



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Rodrigo Vieira

Sistema de Energia Renovável para Dessalinização de Água

Rio de Janeiro

2018

Rodrigo Vieira

Sistema de Energia Renovável para Dessalinização de Água



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Controle e Automação, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Sistemas Inteligentes e Automação.

Orientador: Prof. Maria Dias Bellar, Ph.D

Rio de Janeiro

2018

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

V657 Vieira, Rodrigo Rodrigues.
Sistema de energia renovável para dessalinização de água /
Rodrigo Rodrigues Vieira. – 2018.
132f.

Orientador: Maria Dias Bellar.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de
Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia Eletrônica - Teses. 2. Geração Sistemas de
energia fotovoltaica - Teses. 3. Energias - Fontes alternativas -
Teses. 4. Energia eólica - Teses. 5. Dessalinização da água -
Teses. I. Bellar, Maria Dias. II. Universidade do Estado do Rio de
Janeiro, Faculdade de Engenharia. III. Título.

CDU 004.42:620.91

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou
parcial desta tese, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

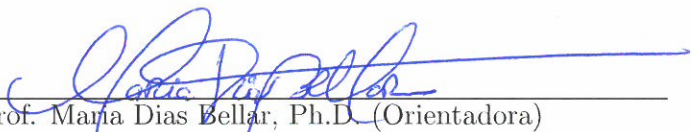
Rodrigo Vieira

Sistema de Energia Renovável para Dessalinização de Água

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Eletrônica, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Sistemas Inteligentes e Automação.

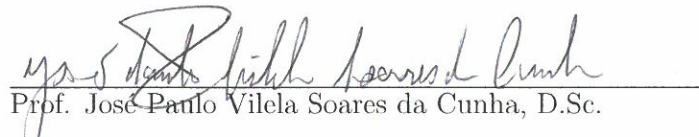
Aprovado em: 28 de Fevereiro de 2018

Banca Examinadora:



Prof. Maria Dias Bellar, Ph.D. (Orientadora)

Faculdade de Engenharia - UERJ



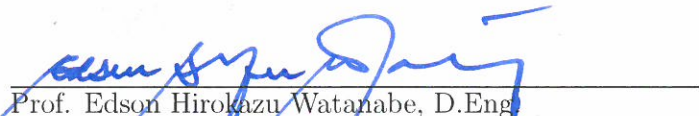
Prof. José Paulo Vilela Soares da Cunha, D.Sc.

Faculdade de Engenharia - UERJ



Prof. Tiago Roux de Oliveira, D.Sc.

Faculdade de Engenharia - UERJ



Prof. Edson Hirokazu Watanabe, D.Eng.

COPPE - UFRJ

Rio de Janeiro

2018

AGRADECIMENTO

Agradeço a professora Bellar, pelo grande esforço e colaboração neste trabalho. Em meio a tantas dificuldades vividas pela nossa instituição nos últimos tempos, o seu profissionalismo e dedicação merece todo o reconhecimento. O meu muito obrigado pelos vários dias que enfrentamos noites a dentro, para que este trabalho fosse concluído.

Agradeço a minha amada esposa Lígia, que tanto me incentivou, sobretudo nos momentos mais difíceis. Em que pese o nascimento do nosso filho Pedro, que tanto transformou nossas vidas, e acrescentou uma boa dose de desafio para a conclusão deste trabalho. Obrigado pela parceria e companheirismo durante todo o mestrado.

Ao meu filho Pedro que, com seu simples sorriso, modificou minha forma de ver a vida e trouxe mais sentido a tudo que faço.

Por fim, agradeço a Deus.

Você tem que ter atitude positiva e tirar o melhor da situação na qual se encontra.

Stephen Hawking

RESUMO

VIEIRA, Rodrigo. *Sistema de energia renovável para dessalinização de água*. 2018. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

Este trabalho descreve o desenvolvimento e a análise por simulações digitais de um sistema híbrido de energia renovável, para uma planta de dessalinização de pequeno porte (inferior a $50\text{ m}^3/\text{dia}$). O sistema de energia é do tipo isolado da rede elétrica e baseia-se em turbina eólica, painéis fotovoltaicos e um banco de baterias. A partir de uma pesquisa bibliográfica sobre diversos métodos de dessalinização, optou-se pelo dessalinizador por osmose reversa (*reverse osmosis - RO*), por considerar-se a maior facilidade de aquisição no comércio e possibilidade de compor-se um sistema de pequeno porte. Os elementos principais nesse processo são um módulo com membranas semipermeáveis e um motor elétrico de indução, para o bombeamento de água em alta pressão. O sistema de energia é projetado para atender a demanda de energia desse motor. É analisado o desempenho de duas configurações de sistema híbrido que foram denominadas de topologia de sistema 1 e 2. Em ambas as topologias, os conversores da fonte eólica são retificadores à diodos além de possuir conversores CC-CC elevador de tensão (*boost*) clássico, tanto para o eólico como para o arranjo solar fotovoltaico. No banco de baterias, um conversor *buck-boost* gerencia o fluxo de energia. Esse conjunto forma o barramento CC que alimenta um inversor trifásico multinível com grampeamento do ponto de neutro (*Neutral-Point Clamped - NPC*) de três níveis. No caso da topologia 2 o diferencial está no uso de um dobrador de tensão que combina os dois conversores *boost* para formar o barramento CC. Esse dobrador foi elaborado realizando-se uma pequena modificação na topologia clássica do retificador quadruplicador de Greinacher/Cockcroft-Walton. Em cada conversor *boost*, foi implementado um algoritmo de rastreamento do ponto de máxima potência (*Maximum Power Point Tracking - MPPT*). No caso da modelagem do banco de baterias, dada a complexidade desse tema observada na literatura pesquisada, é realizado um modelo simplificado e específico para o regime de operação do sistema. As análises consideraram situações distintas e limites extremos de máximo e mínimo vento e de irradiação solar para atender condições específicas de demanda de carga.

Palavras-chave: Painel Fotovoltaico; Energia Renovável; Aerogerador; Dessalinização.

ABSTRACT

VIEIRA, Rodrigo. *Renewable energy system for water dessalination*. 2018. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

This work describes the development and analysis by digital simulations of a hybrid renewable energy system for feeding a small-sized desalination plant. The power renewable system must operate off the grid, and is based on wind turbine, solar panels and a bank of batteries. Based on a bibliographical research on several desalination methods, the reverse osmosis (RO) desalinator was chosen because it was considered the easiest commercial acquisition and the possibility of composing a low power system. The main elements in this process are a module with semipermeable membranes ("skid") and an induction type electric motor for the pumping of water under high pressure. Therefore, the power system is designed to meet the power demand of that engine. The performance of two hybrid system configurations that have been termed system topology 1 and 2 are analyzed. In both topologies the wind power converters are diode rectifier and DC-DC converter classic boost, the one for the photovoltaic solar array is a "boost" CC-CC converter, and a "buck-boost" converter manages the energy flow of the battery bank. This assembly forms the DC bus that feeds a three-level three-phase Neutral-Point Clamped (NPC) three-phase inverter. In the case of topology 2 the distinguishing point is the use of a voltage doubler that combines the two boost converters to form up the DC bus. This converter was developed by making a small modification to the classical topology of the quadrupler rectifier of Greinacher / Cockcroft-Walton. In each boost converter, a Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithm was implemented. In the case of battery bank modeling, given the complexity of this theme observed in the researched literature, a simplified and specific model for the system operation regime is realized. The analyzes were performed by considering different situations at extreme limits of maximum and minimum wind and solar irradiation to meet specific conditions of load demand. The commercial program PSIM is used in carrying out all analyzes.

Keywords: Solar-PV; Renewable Energy; Airgenerator; MPPT; Dessalination.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Procedência da Água nas Plantas de Dessalinização - Adaptado de [3] ...	17
Figura 2 - Diagrama simplificado de um processo de dessalinização genérico	17
Figura 3 - Tecnologias de Dessalinização	21
Figura 4 - Distribuição dos Processos de Separação - Adaptado de [3]	22
Figura 5 - Destilação Multifásica Instantânea - adaptado de [8]	23
Figura 6 - Destilação Multifásica de Baixa Temperatura - Adaptado de [8]	24
Figura 7 - <i>Skid</i> de uma VC - Fabricante MECO [9]	26
Figura 8 - Osmose natural - adaptado de [23].	29
Figura 9 - Princípio da osmose reversa - adaptado de [23].....	30
Figura 10- Fluxograma de processo - Planta Osmose Reversa - adaptado de [24].....	30
Figura 11- Divisão estimada de produção de energia elétrica por fonte renovável - Adaptado de [28]	36
Figura 12 Célula fotovoltaica - adaptado de [30]	40
Figura 13 Módulo fotovoltaico - adaptado de [30]	40
Figura 14- Matriz de módulos fotovoltaicos - adaptado de [30].....	40
Figura 15- Combinações de sistemas renováveis com métodos de dessalinização - Adaptado de [40]	43
Figura 16- Fluxograma de Projeto: Sistema de Energia Renovável/Dessalinização - Adaptado de [41]	43
Figura 17- Circuito geral da planta - Topologia Sistema 1	53
Figura 18- Circuito geral da planta - Topologia Sistema 2	53
Figura 19- Perfil de Velocidades	54
Figura 20- Modelo Comercial HY 3000 - Fabricante HY Energy - Extraído de [49] ..	58
Figura 21- Circuito para validação do modelo de gerador - PSIM	59
Figura 22- Modelo e Caixa de diálogo do modelo de Gerador	60
Figura 23- Comparação das curvas do Gerador: Fabricante x Simulação	60
Figura 24- Curva C_p	61
Figura 25- Curvas de Potência	61
Figura 26- Caixa de diálogo: <i>Wind Turbine</i>	62

Figura 27- Representação Simplificada do Circuito da Figura 28.....	62
Figura 28- Cicuito que emula o funcionamento da Turbina Eólica	63
Figura 29- Circuito Turbina-Gerador-Retificador	64
Figura 30- Corrente Gerador - domínio do tempo	65
Figura 31- Corrente Gerador - domínio da frequência.....	65
Figura 32- Fluxograma: Algoritmo P&O - Adaptado de [55].....	68
Figura 33- Sinal de dP/dV em diferentes posições da curva de potência	69
Figura 34- Circuito com <i>Boost</i> e MPPT implementados	70
Figura 35- Resposta dinâmica a variação do vento (de 12 m/s para 10 m/s)	71
Figura 36- Curvas I-V do Painel Fotovoltaico - Modelo CS6U 320P [58]	74
Figura 37- Caixa de diálogo e Circuito para validação do modelo do painel fotovoltaico	75
Figura 38 Curvas IV - Simulação	75
Figura 39- Dimensionamento dos Painéis	76
Figura 40- Caixa de diálogo do <i>Solar Module</i>	77
Figura 41- Curva IV (array) para diferentes intensidades de luz.....	78
Figura 42- Curva PV (array) para diferentes intensidades de luz.....	78
Figura 43- Curva IV (array) para diferentes temperaturas.....	79
Figura 44- Conversor <i>Boost</i> - Sistema Fotovoltaico.....	79
Figura 45- Curva típica Potência - Tensão	82
Figura 46- Fluxograma do Algoritmo INC	82
Figura 47- Circuito matriz PV em malha fechada (<i>boost + MPPT</i>)	83
Figura 48- Resposta dinâmica a uma variação na intensidade luminosa	84
Figura 49- Representação da Bateria - Bloco C PSIM	86
Figura 50- Tensão terminal x Estado de carga [64]	87
Figura 51- Dados Fabricante x Modelo	87
Figura 52- Circuito teste do sistema de baterias	88
Figura 53- Tensão nos terminais do Sistema de Baterias	89
Figura 54- Fonte Corrente	89
Figura 55- Chaveamento buck-boost	89
Figura 56- Estado de carga	90
Figura 57- Corrente bateria	90
Figura 58- Tensão no barramento CC	90

Figura 59- Circuito Inversor - Motor	92
Figura 60- Circuito de controle do índice de modulação	93
Figura 61- Tensão barramento CC	93
Figura 62- $V_{LL1(rms,motor)}$ x SetPoint	94
Figura 63- Skid Modelo S-34A [65] - Cortesia Applied	95
Figura 64- Conjunto Motor-Bomba no PSIM	96
Figura 65 Caixas de Diálogo Motor e Bomba Centrífuga	96
Figura 66- Curva de Performance da Bomba [66]	97
Figura 67- Head x Vazão	101
Figura 68- Potência x Vazão	101
Figura 69- Torque x Vazão	101
Figura 70- Velocidade Nominal	102
Figura 71- Circuito Completo - Topologia 1	103
Figura 72- Topologia Proposta	104
Figura 73- NPC 3 Níveis	105
Figura 74- NPC 3 Níveis - Funcionamento	107
Figura 75- Circuito da lógica de Chaveamento - Inversor NPC	109
Figura 76- Circuito Completo - Topologia 2	110
Figura 77- Potência Motor e Potência Aerogerador, Fotovoltaico e Bateria	112
Figura 78- Tensão Eficaz e Velocidade do Motor	112
Figura 79- Tensão Barramento CC	113
Figura 80- Corrente no motor - Partida suave	113
Figura 81- Corrente no motor - Partida direta	114
Figura 82- Potência Motor	115
Figura 83- Potência Motor	115
Figura 84- Tensão Barramento CC e no Motor	116
Figura 85- Corrente Motor	116
Figura 86- Velocidade Motor e rampa de partida	117
Figura 87- Potência Motor e Potência Aerogerador e Fotovoltaico	118
Figura 88- Potência Bateria	118
Figura 89- Tensão barramento CC e Tensão na carga	119
Figura 90- Corrente Carga / Tensão Matriz Painéis / Tensão Aerogerador	119

