilizando os dados apresentados anteriormente, obtemos um custo de R\$456,35/MWh, que está relativamente próximo do valor encontrado. Foi realizada também outra planilha que simula de forma precisa o fluxo de caixa gerado por este projeto durante os 25 anos. Deste modo, é possível determinar três parâmetros importantes além do custo da energia:

- TIR (Taxa de Retorno): determina a rentabilidade percentual do projeto. Caso seja superior ao custo de capital, o retorno é positivo. Foi obtida uma TIR de 18,54%, um resultado muito satisfatório;
- VPL (Valor Presente Líquido): valor que representa o ganho monetário trazido a valor presente. Utiliza-se o custo de capital como taxa de referência, portanto o zero indica que não houve ganhos ou perdas. O VPL do projeto é de R\$346.521,82;
- Payback Simples: este valor representa o tempo necessário para que se pague o investimento. O Payback do projeto é 7 anos (Figura 43).

Conclui-se que o projeto é extremamente rentável e interessante em todos os seus aspectos econômicos. Isto se deve principalmente ao fato de que é um projeto de dimensões razoáveis, onde a economia de escala começa a ter efeito. Uma planta fotovoltaica de 4,930kWp, comprada singularmente, teria um custo aproximado entre R\$9.000,00 e R\$10.000,00/kWp, o que tira toda a atratividade até aqui encontrada.

Figura 43 - Fluxo de caixa simples e acumulado



Fonte: Produção do próprio autor.

6 CONCLUSÕES

Com o atual cenário de crise energética, encontrar soluções que permitam adquirir energia a um custo menor é primordial. As vezes só é preciso um pouco de criatividade para encontrá-las. A princípio comprar e instalar uma planta fotovoltaica de pequenas dimensões pode parecer algo inviável (e de certa forma, ainda é), mas utilizando a legislação a próprio favor é possível ganhar benefícios relativos a cooperativas, como no caso das cotas em um condomínio. Deste modo a tecnologia não só fica viável, mas se transforma em um verdadeiro investimento com rentabilidade muito superior a qualquer aplicação bancária. Desta possibilidade surgiu o propósito do projeto, que aliou a análise econômica à uma discussão de teor técnico.

Trazer o conhecimento teórico para uma simulação foi um desafio, pois induz a ter pleno domínio sobre a plataforma de software, com todas as suas particularidades e sua rotina de funcionamento. Os resultados obtidos no âmbito técnico podem ser considerados satisfatórios, pois cumpriram os objetivos estipulados para este projeto. A análise da legislação trouxe uma visão clara do Ambiente de Contratação Regulada, assim como as possibilidades oferecidas pela geração distribuída. A REN Nº 687 é um claro passo na direção certa, aproximando o Brasil com os países de primeiro mundo. O próximo passo a ser dado, com toda a certeza, é a venda direta da energia produzida através da geração distribuída.

Para concluir, analisando os resultados obtidos, pode-se afirmar que o objetivo deste trabalho foi alcançado.

7 BIBLIOGRAFIA

1. **Department of Economic and Social Affairs.** *World Population Prospects - The 2015 Revision.* New York : s.n., 2015.
2. **BP.** *BP's Statistical Review of World Energy June 2015.* 2015.
3. **International Energy Agency.** *Key World Energy Statistics .* 2015.
4. **ANEEL.** BIG - Banco de Informações de Geração. [Online] Agência Nacional de Energia Elétrica. [Citado em: 02 de 08 de 2016.] <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>.
5. **ANEEL.** Bandeiras Tarifárias. [Online] Agência Nacional de Energia Elétrica. [Citado em: 02 de 08 de 2016.] http://www.aneel.gov.br/tarifas-consumidores/-/asset_publisher/e2INtBH4EC4e/content/bandeira-tarifaria/654800?inheritRedirect=false.
6. **ANEEL.** *Atlas de Energia Elétrica do Brasil - 3ª Edição.* Brasília : s.n., 2008.
7. **PCH, Portal.** Consumo maior eleva uso de termelétricas. [Online] 2014. [Citado em: 02 de 08 de 2016.] <http://www.portalpch.com.br/noticias-e-opnioa/2405-16-01-2014-consumo-maior-eleva-uso-de-termeletricas.html>.
8. **G1, Globo.** Cinzas de termelétrica cobrem carros e invadem casas em Candiota, RS. [Online] 2012. [Citado em: 02 de 08 de 2016.] <http://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2012/07/cinzas-de-termeletrica-cobrem-carros-e-invadem-casas-em-candiota-rs.html>.
9. **ANEEL.** *Resolução Homologatória Nº 1.574, de 30 de Julho de 2013.* 2013.
10. **ANEEL.** *Resolução Homologatória Nº 1.928, de 4 de Agosto de 2015.* 2015.