Figura 91 - Potência Motor e Potência Aerogerador e Fotovoltaico	120
Figura 92 - Potência Bateria	121
Figura 93 - Tensão Barramento CC e Tensão motor	121
Figura 94 - Velocidade Motor e Partida em rampa	122
Figura 95 - Potência Motor e Potência Aerogerador e Fotovoltaico	123
Figura 96 - Tensão barramento CC e Tensão no Motor	124
Figura 97 - Tensão Array de Painéis e Tensão Aerogerador	125
Figura 98 - Intensidade Luminosa e Velocidade de Vento - Cenário 2	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dessalinização em Números [2]	16
Tabela 2 - Os 10 países que lideram em Capacidade Instalada de Dessalinização - Extraído de [4].....	17
Tabela 3 Dados Comerciais de desempenho de Nanofiltração - Extraído de [15]	28
Tabela 4 Resumo dos tecnologias de dessalinização em pesquisa e desenvolvimento [26] [27]	32
Tabela 5 Combinações recomendadas - Sistema Energia Renovável/Dessalinização - Adaptado de [40]	44
Tabela 6 - Demandas típicas de energia em Processos de Dessalinização [46]	50
Tabela 7 - Exemplos de skids comerciais	51
Tabela 8 - Dados Fabricante [49]	58
Tabela 9 - Dados Desempenho do Fabricante - [obtido por email]	59
Tabela 10-Dados para cálculo filtro LC.....	66
Tabela 11- Cenários Operacionais - Aerogerador	66
Tabela 12- Cálculo <i>Boost</i>	67
Tabela 13- Tabela comparativa MPPT	71
Tabela 14- Dados do Fabricante [58].....	73
Tabela 15- Dimensionamento da Matriz de Painéis.....	76
Tabela 16- Faixa de Operação - Sistema Fotovoltaico	80
Tabela 17- Cálculo dos Componentes Conversor <i>Boost</i>	81
Tabela 18- Quadro Comparativo de Potência: malha aberta x malha fechada	82
Tabela 19- Dados do Conjunto Motor-Bomba [66].....	95
Tabela 20- <i>Head</i> x Vazão	98
Tabela 21- <i>Head</i> x Vazão	99
Tabela 22- Potência e Torque em 100%, 75% e 50%.....	100
Tabela 23- Cálculo Comoponentes do Conversor - Topologia 2- Sistema Eólico.....	106
Tabela 24- Cálculo Comoponentes do Conversor - Topologia 2- Sistema Fotovoltaico	106
Tabela 25- Sequência de Chaveamento	107
Tabela 26- Cenário 1	111

Tabela 27- Cenário 2	114
Tabela 28- Cenário 3	117
Tabela 29- Cenário 1	120
Tabela 30- Cenário 2	123

LISTA DE SIGLAS

CDI	Deionização Capacitiva
EDI	Eletrodeionização
FH	Resfriamento com Hidratos
FS	Separação por refrigeração
HD	Humidificação Desumidificação
M.S.P.	Membrana Semipermeável
MD	Membrane Distillation
MED	Multi Effect Distillation
MSF	Multistage Flash Distillation
MVC	Mechanical Vapour Compression
NF	Nanofiltração
PV	Fotovoltaico
RES	Renewable Energy System
RO	Reverse Osmose
RSE	Evaporização rápida por Spray
SD	Destilação Solar Direta
TDS	Total de Sólidos Dissolvidos
VC	Vapour Compression
VD	Destilação a Vácuo
VVC	Vacuum Vapour Compression

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	16
1	ESTADO DA ARTE	21
1.1	Métodos de Dessalinização	21
1.1.1	<u>Tecnologias Baseadas no Princípio Térmico</u>	22
1.1.1.1	MSF	23
1.1.1.2	MED	23
1.1.1.3	VC	25
1.1.2	<u>Processos baseados em filtração</u>	26
1.1.2.1	Nano filtração	26
1.1.2.2	Osmose Reversa	29
1.1.3	<u>Outras Tecnologias</u>	31
1.1.3.1	Permutação Iônica	31
1.1.3.2	Tecnologias futuras - em desenvolvimento	31
1.2	Fontes de Energia Renovável	36
1.2.1	Eólica	37
1.2.2	Solar - Fotovoltaica	38
1.2.3	Energia das Marés, Ondas e Geotérmica	40
1.3	Sistemas de Dessalinização que se utilizam de fontes renováveis ..	42
1.3.1	Aspectos Técnicos.....	42
1.3.2	Avaliação Econômica	45
1.4	Conversores de Eletrônica de Potência Aplicados aos Métodos de Dessalinização	46
1.5	Considerações sobre o Estado da Arte	48
2	A PLANTA	50
2.1	Definição da Planta	50
3	MODELAGEM DA PLANTA - TOPOLOGIA SISTEMA 1	54
3.1	Sistema Eólico	54
3.1.1	Modelagem matemática	54

3.1.2	Aerogerador	57
3.1.3	Filtro LC e Conversor Boost	65
3.1.4	Controle MPPT	67
3.2	Sistema Fotovoltaico	72
3.2.1	Modelo Matemático e Característica I-V	72
3.2.2	Painel Solar	73
3.2.3	Arranjo e Dimensionamento de Painéis	76
3.2.4	Projeto conversor <i>Boost</i>	79
3.2.5	MPPT	81
3.3	Sistema de Baterias	85
3.3.1	Modelagem	85
3.4	O Inversor	91
3.5	Osmose Reversa - Conjunto Motor-Bomba	95
3.6	Circuito Completo - Topologia Sistema 1	103
4	MODELAGEM DA PLANTA - TOPOLOGIA SISTEMA 2	104
4.1	Apresentação da Topologia	104
4.2	Sistema Eólico	105
4.3	Sistema Fotovoltaico	106
4.4	Inversor NPC	107
4.5	Circuito Completo - Topologia 2	109
5	APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS	111
5.1	systema1	111
5.1.1	Cenário 1	111
5.1.2	Cenário 2	114
5.1.3	Cenário 3	117
5.2	systema1	120
5.2.1	Cenário 1	120
5.2.2	Cenário 2	123
	CONCLUSÃO	126
	REFERÊNCIAS	128

INTRODUÇÃO

A escassez de água potável é um problema latente em várias partes do mundo. Mesmo o Brasil, que possui as maiores reservas de água potável do mundo, não está livre deste problema, haja visto as várias crises de abastecimento de água pela qual tem passado nos anos recentes. As mudanças climáticas, fruto do aquecimento global e de outros fatores, apontam a tendência de que o problema da disponibilidade de água potável continuará fazendo parte do nosso cotidiano.

Nesse sentido não parece razoável desprezar a imensa disponibilidade de água do mar ou de águas salobras (*brackish water*), provenientes de poços, açudes ou de outras fontes, impróprias para consumo, quando há tecnologias que podem ser agregadas e/ou desenvolvidas para seu tratamento e aproveitamento.

A dessalinização tem sido reconhecida como essencial para suprir o abastecimento de água em algumas regiões do planeta. Para isto utilizam-se água do mar, águas salmouras, processos de drenagem e de águas de reuso. Como exemplo dessa situação tem-se o Qatar que depende 100% da dessalinização para garantir o abastecimento de água para uso doméstico e industrial[1].

A capacidade de dessalinização tem crescido rapidamente ao redor do mundo, por conta do aumento pela demanda de água potável e uma redução significativa nos custos de produção, como resultado dos avanços tecnológicos. A Tabela 1 apresenta alguns dados desse cenário, atualizados até junho de 2015, de acordo com a Associação Internacional de Dessalinização (*International Desalination Association*) [2].

Tabela 1: - Dessalinização em Números [2]

Dessalinização em Números	
Plantas de dessalinização ao redor do mundo	18.426
Capacidade de produção	86,8 milhões de m ³ /dia
Países que possuem planta de dessalinização	150
Número de pessoas que dependem de alguma forma da água proveniente da dessalinização	Mais de 300 milhões de pessoas

A Figura 1 ilustra dados sobre o percentual de água dessalinizada quanto a sua procedência utilizadas nas plantas instaladas ao redor do mundo. Com relação à localização das plantas de dessalinização. A Tabela 2 apresenta uma lista das dez principais em capacidade instalada de produção.

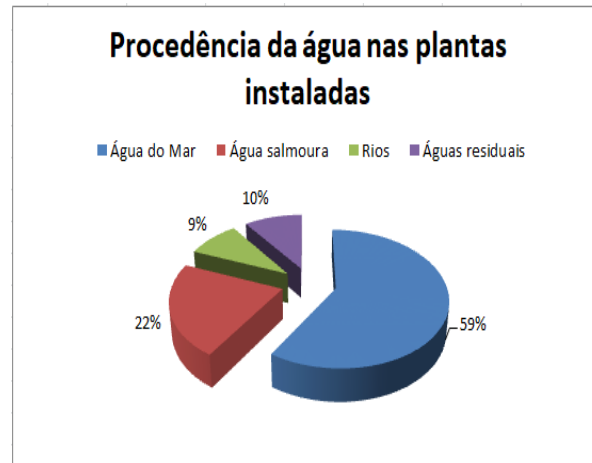


Figura 1: - Procedência da Água nas Plantas de Dessalinização - Adaptado de [3]

Tabela 2: - Os 10 países que lideram em Capacidade Instalada de Dessalinização - Extraído de [4]

Posição no ranking	País	Capacidade em operação - m ³ /dia
1	Arábia Saudita	9.170.391
2	Emirados Árabes Unidos	8.381.299
3	Espanha	3.781.314
4	Kuwait	2.586.761
5	Argélia	2.364.055
6	Austrália	1.823.154
7	Qatar	1.780.708
8	Israel	1.532.723
9	China	1.494.198
10	Líbia	1.048.424

A Figura 2 mostra um diagrama simplificado do processo de dessalinização. Há inúmeros métodos para realização do processo de purificação da água e que requerem equipamentos elétricos e eletrônicos. A especificação elétrica desses equipamentos depende da capacidade da planta quanto a vazão de água a ser tratada e, neste aspecto, a fonte de energia utilizada é sempre uma consideração importante devido ao nível de demanda e dos custos que podem envolver o consumo da energia.

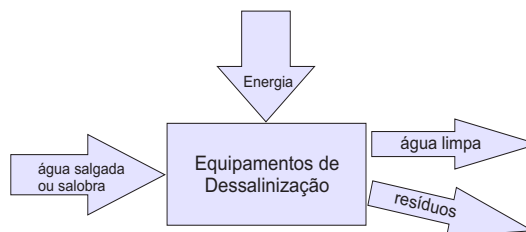


Figura 2: - Diagrama simplificado de um processo de dessalinização genérico

Há diversos trabalhos que adotam o uso de energia renovável para a alimentação

da planta de dessalinização. Em [5], o autor apresenta a importância sobre o uso de equipamentos portáteis de dessalinização alimentados por fonte solar fotovoltaica para atender regiões submetidas a tragédias naturais (ciclones, vendavais, terremotos, etc.) ou provocadas por conflitos de guerra. Nessas situações em geral ocorre a interrupção do fornecimento de energia pelo sistema elétrico e também de água. É importante considerar que, os sistemas de alimentação baseados em fontes de energia renováveis requerem o uso de conversores eletrônicos de potência, que comumente estão associados a controladores eletrônicos que gerenciam o aproveitamento da energia proveniente de uma ou mais fontes, bem como de armazenadores tais como baterias quando são utilizadas. No entanto, durante a realização desta dissertação, na maioria dos trabalhos consultados na literatura, há pouca informação quanto ao projeto do sistema de eletrônica de potência para esse tipo de aplicação, sendo mais comum que o foco esteja voltado para o processo utilizado no tratamento da água.

Em função do exposto, esta dissertação trata do estudo e projeto de um sistema de eletrônica de potência, para alimentação de uma planta de dessalinização de baixa capacidade (inferior a $20 \text{ m}^3/\text{dia}$), baseado num sistema híbrido de energia renovável composto por turbina eólica, arranjo de painéis solares fotovoltaicos e um banco de baterias. É de interesse que esse sistema possa operar de maneira isolada do sistema elétrico.

É importante citar que na área de eletrônica de potência são inúmeros os trabalhos sobre sistemas híbridos de energia renovável para diversas aplicações, bem como são diversos os métodos para realização do controle por rastreamento do ponto de máxima potência (*Maximum Power Point Tracking - MPPT*) aplicados às fontes renováveis de energia. Neste trabalho procurou-se de início estabelecer uma configuração baseada em conversores eletrônicos mais simples, e aplicada ao cenário de interesse, como estrutura base de estudo e análise. Depois buscou-se aprimorar essa configuração e estabelecer uma proposta de sistema. Todas as análises foram feitas por simulação digital com o uso do programa comercial PSIM.

Objetivos

Os objetivos desta dissertação são os seguintes:

- Realizar uma pesquisa bibliográfica sobre os métodos de dessalinização disponíveis e escolher aquele que seja adequado a compor um sistema de pequeno porte;
- Pesquisar na bibliografia as plantas de dessalinização baseadas em fontes renováveis de energia;
- Propor um sistema de eletrônica de potência baseado em fontes renováveis de energia eólica, solar e banco de baterias com capacidade para atender uma planta de dessalinização de pequeno porte (inferior a $20 \text{ m}^3/\text{dia}$);
- Realizar análises de desempenho do sistema com o auxílio de simulação digital.

Metodologia

A metodologia envolve: i) escolha do método de dessalinização; ii) especificação do nível de potência e capacidade de atendimento ao processo de dessalinização; iii) pesquisa e escolha da configuração de sistema híbrido de energia; iv) escolha e projeto dos conversores de eletrônica de potência; v) escolha e implementação de algoritmos de MPPT; vi) modelagem e análise do sistema via simulações digitais; vii) análise dos resultados.

Organização da Dissertação

No capítulo 1 é apresentado o estado da arte das tecnologias de dessalinização. O mesmo é feito para as fontes de energia renovável. Também é investigado na literatura quais as melhores combinações de fontes renováveis com planta de dessalinização. Além disso é pontuado alguns históricos econômicos desta associação.

No capítulo 2 são apresentadas as condições de contorno da planta, para o trabalho que se deseja desenvolver. Então, ocorre a definição de parâmetros da planta, sob o ponto de vista macro, pontuando cada subsistema. Também faz parte do capítulo 2 a definição e apresentação preliminar das duas configurações de sistema que serão objeto de análise.

O capítulo 3 dedica-se a descrever uma das duas configurações, denominada configuração 1. São apresentados detalhes de cada subsistema, com as devidas simulações que caracterizam a modelagem de equipamentos existentes na indústria e que, por sua vez, personificam esta abordagem.

O capítulo 4 percorre o mesmo trajeto do capítulo 3, mas no contexto da configuração 2 . Trata-se de um capítulo que foca naquilo que é efetivamente diferente do apresentado no capítulo 3, pois algumas definições são válidas para ambas as topologias.

No capítulo 5 é feita a apresentação dos resultados, com uma análise das simulações realizadas para as duas configurações de sistemas híbridos. São utilizados alguns critérios para se elencar os pontos positivos e negativos de cada configuração.

Por fim, na conclusão é feita uma análise crítica do trabalho, ponderando as dificuldades, contornos e definições desenvolvidas ao longo do trabalho.

1 ESTADO DA ARTE

Este capítulo apresenta o estado da arte das técnicas de dessalinização, bem como das fontes de energia renovável. Apresenta também, de acordo com a literatura, as melhores combinações para a associação: Energia Renovável - Planta de Dessalinização.

1.1 Métodos de Dessalinização

De forma geral, pode-se afirmar que os processos de dessalinização estão divididos conforme distribuição mostrada na Figura 3.

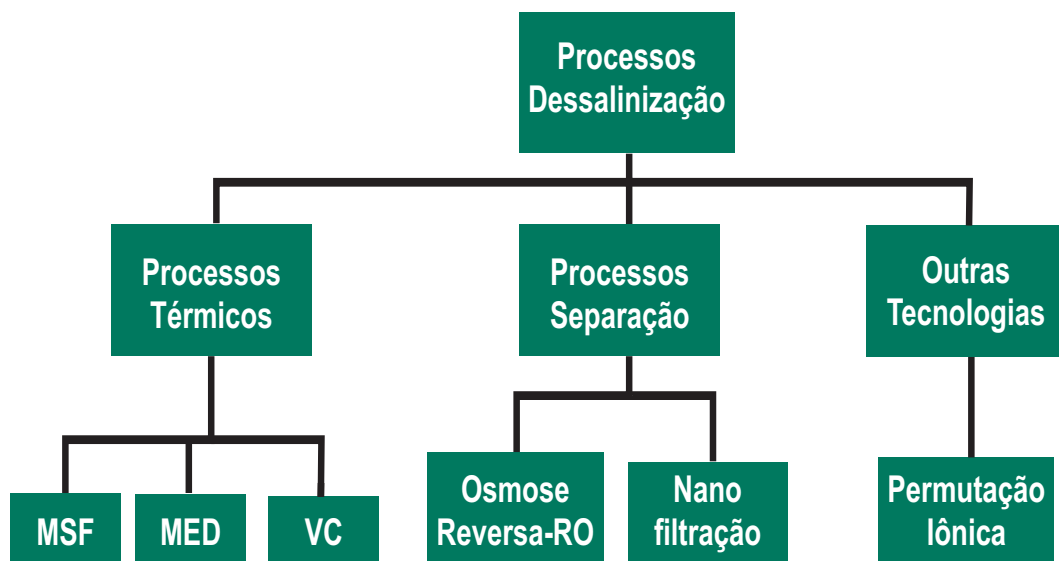


Figura 3: - Tecnologias de Dessalinização

Definições

- MSF: Destilação Multifásica Instantânea
- MED: Destilação Multiefeitos
- VC: Compressão de Vapor

Vale destacar que o diagrama da Figura 3, em sua parte inferior, traz apenas alguns exemplos mais relevantes de cada processo (MSF, MED, VC, RO, Nano Filtração e Permutação Iônica), visto que não há a intenção de se apresentar as tecnologias em sua totalidade.

Conforme Figura 4, em escala global, 68% da água dessalinizada é produzida por processos de separação e 30% por processos térmicos. Os 2% restantes são advindos de outras tecnologias [3].

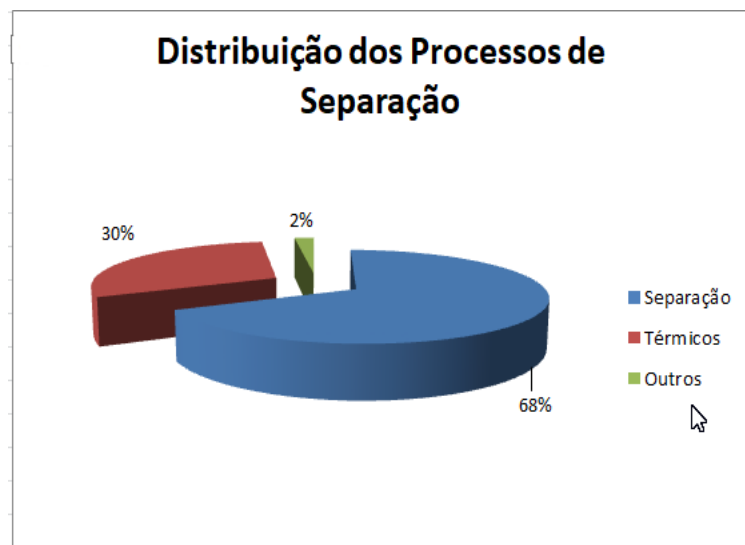


Figura 4: - Distribuição dos Processos de Separação - Adaptado de [3]

1.1.1 Tecnologias Baseadas no Princípio Térmico

O processo de dessalinização por destilação térmica usa calor para vaporizar a água do mar e, então, condensar o vapor para produzir água potável. A tecnologia por destilação pode ser subdividida em Destilação Multifásica Instantânea (*Multi-Stage Flash, MSF*), Destilação Multiefeitos (*Multi-Effect Distillation, MED*), Compressão de Vapor (*Vapour Compression, VC*) e outros. São tecnologias com uso intensivo de energia e por isso tendem a ser de alto custo. Seus custos dependem fortemente do consumo de eletricidade e do custo do vapor. Muitas das plantas de dessalinização usam os processos MSF e MED, sendo construídas junto com plantas de geração de energia, como unidades de cogeração para reduzir custo, o que não somente consome grande quantidade de energia, como também aumenta a poluição [6]. Não obstante às questões anteriores, os métodos MED são bastante utilizados e pesquisados[7].

1.1.1.1 Destilação Multifásica Instantânea

O processo MSF começa com a circulação da água salgada fria por um sistema de tubos que estão envoltos em vapor quente. Os tubos são envoltos por sucessivas câmaras com vapor quente. A técnica recebeu este nome devido a vaporização instantânea (*flash*) que ocorre no interior da câmara. O diferencial térmico existente faz com que a água salgada aqueça enquanto esta transita pelos tubos. Após ter passado pelos tubos, a água entra na chamada aquecedor de salobra onde, em seguida, passa para o primeiro estágio. Cada câmara representa um estágio.

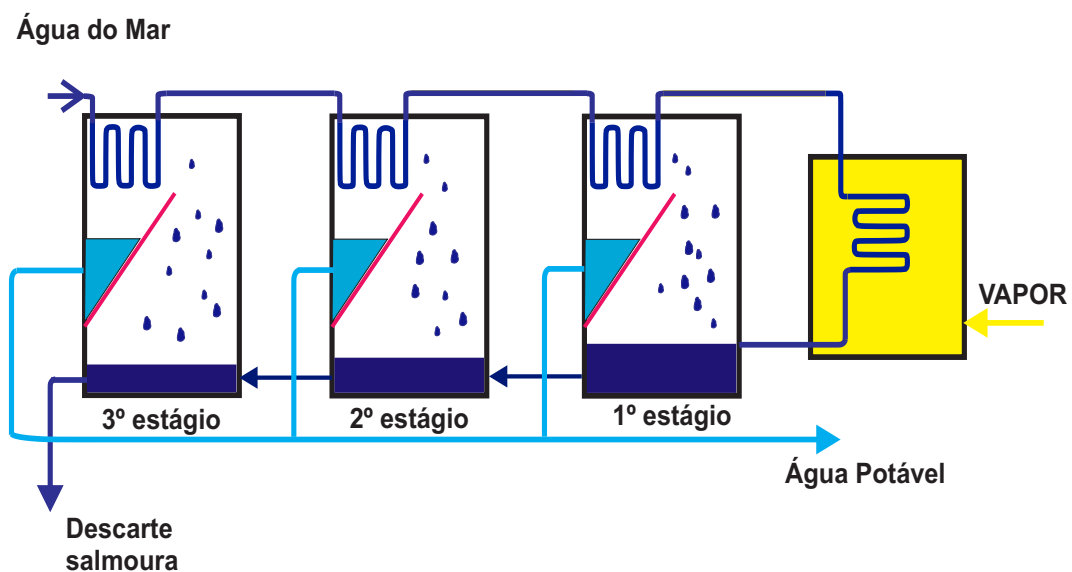


Figura 5: - Destilação Multifásica Instantânea - adaptado de [8]

A elevada temperatura presente no interior de cada câmara faz com que uma parte da água vaporize instantaneamente. O vapor de água condensa e precipita numa calha que conduz a água potável para fora da câmara. A salobra restante passa para a câmara seguinte, onde o processo ocorre agora a uma temperatura de operação inferior à câmara anterior. Esta diminuição da temperatura deve-se à diminuição de pressão entre fases consecutivas. As fases restantes processam-se de um modo análogo até que a salobra atinja valores de concentração de sais muito elevados, sendo esta enviada para descarte.

1.1.1.2 Destilação Multiefeitos

Uma planta MED consiste de várias células consecutivas (*effects*), com níveis decrescentes de pressão e temperatura, quando observados da primeira (mais quente)

com relação a última célula (mais fria). Cada célula consiste num conjunto de feixes de tubos horizontais. Cada célula possui um aspecto muito similar a um trocador de calor do tipo casco-tubo. Ao topo do feixe de tubos é pulverizada água do mar, que por sua vez flui através do feixe de tubos de modo descendente por gravidade. O interior dos tubos é preenchido com vapor. A água do mar pulverizada evapora ao entrar em contato com o feixe de tubos aquecidos pelo vapor, ao mesmo tempo, o soluto concentrado na água do mar vai se depositando ao fundo de cada célula. Embora a água do mar do vaporizada possua temperatura inferior ao vapor presente no interior dos tubos, ela é utilizada como fonte de calor para o processo numa fase posterior (célula à frente), onde o processo é repetido. O fluxograma da Figura 6 representa o processo.

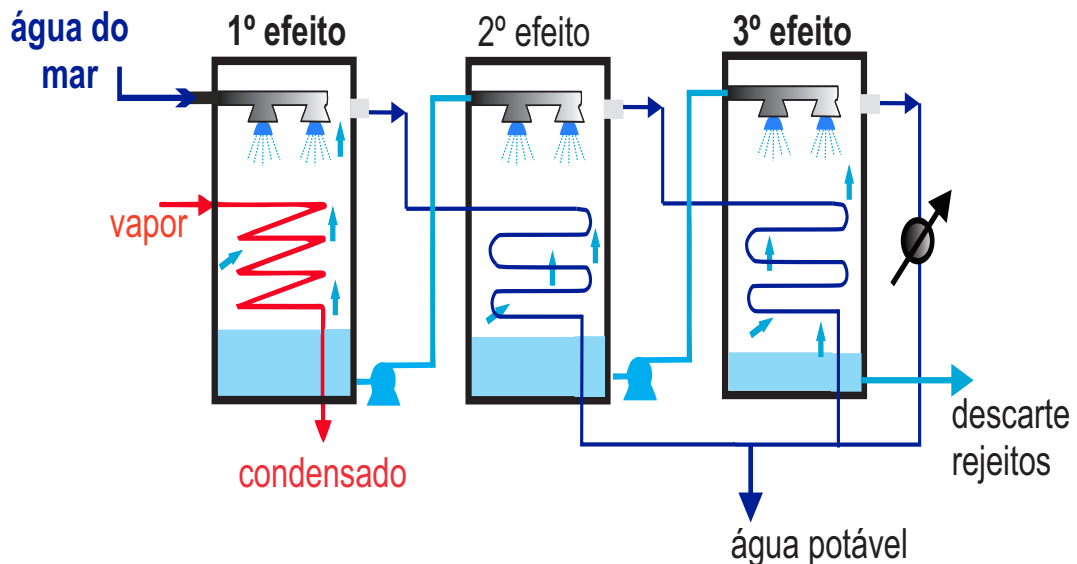


Figura 6: - Destilação Multifásica de Baixa Temperatura - Adaptado de [8]

As sucessivas trocas térmicas nas várias células implica redução gradual da temperatura da fonte de calor. O processo é realizado em uma série de células consecutivas, chamadas de efeitos (*effects*), por isso o nome *Multi Effects Distillation*. Como vantagens desse processo, pode-se elencar os seguintes pontos:

- ♣ baixo consumo de eletricidade comparado ao método MSF
- ♣ opera a baixas temperaturas ($< 70^{\circ} \text{C}$)
- ♣ não necessita de pré-tratamentos complexos para a água do mar
- ♣ tolerante a variações nas condições da água do mar

- ♣ são confiáveis e simples de operar
- ♣ construção simples e de mais baixo custo comparado ao MSF
- ♣ apresenta baixo custo de manutenção - poucas partes móveis (exceto pela bomba)
- ♣ pode operar com o mínimo de supervisão

1.1.1.3 Compressão de Vapor

A dessalinização por compressão de vapor refere-se a um processo de destilação onde a evaporação da água do mar é obtida pela aplicação de calor entregue por um compressor de vapor. Uma vez que o vapor comprimido aumenta tanto a pressão quanto a temperatura do vapor, é possível usar o calor latente rejeitado durante a condensação para gerar vapor adicional. O efeito de comprimir vapor d'água pode ser obtido por dois métodos.

O primeiro método utiliza um sistema de ejeção impulsionado por vapor a partir de uma fonte externa, de modo a recircular o vapor procedente do processo de dessalinização. Esta forma é designada de Ejeção ou Termo Compressão.

No segundo método, vapor d'água é comprimido por meio de um dispositivo mecânico, eletricamente impulsionado na maioria dos casos. Este método é denominado Compressão Mecânica de Vapor (*Mechanical Vapor Compression - MVC*). O processo MVC compreende duas diferentes versões: Compressão de Vapor (VC) e Compressão de Vapor à Vácuo (VVC). VC refere-se aos sistemas em que a evaporação acontece à pressão manométrica, já com relação ao VVC a evaporação acontece à pressão sub-atmosférica (no vácuo).

A compressão é fornecida tipicamente por um turbo compressor. À medida que o vapor é gerado, ele passa sobre o trocador de calor condensando-se e voltando ao estado líquido. O resultado - água potável - é direcionado e armazenado enquanto o calor removido durante a condensação é transmitido ao estoque de água remanescente.