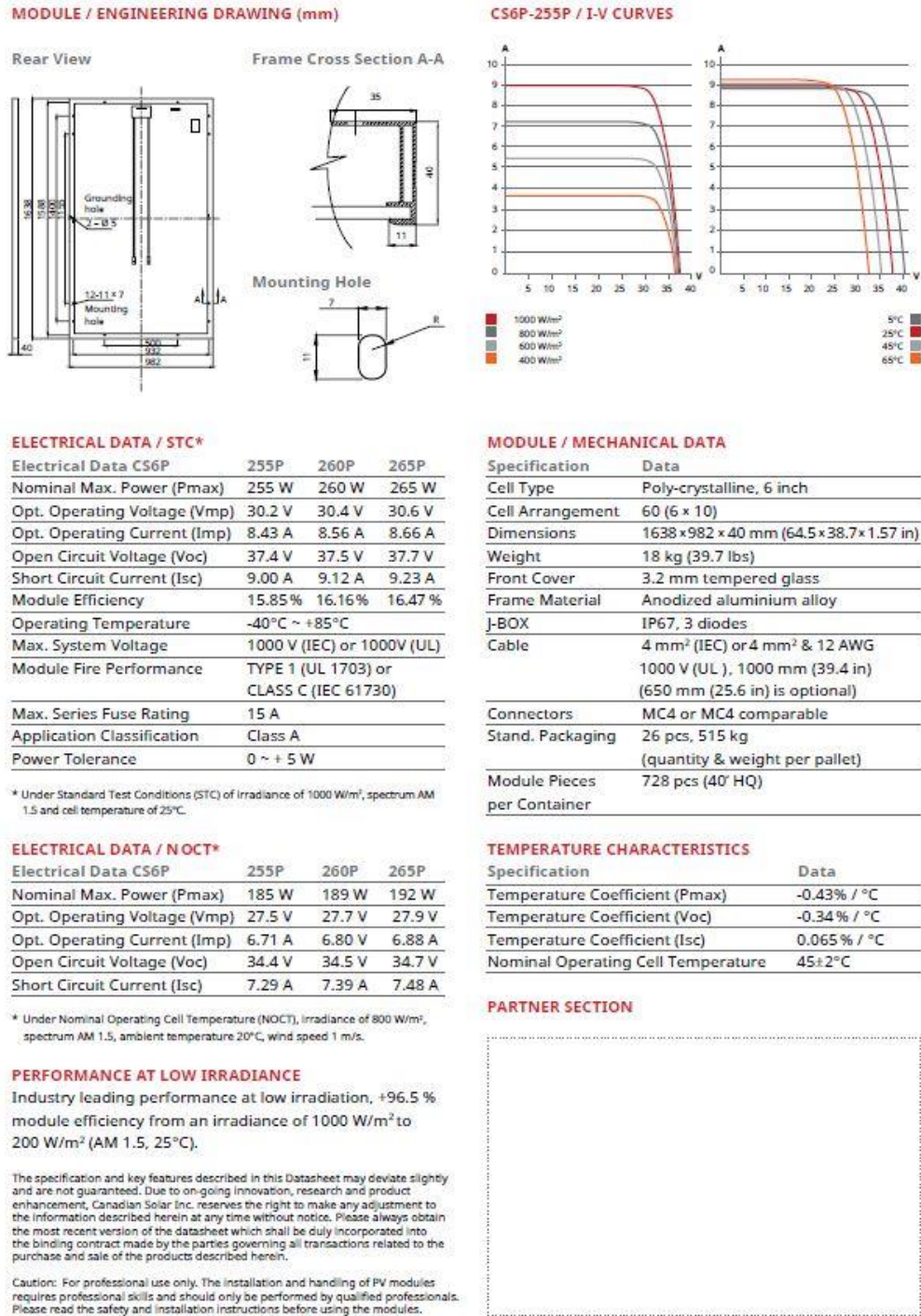
11. **EPE.** *Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira.* 2012.
12. **Luque, Antonio e Hegedus, Steven.** *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering.* 2003.
13. **Tavares, Carlos Antônio P.** *Estudo Comparativo de Controladores Fuzzy Aplicados a um Sistema Solar Fotovoltaico.* 2009.
14. **EI-Aal, Abou El-Maaty Metwally Metwally Aly Abd.** *Modelling and Simulation of a Photovoltaic Fuel Cell Hybrid System.* 2005.
15. *Modeling and Simulation of Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic System.* **Yusof, Y., et al.** 2004.
16. **Mohan, Ned, Undeland, Tore M. e Robbins, William P.** *Power Electronics: Converters, Applications, and Design.* 3ª ed. s.l. : John Wiley & Sons, 2002.
17. **Pomilio, José Antenor.** *Eletrônica de Potência.* 1998.
18. **Rashid, Muhammad H.** *Power Electronics Handbook 3ª Ed.* 2011.
19. **Newnan, Donald G., Eschenbach, Ted G. e Lavell, Jerome P.** *Engineering Economic Analysis 9ª Ed.* 2004.
20. **ANEEL.** *Por dentro da conta de energia.* Brasília : s.n., 2011.
21. **ANEEL.** Postos Tarifários. *Agência Nacional de Energia Elétrica.* [Online] [Citado em: 03 de 08 de 2016.] http://www.aneel.gov.br/tarifas-consumidores/-/asset_publisher/zNaRBjCLDgbE/content/alta-tensao/654800?inheritRedirect=false.
22. *The Modern Grid: A vision for the Smart Grid.* **Energy, U.S. Department of.** 2009.