Como vantagens deste sistema, pode-se apontar:

- ♣ alta eficiência
- ♣ alta taxa de recuperação de água

- ♣ sistema "limpo" eletricamente impulsionado
- ♣ fácil manutenção
- ♣ operação simples

Uma desvantagem é o tempo para entrada em regime de operação, dada a necessidade de pré-aquecimento da água.



Figura 7: - *Skid* de uma VC - Fabricante MECO [9]

1.1.2 Processos baseados em filtração

1.1.2.1 Nano filtração

Nano filtração é uma filtração por membrana que usa cilindros com poros da ordem de nanômetros, nos quais ficam as membranas dispostas em 90 graus. As membranas tem poros de diâmetros que variam de 1 a 10 nanômetros, portanto, maiores que os utilizados em osmose reversa e menores que os de ultrafiltração [10–12]. As membranas usam predominantemente filmes de polímeros na sua fabricação. Os materiais mais comumente usados são o Polietileno Tereftalato e Alumínio. Com relação à densidade dos poros, eles podem variar de 1 a 10^6 poros por cm^2 .

Devido à sua capacidade única de separação, a tecnologia NF tem sido desenvolvida para remover partículas com dimensões de íons, tais como o NaCl da água do mar, e também matéria orgânica de baixo peso molecular [13, 14]. Vários esforços tem sido dedicados no sentido de melhorar seu desempenho sob diferentes condições de aplicação.

Algumas das recentes aplicações disponíveis comercialmente estão listadas na Tabela 3 para comparação [15].

Foi reportada a existência de uma planta NF estabelecida em Long Beach, nos Estados Unidos, com uma produção diária de 1135 m³ [16].

Tabela 3: Dados Comerciais de desempenho de Nanofiltração - Extraído de [15]

Marca	Fabricante	Material da Membrana	Alimentação g L-1	Permeabilidade L m-2 h-1 bar-1	Taxa de rejeição %							Ref.
					NaCl	Cl-	Na+	SO42-	Mg2+	Ca2+	TDS	
NF90	<i>Dow Filmtec</i>	PA	Água mar 41,2	1,08	-	64,1	58,7	96,7	96,8	94,3	65,5	[17]
			Água mar 35	-	-	85,0	77,4	99,4	-	97,8	83	[18]
			Água mar 35	0,728	-	81,7	80,9	98,7	96,3	95,0	83,5	[19]
NF270	<i>Dow Filmtec</i>	PA	Água mar 41,2	5,6	-	13,9	27,4	97,5	84,1	69,0	28,2	[17]
			Água mar 35		-	40,2	30,8	98,9		60,2	44,8	[18]
NF200	<i>Dow Filmtec</i>	PA	Água mar 41,2	3,5	-	24,9	37,0	99,1	88,2	70,0	37,5	[17]
NF2540	<i>Dow Filmtec</i>	-	NaCl 35	1,6 ± 0,2	52	-	-	-	-	-	-	[20]
N30F	<i>MICRODYN-NADIR</i>	-	NaCl 25	1,68	3,0	-	-	-	-	-	-	[21]
K-SR2	<i>Koch</i>	-	Água mar 41,2	7,3	-	11,5	7,1	97,0	75,6	59,0	18,4	[17]
MPS34	<i>Koch</i>	-	NaCl 35	1,0 ± 0,1	40	-	-	-	-	-	-	[20]
ESNA1-LF2	<i>Hydranautics</i>	PA	Água mar 41,2	10,9	-	11,7	12,1	66,0	24,3	17,8	16,5	[17]
ESNA1	<i>Hydranautics</i>	PES	Água mar 35	-	-	89,7	80,9	99,4	-	93,2	89,6	[18]
ESNA3	<i>Hydranautics</i>	PA	Água mar 35	6,14	-	20,4	11,7	99,1	-	45,7	22,7	[18]
NF99HF	Alfa Laval	-	Água mar 41,2	5,2	-	24,4	14,2	97,3	85,5	67,3	29,3	[17]
MPS44	<i>Weizmann</i>	-	NaCl 35	0,53 ± 0,05	52	-	-	-	-	-	-	[20]
DL	<i>GE Osmonics</i>	PA	Água mar 35	-	-	18,8	14,9	95,3	-	69,8	20,6	[18]
DK	<i>GE Osmonics</i>	PA	Água mar 35	-	-	28,0	27,3	93,6	-	60,4	35,8	[18]

1.1.2.2 Osmose Reversa

A tecnologia de dessalinização por osmose reversa tem comprovado ser a mais confiável, de melhor custo benefício e eficiente em produzir água potável quando comparada com outras técnicas [22].

Para melhor entendimento do princípio da osmose reversa, é conveniente relembrar o conceito da osmose convencional (natural), que nada mais é do que a difusão da água através de uma membrana semipermeável (M.S.P.). É um fenômeno físico-químico que ocorre quando duas soluções aquosas de concentrações diferentes entram em contato através de uma membrana semipermeável. Membranas semipermeáveis deixam difundir apenas o solvente, impedindo a difusão do soluto. A Figura 8 representa o processo de uma osmose natural.

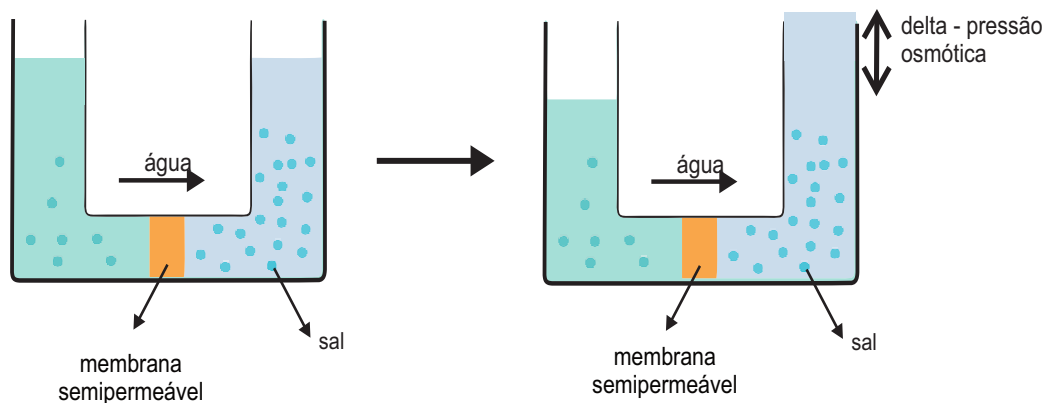


Figura 8: - Osmose natural - adaptado de [23].

O que acontece na osmose reversa da água do mar, como o próprio nome sugere, é o contrário desse processo natural. Ocorre a passagem forçada da solução por um conjunto de membranas semipermeáveis que funcionam como “peneiras”, deixando passar a água e retendo o sal concentrado. É evidente que o resultado (água potável), não é obtido em uma etapa, sendo exigido da planta, sucessivas etapas de osmose reversa para se conseguir atingir um produto especificado.

A Figura 9 representa o processo de uma osmose reversa.

Numa planta real, a passagem forçada da água salgada pelas membranas é obtida pelo uso de bombas movidas por motores elétricos.

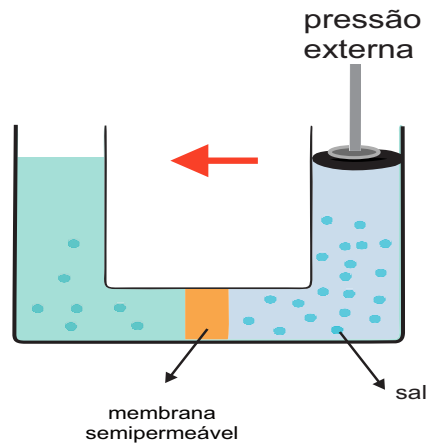


Figura 9: - Princípio da osmose reversa - adaptado de [23].

A Figura 10 traz um diagrama de processo típico da planta de tratamento de água por osmose reversa.

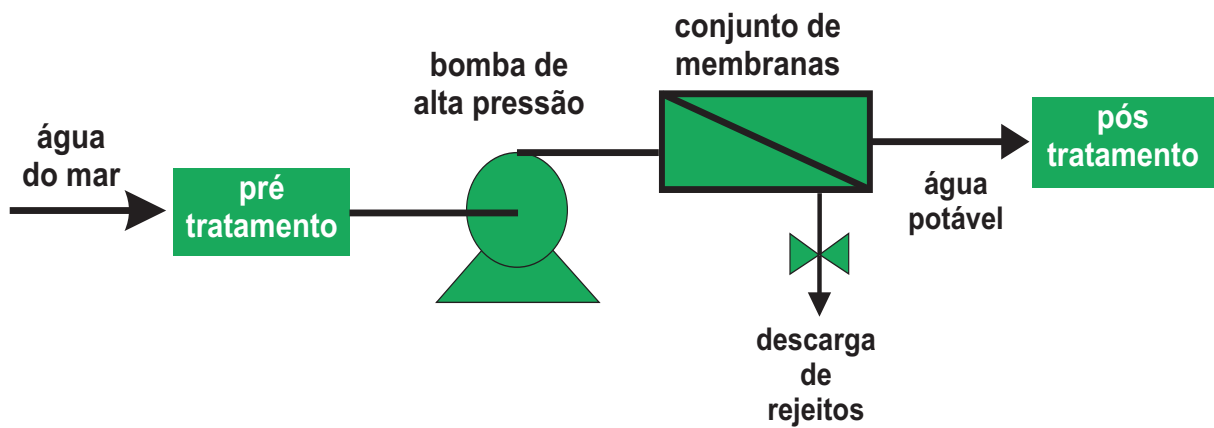


Figura 10: - Fluxograma de processo - Planta Osmose Reversa - adaptado de [24]

1.1.3 Outras Tecnologias

1.1.3.1 Permutação Iônica

A Permutação Iônica pode ser melhor descrita como a troca de íons entre uma fase sólida e uma fase líquida presente ao redor do sólido. Uma resina química, na parte sólida, é designada para trocar seus íons com a fase líquida - água salgada - o que purifica a água. A resina pode ser feita utilizando materiais inorgânicos, tais como zeólitos, ou materiais sintéticos. Técnicas modernas baseadas em troca de íons são preparadas a partir polímeros sintéticos sob medida para diferentes aplicações. Descrita de forma sucinta, a água salgada é passada sobre os grãos de resina onde os íons de sal da água salgada são substituídos por outros íons. O processo remove íons de Na^+ e Cl^- da água, produzindo, portanto, água potável. Para mais detalhes, uma boa referência é o livro *Water purification by ion exchange* [25].

1.1.3.2 Tecnologias futuras - em desenvolvimento

Várias tecnologias novas, com muito potencial, estão sendo estudadas para aplicações futuras em dessalinização. Algumas tecnologias não são necessariamente novas, contudo precisam ser aperfeiçoadas para se tornarem viáveis do ponto de vista comercial. Como exemplo a Eletrodeionização (EDI) que é uma combinação de Permutação Iônica com Eletrodiálise. Outras novas tecnologias incluindo combinação de membranas, tecnologias de destilação e congelamento.

A Tabela 4 mostra um breve resumo das tecnologias em desenvolvimento.

Tabela 4: Resumo dos tecnologias de dessalinização em pesquisa e desenvolvimento [26] [27]

Tecnologia	Breve descrição - Vantagens e Desvantagens	Fonte dada	Estuda
Eletrodeionização (EDI)	<ul style="list-style-type: none"> • EDI é uma combinação de Permutação Iônica com Eletrodialise. Carga elétrica é aplicada a placas externas à membrana com resina granulada entre elas. A água salgada passa entre as membranas. Os íons da água salgada ocupam os lugares dos íons na resina, então, estes são deslocados através da membrana em frente as cargas eletricamente carregadas. A água passa através da resina, livre de íons, portanto produzindo água potável; • Capaz de produzir água altamente pura. 	Água salobra	

Tecnologia	Breve descrição - Vantagens e Desvantagens	Fonte	Estudada
Destilação por Membrana (MD)	<ul style="list-style-type: none"> • Uma diferença de temperatura ocorre nos lados opostos de uma membrana. Diferenças na pressão de vapor perturbam o sistema, e apenas o vapor passa através da membrana. Como o sal não é vaporizado, ele não passa através dos poros; • Requer alta quantidade de energia; • Não está totalmente desenvolvida. 	Pesquisada utilizando - 300,000 mg/L TDS	15,000
Separação por resfriamento (FS)	<ul style="list-style-type: none"> • A refrigeração da água salgada forma cristais de água puros, que tem que ser separados da salobra e então, dissolvido para se obter água potável; • Menos energia é exigida quando comparado com técnicas de evaporação; • Não está totalmente desenvolvida. 	Água do mar	

Tecnologia	Breve descrição - Vantagens e Desvantagens	Fonte	Estudada
Deionização Capacitiva (CDI)	<ul style="list-style-type: none"> • A água salgada passa através de placas revestidas com carbono aerogel. O carbono aerogel absorve íons, produzindo, portanto, água potável; • Aplicável a demandas especiais; • Não está totalmente desenvolvida. 	Água salobra	
Evaporização rápida por Spray (RSE)	<ul style="list-style-type: none"> • A água salgada é "spreyada" através de orifícios a altas velocidades. Conforme a água sai, o sal fica pois não é vaporizado. Portanto, produz água potável; • Possui potencial para processar salobra e altas salinidades, podendo utilizar energia de resíduos, alta taxa de recuperação água; • Não utilizada para grandes plantas. 	Salmoura / Água do mar / Água salobra	

Tecnologia	Breve descrição - Vantagens e Desvantagens	Fonte	Estudada
Resfriamento com Hidratos (FH)	<ul style="list-style-type: none"> • Uma mistura vapor/gas de água salgada é resfriada. Hidratos são formados e separados da salobra. Os hidratos são decompostos para formar água portátil e hidrato na forma de gás. • Potencial para uso futuro, devido a pesquisa de hidratos; • Ainda sendo pesquisada e não está desenvolvida. 	Água do mar	
Destilação a Vácuo (VD)	<ul style="list-style-type: none"> • Submetendo água salgada ao vácuo, a temperatura de ebulição é reduzida. A água salgada é vaporizada a temperaturas menores e é condensada para formar água potável; • Baixa quantidade de energia; • Possibilidade de acabar com o desperdício de energia; • Sem escalabilidade devido a baixa temperatura; • Não está totalmente desenvolvida. 	Pesquisado utilizando 32,100 mg/L TDS	

1.2 Fontes de Energia Renovável

Atualmente, as energias renováveis estão estabelecidas ao redor do mundo como fontes essenciais de energia. O rápido crescimento, particularmente no setor de sistema de potência, é motivado por diversos fatores, tais como: melhoria no custo e competitividade das tecnologias renováveis, políticas de incentivo, melhor acesso a financiamento, segurança energética, preocupação com o meio ambiente, crescimento da demanda de energia em países em desenvolvimento e a necessidade de modernizar o setor energético. Consequentemente, novos mercados para energia renováveis, tanto para mercados centralizados quanto distribuídos estão emergindo em todas as regiões[28].

Comparado com as fontes de energia convencional (combustíveis fósseis), as energias renováveis respondem por cerca de 23,7% da energia elétrica produzida no mercado mundial.

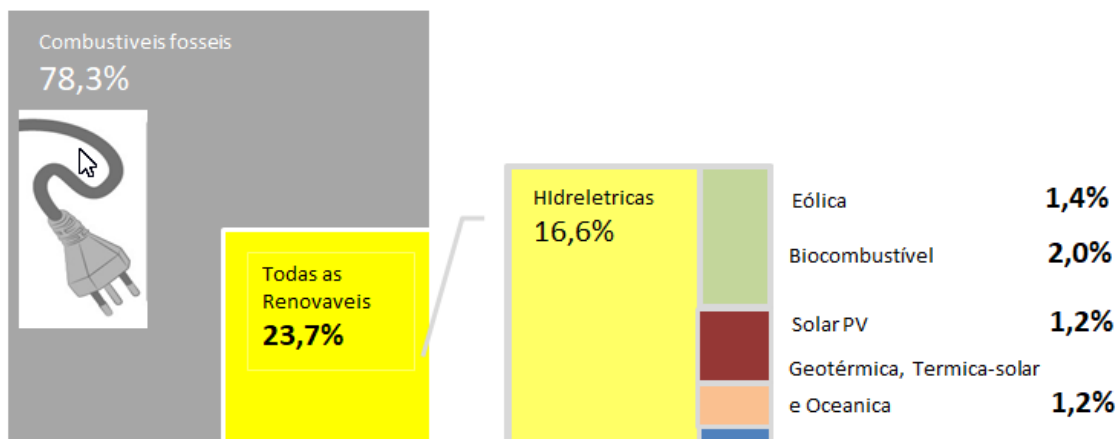


Figura 11: - Divisão estimada de produção de energia elétrica por fonte renovável - Adaptado de [28]

As principais fontes de energia renováveis são:

- ♣ Eólica
- ♣ Solar PV (fotovoltaica)
- ♣ Oceânica - maré
- ♣ Oceânica - ondas

♣ Geotérmica

1.2.1 Eólica

Nos sistemas eólicos, turbinas eólicas são responsáveis por captar a energia cinética dos ventos e convertê-la numa forma útil. A energia cinética dos ventos rotacionam as pás de uma turbina eólica. As pás são conectadas ao eixo da turbina. O gerador converte a energia mecânica em energia elétrica.

A turbina eólica para geração de energia elétrica é composta pelos seguintes subconjuntos:

- ♣ Torre - é o elemento que sustenta o rotor e a nacela na altura adequada ao funcionamento da turbina eólica (esse item estrutural de grande porte é de elevada contribuição no custo inicial do sistema).
- ♣ Rotor - é o componente que efetua a transformação da energia cinética dos ventos em energia mecânica de rotação. No rotor são fixadas as pás da turbina. Todo o conjunto é conectado a um eixo que transmite a rotação das pás para o gerador, muitas vezes, através de uma caixa multiplicadora.
- ♣ Nacela - é o compartimento instalado no alto da torre e que abriga todo o mecanismo do gerador, o qual pode incluir: caixa multiplicadora, freios, embreagem, mancais, controle eletrônico, sistema hidráulico.
- ♣ Caixa de multiplicação (transmissão) - é o mecanismo que transmite a energia mecânica do eixo do rotor ao eixo do gerador.
- ♣ Gerador - é o componente que tem função de converter a energia mecânica do eixo em energia elétrica. Mecanismos de controle - as turbinas eólicas são projetadas para fornecerem potência nominal de acordo com a velocidade do vento prevalecente, ou seja, a velocidade média nominal que ocorre com mais frequência durante um determinado período.
- ♣ Anemômetro - Mede a intensidade e a velocidade dos ventos. Pás do rotor - Captam o vento e convertem sua potência ao centro do rotor.

- ♣ Biruta - Sensor que capta a direção e o sentido do vento, pois ele deve estar perpendicular à hélice para se obter um maior rendimento.

O regime dos ventos de um determinado lugar é o fator mais relevante para o aproveitamento energético. Ventos com baixa velocidade não têm energia suficiente para acionar as máquinas eólicas, (que só funcionam a partir de uma determinada velocidade), a qual normalmente varia entre 2,5m/s e 4,0m/s. Com o aumento da velocidade do vento, a potência no eixo da máquina aumenta gradativamente até atingir a potência nominal do aerogerador, a qual varia geralmente entre 9,5m/s e 15,0m/s. Para velocidades superiores à nominal, em muitas máquinas, a potência permanece constante até uma velocidade de corte superior, na qual a turbina deve sair automaticamente de operação para evitar que sofra danos estruturais. É importante saber que a potência disponível varia com o cubo da velocidade do vento, de forma que o dobro de velocidade representa um aumento de oito vezes nessa potência.

Em relação ao estágio de desenvolvimento, a energia eólica foi a fonte energética líder, dentre os novos sistemas incorporados à capacidade atual na Europa e nos Estados Unidos em 2015, e a segunda maior na China. Globalmente, o recorde de 63GW foi adicionado a um total de 433GW. Países fora da união europeia foram responsáveis pela maioria das novas instalações, liderados pela China, e novos mercados emergentes como África, Ásia e América Latina. Grandes corporações e outras entidades privadas continuam contribuindo para tornar a energia eólica mais confiável e com menor custo, enquanto grandes investidores foram atraídos pelo retorno estável. Somente o setor eólico offshore teve um incremento de 3.4GW conectados á rede, principalmente na Europa, atingindo um total de 12GW.

No Brasil, há cerca de 400 usinas instaladas, com 10 GW de capacidade instalada. Em construção, a capacidade é de 8,37 GW [29].

1.2.2 Solar - Fotovoltaica

A tecnologia consiste em transformar a luz do sol em energia elétrica, por meio de células fotovoltaicas, que aqui são referidas pela sigla PV, do inglês *photovoltaic*. A luz absorvida é transferida aos elétrons nos átomos da célula PV. Com a energia oriunda dessa nova fonte, os elétrons escapam de sua posição normal nos átomos do material semicondutor da célula PV, tornando-se parte da corrente em um circuito elétrico. Uma

propriedade elétrica especial da célula PV, denominada “campo elétrico produzido”, provê a força ou tensão requerida para mover a corrente elétrica por uma carga externa, tal como uma lâmpada por exemplo. Para induzir a formação do campo elétrico produzido dentro de uma célula PV, duas camadas de semicondutores de diferentes materiais são colocados em contato entre si. Uma camada é de semicondutor tipo “N” com abundância de elétrons, que possui carga negativa. A outra camada é do tipo “P” com abundância de espaços vazios, que possuem carga elétrica positiva.

Embora os dois materiais sejam eletricamente neutros quando considerados de forma separada, o tipo “N” tem excesso de elétrons e o tipo “P” possui excesso de espaços vazios. Juntando estes dois materiais cria-se uma interface P-N na junção de uma célula PV. Quando o tipo “N” e o tipo “P” entram em contato, o excesso de elétrons move do lado tipo “N” para o lado tipo “P”. O resultado é o estabelecimento de uma carga positiva ao longo da camada tipo “N” da interface e uma carga negativa ao longo do lado tipo “P” [30].

Os dois semicondutores comportam-se como uma bateria, criando um campo elétrico na superfície em que se encontram, chamada junção P/N. Ela é resultado do fluxo de elétrons e dos espaços vazios. O campo elétrico força os elétrons a se mover do semicondutor em direção à superfície negativa portando corrente. Ao mesmo tempo, os espaços vazios se movem na direção contrária, na direção positiva, onde eles aguardam pela chegada dos elétrons [31].

Uma célula individual produz uma potência baixa, da ordem de 1 a 2 W [32]. Para aumentar a potência de saída, as células precisam ser conectadas juntas formando um grande combinado de células chamado módulo. Os módulos, por sua vez, podem ser conectados formando uma matriz, que pode ser interconectadas para produzir mais potência. Conectando as células ou módulos em série, a tensão de saída pode ser aumentada. Por outro lado, a corrente de saída pode atingir valores maiores conectando as células ou módulos em paralelo.

A Figura 12, Figura 13 e Figura 14 são representativas da PV cell, módulo e matriz.

Do ponto de vista da energia fornecida pelo sol, faz-se necessário apresentar alguns conceitos. A densidade de potência, isto é, a potência por unidade de área perpendicular aos raios solares, logo abaixo da atmosfera, é conhecida como constante solar, sendo igual a 1366 W/m^2 . Este valor é reduzido cerca de 30% ao ultrapassar a camada atmosférica, resultando uma radiação na superfície terrestre de cerca de 1000 W/m^2 ao nível do mar



Figura 12: Célula fotovoltaica - adaptado de [30]

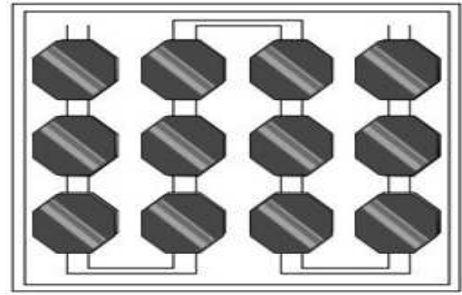


Figura 13: Módulo fotovoltaico - adaptado de [30]

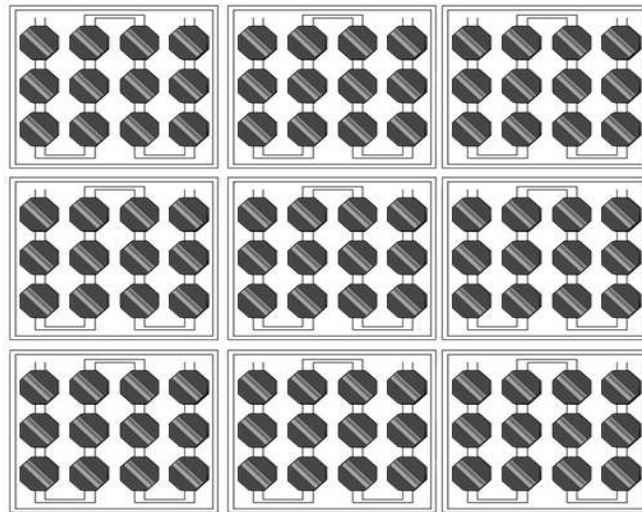


Figura 14: - Matriz de módulos fotovoltaicos - adaptado de [30]

num dia claro. Este valor é o adotado como padrão de máxima intensidade, e largamente utilizado para teste e calibração pelos fabricantes de painéis solares [33].

Outro aspecto relevante com relação a energia solar é a sua distribuição ao redor do planeta. A orientação da terra com relação ao planeta significa que a energia solar não é uniformemente distribuída. A incidência é maior nas regiões próximas a linha do Equador, enquanto nas regiões mais próximas aos polos norte e sul, a incidência é significativamente menor.

1.2.3 Energia das Marés, Ondas e Geotérmica

A exploração da Energia das Marés, Ondas e Geotérmica é muito incipientes no Brasil. Seja pelo foco dado a outras fontes renováveis mais abundantes, ou seja pela baixo potencial apresentado. O fato é que ambas demonstram pouca relevância na matriz energética brasileira, tanto no cenário atual quanto em termos de perspectivas.

Abaixo pode ser encontrado um breve apontamento de cada forma de energia.

- **Energia das Marés:** é um processo hidrodinâmico que converte energia das marés em eletricidade ou outra forma útil de energia. A maré é criada pelo efeito gravitacional do sol e da lua na terra, causando um movimento cíclico dos oceanos. O fenômeno das marés ocorre duas vezes a cada 24 h, 50 min, e 28 s[34]. As plantas que se utilizam da Energia das Marés podem ser categorizadas em dois tipos principais: Barragens e Turbinas, que se utilizam da energia potencial e cinética das marés, respectivamente[35].
- **Ondas:** são resultado dos efeitos do vento nos oceanos. Este vento se origina da maior fonte de energia do planeta, o sol. A energia contida nas ondas ao redor do mundo é enorme; em alguns lugares valores como 70 MW/km de onda são observados. Em teoria, poderia ser construído grandes estações que captariam toda essa energia das ondas e supriria todas as nossas necessidades. Porém há vários fatores que impedem este desenvolvimento de se tornar realidade. Identificar quais as áreas possuem alturas de onda adequadas tem que ser feito antes de qualquer instalação possa começar. As maiores concentrações de vento, dentre as áreas que mais ventam, são geralmente localizadas nas latitudes 40 e 60, tanto na região norte como na região sul do hemisfério[36].
- **Geotérmica:** Os tipos dominantes de plantas geotérmicas instaladas ao redor do mundo ultimamente, baseiam-se no uso de uma tecnologia adaptada para três tipos de recursos: (a) vapor direto (oriundo de sistemas controlados, como os Geysers nos EUA ou em Lardarello no Itália), (b) Vapor Úmido (advindo da separação da mistura água-vapor, como em Wairakei na Nova Zelândia), ou (c) Trocadores de calor de ciclo-binário. Todas essas plantas utilizam a energia calorífica contida na água e vapor, expelidos naturalmente ou bombeados de poços geotérmicos, convertendo a energia térmica e cinética em energia elétrica. As plantas que utilizam a alta pressão do vapor "seco" ou "úmido" são as mais comuns[37].

1.3 Sistemas de Dessalinização que se utilizam de fontes renováveis

1.3.1 Aspectos Técnicos

Nos últimos anos, várias sistemas de energias alternativas para processos de dessalinização (solar e eólica) tem sido competitivos em relação a sistemas que se utilizam de energias convencionais, provendo água potável limpa e segura, além de ambientalmente responsável[38].