-
23. **ANEEL**. Consulta pública para obter subsídios e informações para implantação da medição eletrônica em baixa tensão. nº 015. 2009.
24. **ANEEL**. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST*. 2012.
25. **ANEEL**. *Resolução Normativa Nº 482 de 17 de Abril de 2012*.
26. **ANEEL**. *Resolução Normativa Nº 687, De 24 de Novembro de 2015*. 2008.
27. **ANEEL**. *Micro e Minigeração Distribuída - Sistema de Compensação de Energia Elétrica 2ª Ed*. Brasília : s.n., 2016.
28. **Mattos, Filipe C**. *Contribuição ao estudo de um sistema solar fotovoltaico monofásico de único estágio*. 2011.
29. **CRESESB, CEPEL** -. *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*. 2004.
30. **Seguel, Julio Igor L**. *Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica de MPPT e controle digital*. 2009.
31. **Zilles, Roberto, et al**. *Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica*. 2012.

8 ANEXOS

8.1 Datasheet do módulo CS6P-255P

Figura 44 - Datasheet do módulo CS6P-255P



8.2 Código Matlab do Arranjo Fotovoltaico

```

function IPainel = PV_Source(VPainel, G, Tcell)
%Dados gerais
k=1.381e-23;           %Constante de Boltzmann (J/K)
q=1.602e-19;         %Carga elementar
n=1.0106;            %Fator de idealidade do diodo (diodo ideal = 1)
Eg=1.22;             %Bandgap Energy (eV)

%Dados da celula
TrefK= 273+25;       %Temperatura de referencia da celula em Kelvin
Ns=60;              %Numero de celulas em serie do painel
Voc_Tref=37.4/Ns;   %Tensao de circuito aberto por celula (V)
Isc_Tref=9.00;     %Corrente de curto circuito do painel (A)
k0=(0.49e-3)*Isc_Tref; %Coeficiente Corrente/Temperatura (A/K)
Nparalelo=10;
Nserie=29;
%Resistencia serie por celula
Rs=0.31182/Ns;
%Resistencia Shunt por celula
Rsh=225.0864;
%Define o vetor de corrente (resposta)
IPainel=0;

TcellK=273+Tcell;   %Temperatura da celula em Kelvin
Vcell=VPainel/(Ns*Nserie); %Tensao da celula
I0=G*Isc_Tref/1000; %Calcula a corrente gerada pelo foton na
irradiancia ambiente
Iph=I0+k0*(TcellK-TrefK); %Calculo de Iph na temperatura real

I0r=Isc_Tref/(exp(q*Voc_Tref/(n*k*TrefK))-1); %Calcula a corrente de
saturacao reversa para a temperatura ambiente
Id=I0r*(TcellK/TrefK)^(3/n)*exp(-(Eg*q)/(n*k))*((1/TcellK)-(1/TrefK));
%Calcula esta corrente para a temperatura ambiente

%Define o potencial termico com temperatura ambiente
Vt_Tamb=n*k*TcellK/q;

for j=1:100;
    IPainel=IPainel-(Iph-IPainel-Id*(exp((Vcell+IPainel*Rs)/Vt_Tamb)-1)-
((Vcell+Rs*IPainel)/Rsh))/(-1-Id*(Rs/Vt_Tamb)*exp((Vcell+IPainel*Rs)/
Vt_Tamb)-(Rs/Rsh));
end
%Calcula a corrente de saída do painel usando a iteração de Newton

if IPainel<0.00001;
    IPainel=0;
end

IPainel=IPainel*Nparalelo;

end

```

8.3 Código Matlab do MPPT

```
function [PinjOUT, VlpOUT, PlpOUT] = fcn(VpvIN, PinvIN, VlpIN, PlpIN)

Pref = 0;
deltaV = 0;
deltaP = 0;
step = 0.0005;
dV1 = -0.01;
dV2 = -0.02;
dV3 = -0.03;
deltaV = VpvIN-VlpIN;
deltaP = PinvIN-PlpIN;

%codigo

if((deltaV<=0)&&(deltaP<=0));
    Pref = PinvIN-step;           %Pref controla a corrente injetada do
inversor
end

if((deltaV<=0)&&(deltaP>0));
    Pref = PinvIN+step;
end

if((deltaV>0)&&(deltaP<=0));
    Pref = PinvIN+step;
end

if((deltaV>0)&&(deltaP>0));
    Pref = PinvIN-step;
end

if((deltaV<dV1)&&(deltaV>dV2));
    Pref=0.95*PinvIN;
end

if((deltaV<dV2)&&(deltaV>dV3));
    Pref=0.90*PinvIN;
end

if(deltaV<dV3);
    Pref=0.80*PinvIN;
end

if(Pref<0);
    Pref=0;
end

PinjOUT = Pref;
VlpOUT = VpvIN;
PlpOUT = Pinv
```