A melhor combinação das tecnologias - Energia Renovável e Dessalinização - deve ser avaliada à luz de vários fatores como condições geográficas, topografia da região, capacidade e tipo de energia renovável de baixo custo disponível, infraestrutura local (incluindo rede de eletricidade), tamanho da planta e a salinidade da água a ser tratada. A seleção deve envolver ainda, critérios como robustez, simplicidade de operação, pouca manutenção, tamanho compacto, facilidade de transporte ao local de instalação. Enfim, preocupações pertinentes, principalmente se o local for remoto.

Numerosas tentativas e experimentos tem sido conduzidos ao redor do mundo, na tentativa de encontrar o melhor procedimento de escolha para combinar Energia Renovável e Dessalinização. A sustentabilidade de um determinado sistema de energia renovável para impulsionar certos processos de dessalinização, depende tanto dos requisitos do processo como da forma de energia provida pela fonte considerada. Diferente formas plausíveis de combinação entre sistema de energia renovável e tecnologias de dessalinização podem ser previstos[39].

A interface entre o sistema de energia renovável e a planta de dessalinização é determinada no ponto onde ocorre a transferência da energia para a planta. Esta energia pode ser de diferentes formas, tais como Energia Térmica, Eletricidade ou Potência num eixo. A Figura 15 mostra possíveis formas de combinação[40].

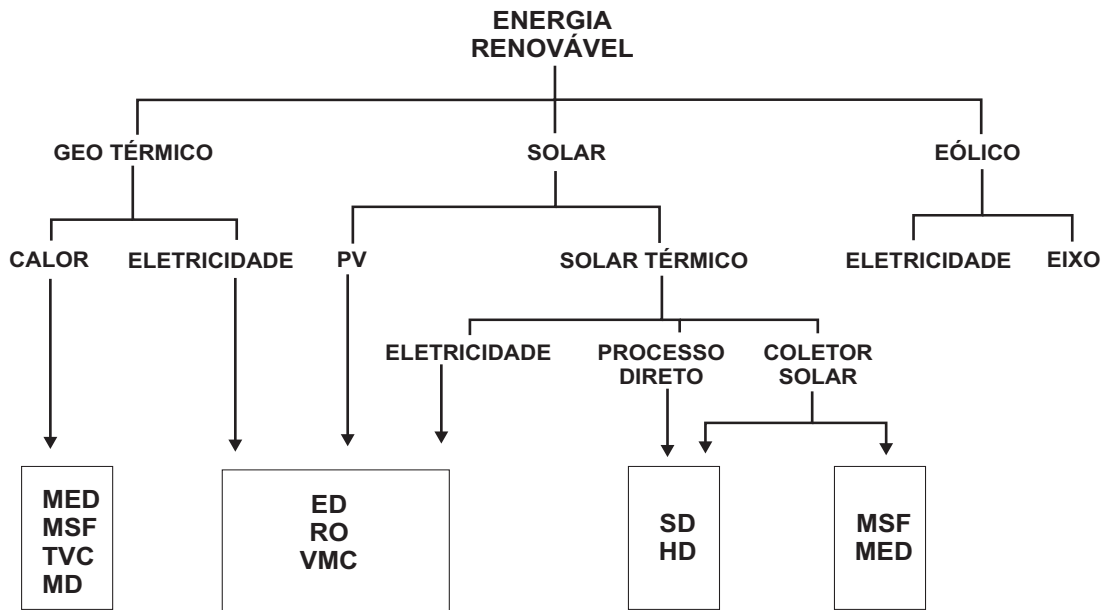


Figura 15: - Combinações de sistemas renováveis com métodos de dessalinização - Adaptado de [40]

A Figura 16 mostra o algoritmo a ser considerado no projeto da solução Sistema de Energia Renovável/ Dessalinização [41].

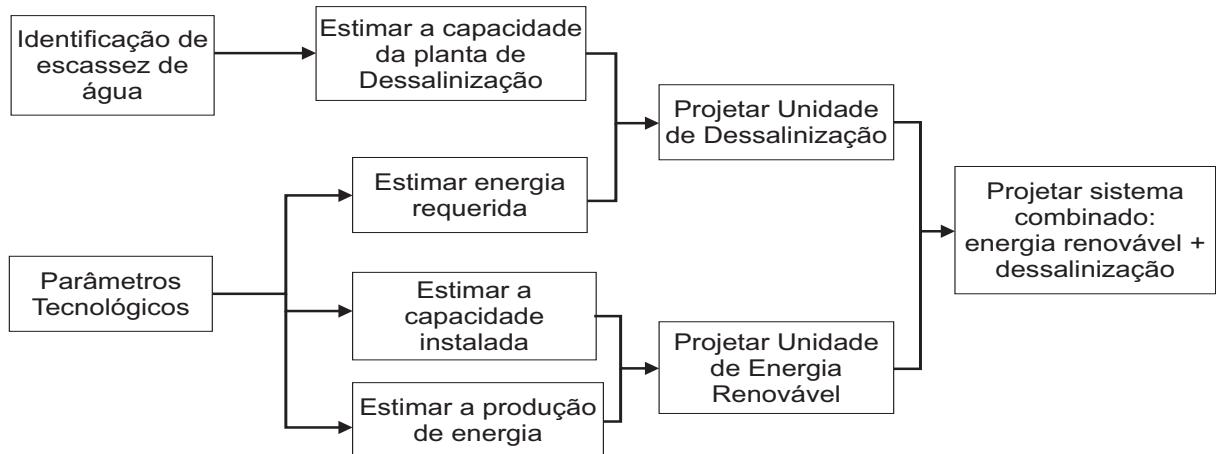


Figura 16: - Fluxograma de Projeto: Sistema de Energia Renovável/Dessalinização - Adaptado de [41]

Sob o ponto de vista das fontes de energia, em larga escala, a eólica pode ser mais atrativa dado que ela não exige muito mais do que grandes proporções de terra. Em processos de dessalinização com princípios térmicos, sistemas em larga escala são relativamente mais competitivos, devido às grandes perdas de calor que ocorrem em sistemas pequenos. Estudos que envolvem plantas de dessalinização movidas por energia

eólica já foram comprovadas serem viáveis tanto com Osmose Reversa (RO) como para Compressão Mecânica de Vapor (MVC)[42].

Outras recomendações de combinação podem ser encontradas na Tabela 5.

Tabela 5: Combinações recomendadas - Sistema Energia Renovável/Dessalinização - Adaptado de [40]

Fonte de água	Produto	Energia Re-novável	Tamanho do Sistema			Combinação recomendada
			1 a 50m3/d	50 a 250m3/d	> 250m3/d	
Água Salobra	Dessalinizada	Solar	*			Solar - Destilação
	Potável	Solar	*			PV-RO
	Potável	Solar	*			PV-ED
	Potável	Eólica	*	*		
	Potável	Eólica	*	*		
Água do Mar	Dessalinizada	Solar	*			Solar - Destilação
	Dessalinizada	Solar				Solar Térmico-MED
	Dessalinizada	Solar				Solar Térmico-MSF
	Potável	Solar	*			PV-RO
	Potável	Solar	*			PV-ED
	Potável	Eólico	*	*		Eólico-RO
	Potável	Eólico	*	*		Eólico-ED
	Potável	Eólico		*	*	Eólico-VC
	Potável	Geo Térmico		*	*	Geo Térmico - MED
	Potável	Geo Térmico			*	Geo Térmico - MSF

1.3.2 Avaliação Econômica

A análise financeira do investimento proposto envolve a estimação do capital e dos custos de operação, a estimação do custo descontado de água e a avaliação da expectativa do preço de venda da água[43].

Dadas as seguintes variáveis:

- ♣ PI - Índice de Lucratividade
- ♣ NPV - Valor Presente Líquido
- ♣ C_{INV} - Custo de Investimento Inicial
- ♣ SP_W - Preço de Venda da água
- ♣ Q_W - Capacidade da Planta Dessalinização
- ♣ SP_E - Preço de venda da energia elétrica
- ♣ Q_E - Excesso de energia vendida para a rede
- ♣ CR - Fator de recuperação de capital
- ♣ $C_{O\&M}$ - Custo anual de operação e manutenção
- ♣ R - Taxa de recuperação da planta
- ♣ DC_W - Custo de água descontado (outras receitas extraordinárias)

O índice de lucratividade (PI) é definido como a razão do valor presente líquido do investimento por unidade de capital inicial investido.

$$PI = \frac{NPV}{C_{INV}} \quad (1)$$

O valor presente líquido (NPV) do investimento é calculo por:

$$NPV = \frac{SP_W \times Q_W \times SP_E \times Q_E - C_{INV} \times CR - C_{O\&M}}{R}. \quad (2)$$

O custo de água descontado é função do investimento inicial e dos custos operacionais e de manutenção da RES e da planta de dessalinização. Tanto a unidade de dessalinização, quanto a unidade de produção de energia são levados em conta o custo estimado de água produzida. Caso a planta seja conectada à rede elétrica, a receita potencial da venda do excedente de energia, tem que ser excluída da análise, pois uma fração do custo da planta é coberta por esta receita, e ela não influencia o custo da água, dado por:

$$DC_W = \frac{C_{INV} \times R + C_{O\&M} - SP_E \times Q_E}{Q_W}. \quad (3)$$

O PI é usado para calcular o preço de venda esperado, baseado no custo descontado da RES/Planta Dessalinização. Levando em conta as equações (1) e (3), o preço de venda da água pode ser obtido de (4).

$$SP_W = \frac{C_{INV} \times R}{Q_W} \times PI + DC_W \quad (4)$$

A comparação entre as alternativas de combinações é baseada no preço estimado de venda da água, ou no custo geral descontado. Em suma constata-se que altos valores de PI levam a altas receitas e consequentemente mais lucrativo o investimento. Por outro lado, valores mais baixos de PI levam a valores mais baixos de preço de venda, tornando o investimento proposto menos atrativo quando comparado com outras alternativas de se obter água.

1.4 Conversores de Eletrônica de Potência Aplicados aos Métodos de Dessalinização

Esta seção visa apresentar o que foi encontrado na literatura, em relação ao uso de conversores de eletrônica de potência, em plantas que envolvam Plantas de Dessalinização movidas por Sistemas de Energia Renovável.

Como explorado nos itens anteriores, a tendência geral é combinar tecnologias de geração de energia térmicas (i.e. geotérmico e solar térmico), com processos de dessalinização de princípio térmico. Seguindo o mesmo raciocínio, sistemas eletromecânicos de geração devem ser combinados com processos de dessalinização que requerem energia elétrica ou mecânica.

O protagonismo dos conversores eletrônicos de potência é notável, quando o assunto é a combinação de uma fonte Renovável de Energia com um Planta de Dessalinização. A inerente intermitência das fontes renováveis, eleva a necessidade do uso de conversores de potência, para que a energia gerada pela fonte seja compatível com a carga.

Numa planta de dessalinização do tipo RO movida por energia solar, de forma típica, apresenta: Um gerador fotovoltaico que opera na sua máxima potência através de um conversor *boost* equipado com um *tracker* (MPPT). A transferência de energia do barramento CC até a carga é realizada utilizando um inversor. Para fazer o balanço entre o consumo e a produção, e garantir a operação da planta, é utilizado um banco de baterias equipado com um *chopper*.

Na planta com uma fonte eólica, apresentada em [44], o sistema de conversão de potência envolveu a seguinte topologia: (1) Um corretor de fator de potência PWM, para controlar a excitação da capacitância do gerador de indução da turbina. Este controlador é responsável pelo controle da excitação dos capacitores para produzir a excitação nominal do gerador de indução abaixo da velocidade nominal do vento, e proporcionar um enfraquecimento de campo para o gerador de indução acima da velocidade nominal do vento. (2) Um retificador e um *boost chopper* para maximizar a potência de saída da turbina. (3) Um Inversor (Variador de Frequência) para adequar a potência de saída da turbina eólica com as bombas presentes no sistema de dessalinização.

Um sistema híbrido de fonte de energia, é proposto em [24], onde uma fonte Eólica e PV propulsionam uma planta de dessalinização RO. A planta é capaz de produzir 1,8 m³/h. A topologia adotada prevê a conexão entre fonte e planta através de um link CC. O Gerador Eólico é conectado a um retificador e conectado ao link CC. O gerador PV e uma bateria são conectados a um conversor *boost* antes de serem conectados ao link CC. Um inversor de frequência faz o acionamento final dos motores das bombas da planta.

Um conversor CC foi utilizado em [45], numa planta experimental para água salina, de pequeno porte, da ordem de 200 mL/h. Nela, um painel fotovoltaico e um conversor CC/CC é aplicado a uma câmara de evaporação. A água salobra (alimentação do sistema) é aquecida pelo painel solar e entra na câmara de evaporação. Quando a radiação solar é plena e a temperatura de trabalho da câmara de evaporação é maior que um valor de referência dela, a eletricidade gerada pelo painel PV carrega a bateria através de um conversor CC/CC. Quando a temperatura de trabalho da câmara de evaporação atinge

um valor abaixo do valor de referência durante à noite, um aquecedor alimentado por um conversor CC/CC começa a trabalhar, mantendo portanto, a temperatura numa faixa aceitável.

O conversor CC/CC aplicado num sistema PVT (fotovoltaico e térmico) possui duas funções principais:

1. Carregar a bateria para armazenar a energia elétrica gerada pelo painel PV;
2. Acionar o aquecedor elétrico para prover calor adicional para a câmara de evaporação.

O alto custo de implantação perante a produtividade apresentada é o grande desafio desta proposição, visto que foi obtido apenas 200 mL de água. Embora como prova de conceito o resultado tenha sido positivo.

1.5 Considerações sobre o Estado da Arte

Há inúmeras referências relevantes sobre os assuntos Dessalinização e Sistemas de Energia Renovável. Especialmente quando são examinados isoladamente. Entretanto, no contexto da integração dos dois sistemas, observa-se uma lacuna no que diz respeito aos conversores de eletrônica de potência utilizados. De forma geral, as topologias são tratadas de forma superficial, sem entrar no mérito das escolhas.

No tocante aos métodos de dessalinização, cabe ressaltar que no Brasil o uso destes equipamentos ainda está restrito a consumidores industriais. Exemplo disso é o fato de ser comum encontrar um sistema de Osmose Reversa a bordo de uma plataforma de produção de petróleo, cuja função mais usual é suprir água de resfriamento para outros equipamentos que necessitam ser refrigerados. Dentro da realidade brasileira, o uso doméstico ainda não é observado, devido a baixa demanda por este tipo de produto. Por outro lado, em outros países, o uso de sistemas de osmose reversa domésticos é bastante comum. Desde equipamentos voltados a restaurantes, como outros voltados ao uso em veleiros. Exemplos é que não faltam de aplicações domésticas. Em relação a disponibilidade dos métodos, aqueles baseados em membranas, entre eles a osmose reversa, seguem como líderes no mercado mundial. Não obstante, o futuro deste mercado indica que não haverá o domínio de uma só tecnologia, mas sim uma composição de várias tecnologias associadas, cada uma contribuindo com uma parte do processo de purificação da água.

De acordo com a literatura, os sistemas MPPTs mais utilizados são o P&O (Pertubar e Observar) no sistema Eólico e o INC (*Incremental Conductance*) no sistema Fotovoltaico. Basicamente devido a serem algoritmos simples, que demandam pouco sensoramento e de fácil implementação. Sob o ponto de vista teórico, estes argumentos são convincentes. Contudo, vale destacar que o bom funcionamento destes algoritmos está fortemente amparado na existência de uma curva de perfil parabólica da potência. O que significa dizer que os algoritmos foram concebidos para buscar o ponto de máxima potência, considerando que o ponto de máxima potência seja único. Esta premissa, contudo, pode não ser verdadeira, especialmente para sistemas fotovoltaicos que possam estar sob efeito de sombreamento. Neste caso, a curva de potência pode assumir vários picos, tornando o algoritmo ineficiente. Para estes casos, um algoritmo inteligente, utilizando lógica *fuzzy* ou redes neurais é fortemente recomendado.

2 A PLANTA

Este capítulo apresenta uma visão geral da planta que se deseja projetar. São definidos limites e parâmetros de cada sub sistema.

2.1 Definição da Planta

Dentre as tecnologias disponíveis, as quais foram amplamente discutidas no capítulo anterior, a escolhida para o desenvolvimento foi a Osmose Reversa.

A razão da escolha se deve aos seguinte fatores:

- ♣ tecnologia bastante difundida e dominada;
- ♣ fácil operação e manutenção;
- ♣ soluções comerciais disponíveis;
- ♣ ampla faixa de soluções (capacidades);
- ♣ baixo consumo de água;
- ♣ uma das técnicas mais eficientes do ponto de vista energético - demanda 3 a 5 kWh de energia elétrica por m³ de água produzida.

Explorando o assunto eficiência energética, a Tabela 6 apresenta um comparativo das demandas típicas de energia, entre os principais métodos.

Tabela 6: - Demandas típicas de energia em Processos de Dessalinização [46]

Processos/tipo de energia	MED	MSF	MVC	RO
Pressão motriz de vapor, ata	0.2 - 0.5	1.0 - 2.5	-	-
Energia elétrica média equivalente, kWh/m ³	4.55	14		
Consumo eletricidade, kWh/m ³	1.2 - 2.0	3.0 - 4.0	8.5	3.5 - 5
Total de energia elétrica equivalente, kWh/m ³	5.7 - 6.5	17 - 18	8.5	3.5 - 5

Há vários *skids* de dessalinização disponíveis comercialmente. Diversos fabricantes proporcionam uma ampla gama de produção de água potável. A Tabela 7 apresenta algumas das soluções disponíveis no mercado.

O que se pode observar pela pesquisa nos catálogos dos fabricantes é que, os grandes fabricantes como Siemens, GE e Veolia tendem a focar o mercado de grandes consumidores, o que faz com que os menores *skids* demandem uma potência superior a 15kW.

Tabela 7: - Exemplos de skids comerciais

Fabricante	Modelo	Consumo de Energia (kW)	Capacidade de produção m^3 /dia	kWh/m ³	Tensão
Axeon	S3-1125	2,5	2,271	26,4	220 VAC , 1 fase
	S3-2125	2,5	4,542	13,2	220 VAC , 1 fase
	S3-3125	2,5	6,814	8,8	220 VAC , 1 fase
	S3-4125	2,5	8,328	7,2	220 VAC , 1 fase
	LennRO SW 100	2,2	2,4	22	400 VAC
Lenntech	LennRO SW 250	3	6	12	400 VAC
	LennRO SW 500	4,5	12	9	400 VAC
	LennRO SW 1000	9	24	9	400 VAC
	LennRO SW 1500	13	36	8,7	400 VAC
	LennRO SW 2000	18	48	9	400 VAC
	LennRO SW 3000	22	72	7,3	400 VAC
	Selmar Technologies	PACIFIC 90/CS	1,8	2,64	16,4
PACIFIC 150/CS		2,2	4,08	12,9	230 VAC
PACIFIC 220/CS		2,2	5,28	10	230 VAC
PACIFIC 280/CS		2,2	7,20	7,3	230 VAC
TSW11		2,2	2,10	25,1	380V
TSW12		2,2	4,10	12,9	380V
TSW13		2,2	5,70	9,3	380V
Temak	TSW14	2,2	6,90	7,7	380V
	TSW16	2,2	9,10	5,8	380V
	TSW18	2,2	10,60	5	380V
	TSW19	2,2	11,00	4,8	380V
	Applied	S-24A	3,72	6	14,9
S-34A		5,59	11	12,2	230-460
S-44A		7,45	23	7,8	230-460
S-64B		14,91	37	9,7	230-460
Veolia	D-25	18	25,44	17	230VAC ,2 fases ou 400VAC, 3 fases
	D-50	22	50,88	10,4	230VAC ,2 fases ou 400VAC, 3 fases
	D-75	22	76,32	6,9	230VAC ,2 fases ou 400VAC, 3 fases
	D-100	30	101,76	7,1	230VAC ,2 fases ou 400VAC, 3 fases
	D-125	44	127,2	8,3	230VAC ,2 fases ou 400VAC, 3 fases
	D-150	44	152,4	6,9	230VAC ,2 fases ou 400VAC, 3 fases

Por outro lado, outros fabricantes apresentam soluções de baixo consumo, com potências inferiores a 10kW. O motor trifásico, de eficiência superior ao monofásico, é uma opção em quase todos fabricantes.

Olhando pelo lado do consumo de água que busca-se suprir, deve-se ter em mente que o consumo diário de água é muito variável ao redor do mundo. Além da disponibilidade do local, o consumo médio de água está fortemente relacionado com o nível de desenvolvimento do país e com o nível de renda das pessoas. Uma pessoa necessita de, pelo menos, 40 litros de água por dia para beber, tomar banho, escovar os dentes, lavar as mãos, cozinhar etc. Dados da ONU, porém, apontam que um europeu, que tem em seu território 8% da água doce no mundo, consome em média 150 litros de água por dia. Já um indiano, consome 25 litros por dia[47]. Segundo a ONU (Organização das Nações Unidas), 0,11m³ (110 litros) de água por dia é suficiente para atender as necessidade

básicas de uma pessoa. Como $0,11 \text{ m}^3$ aparenta ser um número muito restritivo, será considerado como valor padrão o consumo de um europeu. Assim, pode-se concluir que com um *skid* de consumo $5,3\text{kW}$ seria possível abastecer 40 pessoas.

Para o presente trabalho será tomado como base o modelo de planta de dessalinização do fabricante Applied, modelo S-34A. A razão da escolha foi a capacidade de abastecimento que será atingido com esse modelo, em torno de 80 pessoas. Tendo como premissa um padrão de consumo europeu.

O suprimento da planta de dessalinização será por um sistema híbrido, Solar PV e Eólico, com a seguinte distribuição no sistema de geração: Solar PV de $6,4 \text{ kW}$ e Eólico de 3 kW .

Como pode chamar a atenção, a distribuição das fontes não é simétrica, e isso ocorreu por algumas razões. A principal delas foi a de contar com um Aerogerador que não demandasse uma instalação onerosa. Neste sentido, aerogeradores maiores do que o escolhido, sendo este um equipamento de 70 kg , demandaria grandes obras civis para sua instalação, o que fugiria da intenção deste trabalho. Vale destacar que uma das intenções deste trabalho é discutir um sistema de implantação viável, seja para um viés acadêmico, seja para atender um problema prático.

Além das fontes de energia supracitadas, o sistema contará com um sistema de baterias, capaz de suprir demandas pontuais, sobretudo de intermitências e flutuações pontuais do sistema de geração. Não se objetiva, contudo, implementar grandes sistemas de baterias, os quais por sua vez demandam grandes infra-estrutura de instalação, além de uma manutenção onerosa.

Do ponto de vista da Eletrônica de Potência, foco deste trabalho, serão discutidos duas topologias de Sistema. A Figura 17 e Figura 18 apresentam um esquema geral dos sistemas. Os detalhes destas implementações estão disponíveis nos capítulos posteriores.

O detalhamento das duas propostas será o escopo dos próximos capítulos.

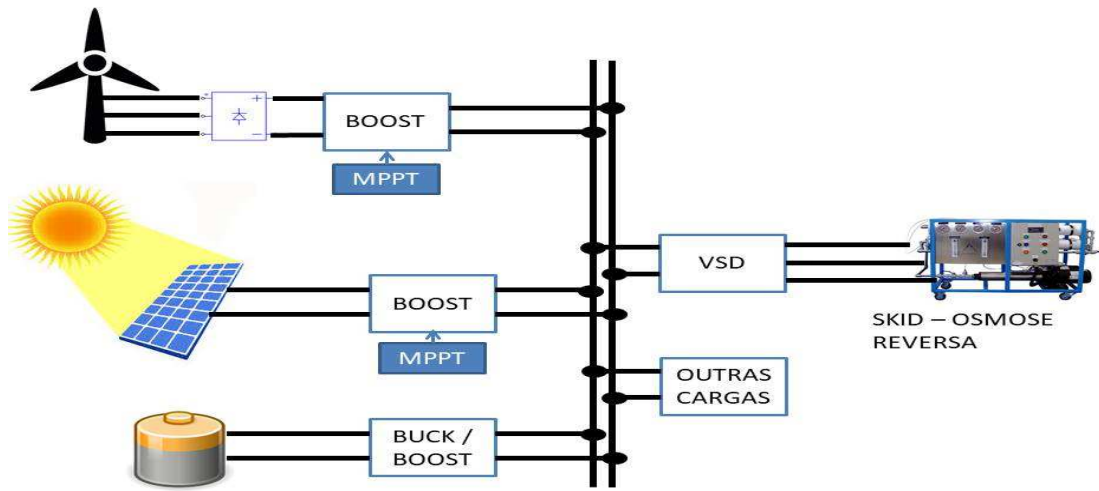


Figura 17: - Circuito geral da planta - Topologia Sistema 1

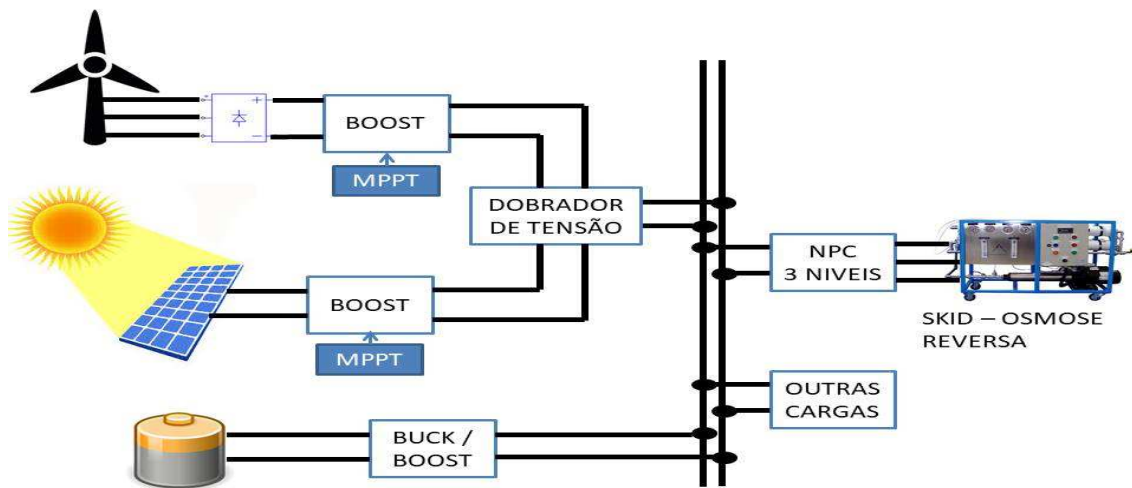


Figura 18: - Circuito geral da planta - Topologia Sistema 2

3 MODELAGEM DA PLANTA - TOPOLOGIA SISTEMA 1

Este capítulo será dedicado ao detalhamento da topologia proposta na Figura 17. Para efeitos de projeto, a planta será abordada a partir de cada subsistema conforme abaixo:

- ♣ Sistema Eólico;
- ♣ Sistema Solar;
- ♣ Sistema de Bateria;
- ♣ Osmose Reversa.

3.1 Sistema Eólico

3.1.1 Modelagem matemática

Como mencionado no capítulo anterior, um sistema de conversão de Energia Eólica transforma energia cinética em energia mecânica utilizando pás rotativas. Esta energia é então transformada em energia elétrica por meio de um gerador. A seguir são apresentadas as equações pertinentes, tomando-se como base a Figura 19.

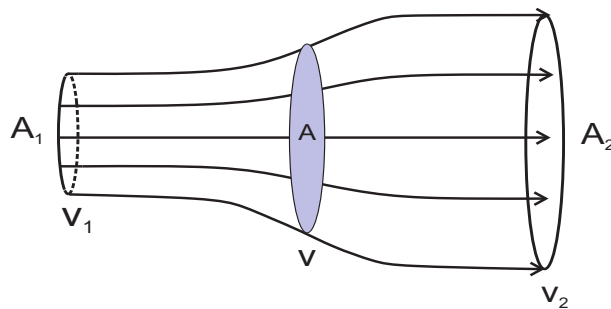


Figura 19: - Perfil de Velocidades

Premissas:

- o número de pás é infinito;
- o arraste é desprezível;
- o fluxo de entrada e saída é axial;

- o fluido é incompressível.