8.4 Dados de Insolação, Temperatura e Energia

Tabela 10 - Dados de janeiro

Janeiro			
Hora	T. Célula (°C)	Radiação (kW/m ²)	Energia (Wh)
0	24,22	0,000	0,00
1	23,96	0,000	0,00
2	23,72	0,000	0,00
3	23,50	0,000	0,00
4	23,25	0,000	0,00
5	23,03	0,000	0,00
6	25,13	0,035	2100,71
7	32,18	0,198	12721,43
8	39,57	0,386	24321,05
9	46,09	0,549	33543,06
10	52,31	0,715	42158,91
11	55,86	0,806	46489,91
12	58,17	0,877	49805,61
13	57,67	0,871	49609,48
14	54,53	0,785	45631,70
15	49,71	0,649	38857,41
16	43,24	0,467	28952,91
17	36,22	0,271	17271,64
18	28,98	0,073	4617,66
19	26,08	0,002	127,80
20	25,49	0,000	0,00
21	24,98	0,000	0,00
22	24,71	0,000	0,00
23	24,46	0,000	0,00

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 11 - Dados de fevereiro

Fevereiro			
Hora	T. Célula (°C)	Radiação (kW/m²)	Energia (Wh)
0	24,19	0,000	0,00
1	23,92	0,000	0,00
2	23,56	0,000	0,00
3	23,24	0,000	0,00
4	23,00	0,000	0,00
5	22,75	0,000	0,00
6	23,69	0,016	866,20
7	30,48	0,160	10276,36
8	39,16	0,371	23414,91
9	46,48	0,551	33603,41
10	53,16	0,728	42722,48
11	56,36	0,808	46483,70
12	59,92	0,915	51380,93
13	59,73	0,914	51380,93
14	57,05	0,841	48130,01
15	51,67	0,686	40627,09
16	44,77	0,493	30346,29
17	36,91	0,276	17552,98
18	29,17	0,066	4172,14
19	26,45	0,001	86,98
20	25,82	0,000	0,00
21	25,26	0,000	0,00
22	24,84	0,000	0,00
23	24,50	0,000	0,00

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 12 - Dados de março

Março			
Hora	T. Célula (°C)	Radiação (kW/m²)	Energia (Wh)
0	24,17	0,000	0,00
1	23,93	0,000	0,00
2	23,67	0,000	0,00
3	23,43	0,000	0,00
4	23,16	0,000	0,00
5	23,01	0,000	0,00
6	23,34	0,006	255,60
7	28,30	0,109	6948,24
8	35,87	0,295	18830,98
9	43,00	0,471	29228,93
10	49,00	0,627	37698,34
11	51,96	0,702	41487,96
12	53,57	0,746	43654,35
13	52,94	0,729	42825,43
14	49,57	0,641	38416,33
15	44,26	0,494	30474,98
16	37,61	0,310	19674,99
17	31,05	0,130	8314,99
18	26,63	0,016	965,60
19	25,61	0,000	0,00
20	25,16	0,000	0,00
21	24,91	0,000	0,00
22	24,67	0,000	0,00
23	24,45	0,000	0,00

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 13 - Dados de abril

Abril			
Hora	T. Célula (°C)	Radiação (kW/m²)	Energia (Wh)
0	22,76	0,000	0,00
1	22,53	0,000	0,00
2	22,34	0,000	0,00
3	22,11	0,000	0,00
4	22,02	0,000	0,00
5	21,86	0,000	0,00
6	21,94	0,003	39,94
7	26,03	0,084	5292,16
8	33,58	0,261	16764,88
9	40,70	0,437	27395,35
10	45,41	0,554	33946,88
11	49,03	0,652	39158,28
12	49,67	0,670	40088,38
13	48,74	0,641	38566,31
14	46,29	0,573	34951,53
15	40,60	0,414	25971,80
16	34,48	0,241	15427,41
17	27,79	0,062	3890,80
18	25,11	0,002	94,96
19	24,36	0,000	0,00
20	23,83	0,000	0,00
21	23,57	0,000	0,00
22	23,28	0,000	0,00
23	22,99	0,000	0,00

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 14 - Dados de maio

Maio			
Hora	T. Célula (°C)	Radiação (kW/m²)	Energia (Wh)
0	20,46	0,000	0,00
1	20,25	0,000	0,00
2	20,09	0,000	0,00
3	19,93	0,000	0,00
4	19,75	0,000	0,00
5	19,59	0,000	0,00
6	19,50	0,001	0,00
7	22,42	0,053	3191,45
8	29,98	0,220	14233,73
9	37,03	0,383	24367,20
10	41,98	0,502	31265,74
11	44,92	0,579	35528,40
12	45,36	0,587	35939,31
13	44,21	0,551	33945,10
14	41,34	0,474	29618,54
15	36,25	0,333	21239,65
16	30,57	0,179	11519,75
17	24,71	0,027	1583,30
18	22,84	0,000	0,00
19	22,18	0,001	0,00
20	21,74	0,000	0,00
21	21,43	0,000	0,00
22	21,05	0,000	0,00
23	20,73	0,000	0,00

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 15 - Dados de junho

Junho			
Hora	T. Célula (°C)	Radiação (kW/m²)	Energia (Wh)
0	19,68	0,000	0,00
1	19,44	0,000	0,00
2	19,29	0,000	0,00
3	19,12	0,000	0,00
4	18,93	0,000	0,00
5	18,67	0,000	0,00
6	18,54	0,000	0,00
7	20,31	0,026	1378,29
8	27,19	0,171	11055,59
9	34,15	0,326	20944,11
10	39,47	0,452	28471,89
11	42,44	0,524	32556,16
12	43,21	0,542	33546,61
13	42,73	0,525	32575,69
14	40,51	0,463	29036,34
15	36,25	0,344	21944,33
16	30,21	0,181	11658,20
17	24,00	0,024	1372,96
18	22,22	0,000	0,00
19	21,44	0,001	0,00
20	20,98	0,000	0,00
21	20,60	0,000	0,00
22	20,25	0,000	0,00
23	19,94	0,000	0,00

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 16 - Dados de julho

Julho			
Hora	T. Célula (°C)	Radiação (kW/m²)	Energia (Wh)
0	19,32	0,000	0,00
1	19,06	0,000	0,00
2	18,85	0,000	0,00
3	18,65	0,000	0,00
4	18,41	0,000	0,00
5	18,23	0,000	0,00
6	18,04	0,000	0,00
7	19,51	0,019	907,03
8	26,35	0,160	10334,94
9	33,38	0,321	20674,31
10	38,49	0,441	27892,35
11	41,45	0,515	32139,04
12	42,93	0,553	34259,28
13	42,32	0,529	32879,21
14	40,30	0,474	29747,23
15	36,20	0,363	23164,64
16	30,61	0,214	13817,49
17	24,07	0,043	2583,51
18	21,88	0,001	0,00
19	21,08	0,000	0,00
20	20,57	0,000	0,00
21	20,20	0,000	0,00
22	19,92	0,000	0,00
23	19,59	0,000	0,00

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 17 - Dados de agosto

Agosto			
Hora	T. Célula (°C)	Radiação (kW/m²)	Energia (Wh)
0	19,28	0,000	0,00
1	18,96	0,000	0,00
2	18,76	0,000	0,00
3	18,55	0,000	0,00
4	18,29	0,000	0,00
5	18,06	0,000	0,00
6	17,83	0,001	0,00
7	20,67	0,045	2621,68
8	28,67	0,220	14278,99
9	35,56	0,381	24374,30
10	41,04	0,514	32133,71
11	44,20	0,594	36549,91
12	46,29	0,646	39305,60
13	45,96	0,638	38888,48
14	43,59	0,573	35375,75
15	38,71	0,441	27867,50
16	32,70	0,276	17787,28
17	25,44	0,079	4956,69
18	22,11	0,003	43,49
19	21,21	0,000	0,00
20	20,70	0,000	0,00
21	20,24	0,000	0,00
22	19,93	0,000	0,00
23	19,56	0,000	0,00

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 18 - Dados de setembro

Setembro			
Hora	T. Célula (°C)	Radiação (kW/m²)	Energia (Wh)
0	20,53	0,000	0,00
1	20,26	0,000	0,00
2	20,05	0,000	0,00
3	19,80	0,000	0,00
4	19,53	0,000	0,00
5	19,26	0,000	0,00
6	19,75	0,007	184,60
7	25,00	0,110	7003,26
8	32,89	0,299	19274,73
9	39,22	0,459	28940,49
10	43,62	0,570	35188,49
11	47,04	0,658	39879,81
12	48,37	0,695	41799,48
13	48,34	0,699	42039,10
14	45,97	0,637	38827,24
15	40,84	0,493	30860,15
16	34,27	0,312	20053,95
17	26,80	0,109	6943,80
18	22,83	0,006	237,85
19	22,21	0,001	0,00
20	21,65	0,000	0,00
21	21,26	0,000	0,00
22	21,04	0,000	0,00
23	20,84	0,000	0,00

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 19 - Dados de outubro

Outubro			
Hora	T. Célula (°C)	Radiação (kW/m²)	Energia (Wh)
0	21,52	0,000	0,00
1	21,37	0,000	0,00
2	21,18	0,000	0,00
3	20,92	0,000	0,00
4	20,83	0,000	0,00
5	20,70	0,000	0,00
6	22,39	0,029	1637,44
7	27,93	0,157	10113,95
8	33,85	0,305	19603,99
9	39,77	0,457	28749,68
10	44,27	0,571	35147,66
11	46,48	0,627	38141,20
12	47,47	0,653	39504,40
13	46,61	0,633	38474,90
14	44,04	0,565	34821,06
15	39,08	0,430	27135,31
16	33,30	0,269	17299,15
17	27,61	0,116	7407,08
18	23,60	0,011	560,01
19	22,91	0,000	0,00
20	22,53	0,000	0,00
21	22,19	0,000	0,00
22	21,96	0,000	0,00
23	21,75	0,000	0,00

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 20 - Dados de novembro

Novembro			
Hora	T. Célula (°C)	Radiação (kW/m²)	Energia (Wh)
0	22,36	0,000	0,00
1	22,13	0,000	0,00
2	21,92	0,000	0,00
3	21,74	0,000	0,00
4	21,60	0,000	0,00
5	21,55	0,000	0,00
6	24,22	0,053	3234,05
7	29,94	0,188	12125,03
8	35,87	0,339	21600,86
9	40,76	0,467	29255,55
10	44,66	0,571	35087,31
11	48,22	0,669	40305,81
12	49,34	0,699	41840,30
13	48,46	0,677	40729,15
14	45,06	0,581	35626,03
15	39,75	0,435	27375,83
16	33,83	0,269	17270,75
17	28,32	0,119	7604,10
18	24,52	0,017	955,84
19	23,62	0,000	0,00
20	23,32	0,000	0,00
21	22,99	0,000	0,00
22	22,78	0,000	0,00
23	22,59	0,000	0,00

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 21 - Dados de dezembro

Dezembro			
Hora	T. Célula (°C)	Radiação (kW/m²)	Energia (Wh)
0	23,98	0,000	0,00
1	23,73	0,000	0,00
2	23,48	0,000	0,00
3	23,29	0,000	0,00
4	23,09	0,000	0,00
5	22,95	0,000	0,00
6	25,74	0,053	3268,66
7	32,05	0,205	13182,04
8	38,54	0,372	23532,95
9	44,92	0,539	33113,51
10	49,70	0,664	39733,38
11	53,82	0,773	45116,95
12	55,17	0,809	46820,06
13	53,97	0,778	45367,23
14	50,75	0,691	41096,58
15	45,41	0,544	33344,26
16	39,10	0,368	23231,20
17	32,64	0,192	12318,50
18	27,06	0,042	2596,83
19	25,29	0,001	0,00
20	25,02	0,000	0,00
21	24,77	0,000	0,00
22	24,54	0,000	0,00
23	24,25	0,000	0,00

Fonte: Produção do próprio autor