Aplicando-se a equação da conservação de massa ao volume de controle representado pelo disco na Figura 19, obtém-se:

$$\dot{m} = \rho A_1 v_1 = \rho A v = \rho A_2 v_2 \quad (5)$$

onde v_1 é a velocidade à montante do rotor, v_2 é a velocidade à jusante do rotor e v é a velocidade do fluido nas hélices. ρ é a densidade do fluido, e A a área da turbina. A_1 e A_2 são as áreas antes e depois da turbina. Portanto, o produto da densidade, área e velocidade devem ser iguais em cada uma das regiões consideradas.

A força exercida pelo rotor sobre o vento é igual a massa de ar multiplicada pela sua aceleração, e pode ser expressa como:

$$F = m \frac{dv}{dt} \quad [N] \quad (6)$$

$$F = \dot{m} \Delta v \quad [N] \quad (7)$$

aplicando-se (5) em (7), tem-se:

$$F = \rho A v (v_1 - v_2) \quad [N] \quad (8)$$

a força pode ser reescrita como:

$$F = \frac{dE}{dx} \quad [N] \quad (9)$$

como a potência é definida por:

$$P = \frac{dE}{dt} \quad (10)$$

substituindo (9) em (10), obtém-se:

$$P = F \frac{dx}{dt} \quad [W] \quad (11)$$

$$P = F v \quad [W] \quad (12)$$

substituindo-se (8) em (12):

$$P = \rho \cdot A \cdot v^2 \cdot (v_1 - v_2) \quad [W] \quad (13)$$

Entretanto a potência também pode ser expressa em função da energia cinética.

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} \quad [W] \quad (14)$$

$$P = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad [W] \quad (15)$$

Utilizando-se de (5) em (15):

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad [W] \quad (16)$$

Igualando as expressões (13) e (16), tem-se:

$$P = \rho \cdot A \cdot v^2 \cdot (v_1 - v_2) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad [W] \quad (17)$$

Após algumas manipulações algébricas conclui-se que:

$$v = \frac{1}{2} \cdot (v_1 + v_2) \quad [m/s] \quad (18)$$

Substituindo-se (18) em (16)

$$P = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A \cdot (v_1 + v_2) \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad [W] \quad (19)$$

$$P = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3 \left(1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 + \left(\frac{v_2}{v_1} \right) + \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^3 \right) \quad [W] \quad (20)$$

Para se descobrir o valor máximo da Potência, deriva-se (20) com relação a $\frac{v_2}{v_1}$, que resulta em $\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{3}$. Substituindo-se este valor em (20):

$$P_{max} = \frac{16}{27} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad [W] \quad (21)$$

onde $\frac{16}{27}$ é valor do coeficiente de potência (C_p) em seu valor máximo. A existência deste limite é uma consequência da Lei de Betz, que explica o máximo de potência extraída

do vento é 59,3% do total disponível. Em outras palavras, não é possível extrair 100% da energia do vento uma vez que a velocidade do vento após a turbina não pode ser 0. Embora a *Lei de Betz* indica que o máximo teórico de extração de potência é 59%, na prática, a real eficiência da turbina eólica é ligeiramente inferior[30].

Com a consideração do coeficiente de potência, a expressão da potência fica:

$$P_{total} = \frac{1}{2} \rho \cdot C_p \cdot R^2 \cdot \pi \cdot v_1^3 \quad (22)$$

O coeficiente de potência C_p depende do projeto específico da turbina eólica, especialmente a estrutura aerodinâmica particular das pás.

Cada turbina eólica possui seu próprio coeficiente de potência, o qual depende principalmente do fator λ , a relação da velocidade de ponta. A equação (23) apresenta a expressão de λ , onde ω é a velocidade angular e R o raio das pás:

$$\lambda = \frac{R \cdot \omega}{v}; \quad (23)$$

Além disso, o coeficiente de potência depende do ângulo de passo (β), o qual é definido como o ângulo entre a superfície das pás e o plano do rotor.

Existem na literatura diversas expressões para o coeficiente de potência, contudo será utilizada neste trabalho a expressão desenvolvida por [48]. O coeficiente de potência $C_p(\lambda, \beta)$ é uma função de λ e β e dada por:

$$C_p = c_1 * (c_2 - c_3\beta - c_4\beta^x - c_5) * e^{-c_6} + c_7, \quad (24)$$

onde $c_1 = 0,5$, $c_2 = 116 * \lambda'$, $c_3 = 0,4$, $c_4 = 0$, $c_5 = 5$, $c_6 = 21 * \lambda'$, $c_7 = 0,01 * \lambda$ e $\lambda' = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1}$.

3.1.2 Aerogerador

Foi escolhido um modelo de 3kW de potência nominal, do fabricante HY Energy. A Figura 20 apresenta o modelo escolhido.

A Tabela 8 traz os detalhes técnicos.



Figura 20: - Modelo Comercial HY 3000 - Fabricante HY Energy - Extraído de [49]

Tabela 8: - Dados Fabricante [49]

Dados Técnicos	
Fabricante	HY ENERGY
Modelo	HY 3000
Potência Nominal	3000 W
Velocidade de corte	2,5 m/s
Velocidade Nominal do Rotor (RPM)	700
Velocidade nominal do Vento	12 m/s
Numero de pás	5
Diâmetro do Rotor	3m
Área (A)	7,07 m ²
Peso líquido	70 kg

O fabricante forneceu dados de performance por email, conforme Tabela 9.

Tabela 9: - Dados Desempenho do Fabricante - [obtido por email]

HY 3000L WIND TURBINE TESTING DATA											
sem carga											
rpm	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
Vdc V	51	59	68	76	85	93	102	110	119	128	135
Vac V	47	53	59	65	72	78	74	90	97	103	109

De posse destas informações e com o auxílio do *software* PSIM, foi possível obter um modelo do gerador. O circuito da Figura 21 foi montado para levantar a curva de desempenho do modelo.

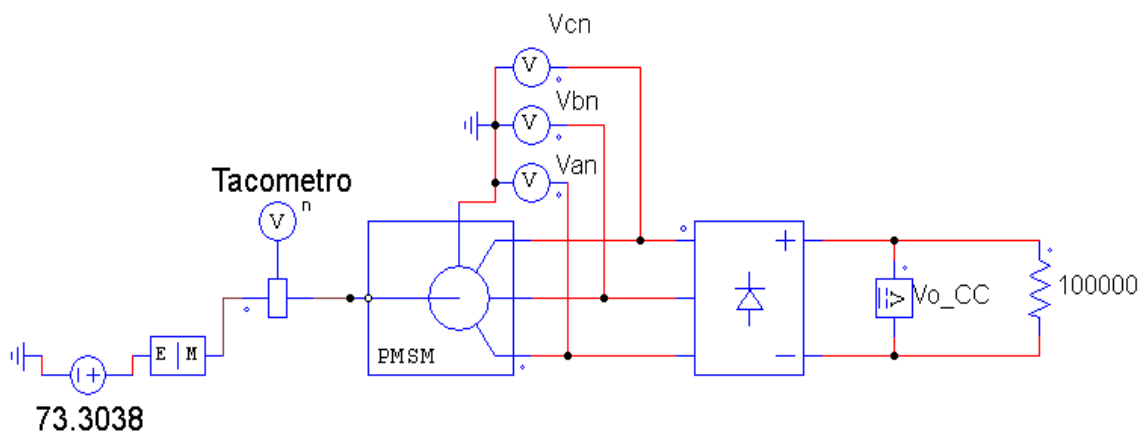


Figura 21: - Circuito para validação do modelo de gerador - PSIM

Alguns dados do gerador foram estimados e outros fornecidos pelo fabricante. A Figura 22 apresenta a caixa de diálogo e os dados inseridos. O dado $V_{pk}/krpm$ foi calculado fazendo uma extrapolação da tensão $V_{cc}@1000rpm$. Esta extrapolação é possível a partir da Tabela 9. Assim $V_{cc}@1000 rpm$ é 170,67 V. Tomando a expressão da serie de Fourier para uma tensão retificada a ponte completa de diodos, obtém-se:

$$V_{ret} = 1,35 \cdot V_{LL}$$

Como $V_{ret} = 170,67$, obtém-se $V_{LL} = V_{ret}/1,35 = 126,42$. Para obter a tensão de pico, basta multiplicar por $\sqrt{2}$, obtendo-se $V_{pk}/krpm = 178,7846$.

Voltando ao circuito de validação, e variando-se a entrada de velocidade no range de 300 rpm a 800 rpm, obtém-se os dados simulados e foi possível comparar com dos dados fornecidos pelo fabricante. Ver Figura 23. Pode-se notar que o resultado foi satisfatório.

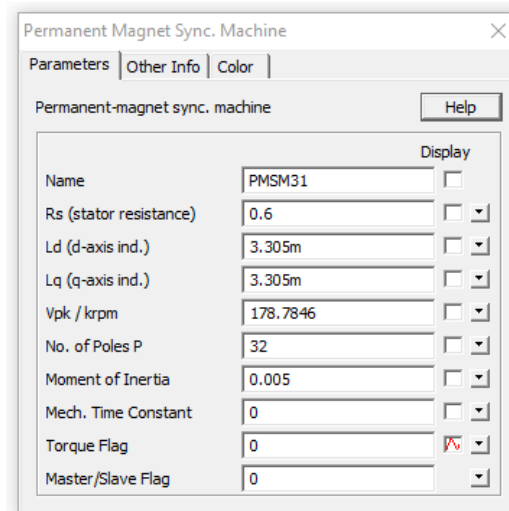


Figura 22: - Modelo e Caixa de diálogo do modelo de Gerador

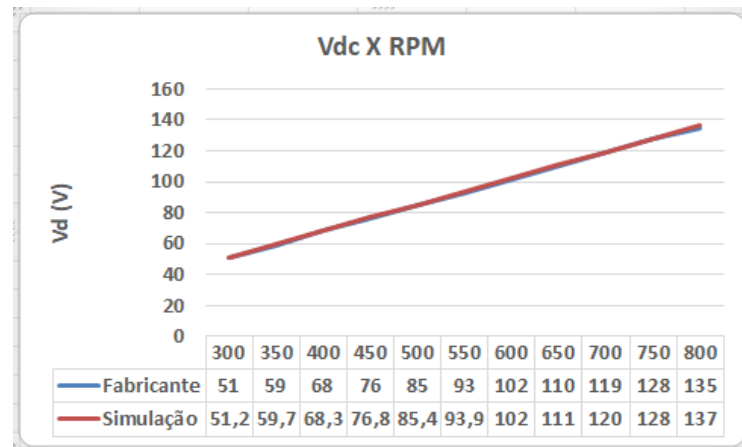


Figura 23: - Comparação das curvas do Gerador: Fabricante x Simulação

Outro dado não informado pelo fabricante foi o ângulo β . Para encontrá-lo recorre-se ao seguinte processo: Calcular o C_p equação da Potência (equação (22)), assim:

$$C_p = \frac{2 \cdot P}{\rho \cdot R^2 \cdot \pi \cdot v^3} = 0,40 \quad (25)$$

Da equação (23), com $\omega = 700$ rpm (73,30 rad/s), $R = 3$ metros e $v = 12$ m/s, obtém-se:

$$\lambda = \frac{R \cdot \omega}{v} = 9,16 \quad (26)$$

Aplicando-se os valores de C_p e λ na equação 24, e com o auxílio do Matlab para o

cálculo iterativo, obtém-se o valor de $\beta = 3,98^\circ$. A Figura 24 apresenta a curva C_p para a turbina HY 3000.

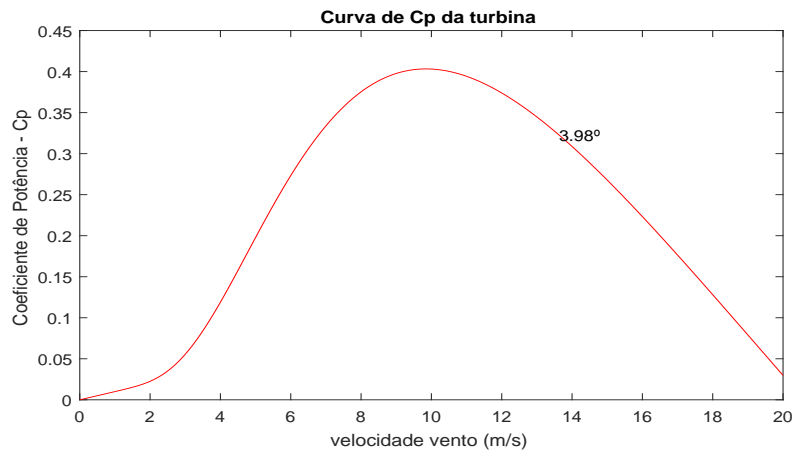


Figura 24: - Curva C_p

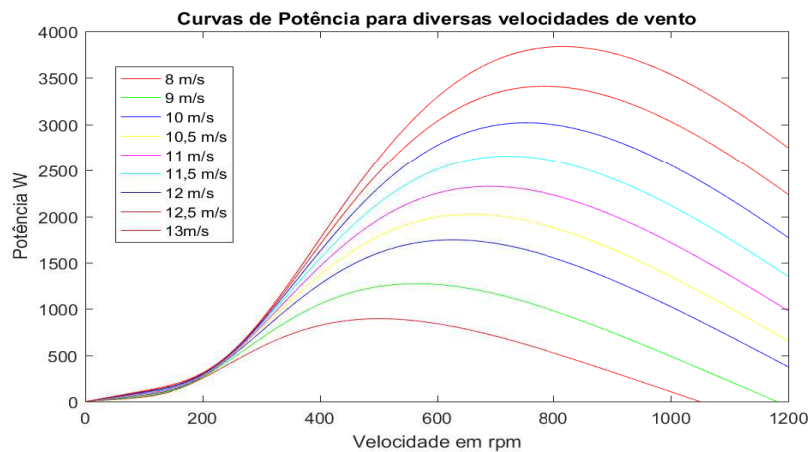


Figura 25: - Curvas de Potência

Tendo estimado o Gerador, a etapa seguinte foi estimar o modelo da turbina eólica. O software PSIM apresenta um modelo de turbina eólica conforme Figura 26. Contudo ao utilizar esta interface depara-se com valores que não reproduziam aqueles informados pelo fabricante. Em poucas palavras, o modelo padrão não traduzia, conforme esperado, a relação entrada (velocidade de vento) com a respectiva saída (velocidade do eixo em rpm). Para contornar esta situação, foi desenvolvido um modelo de turbina específico, inserindo todas as equações matemáticas pertinentes.

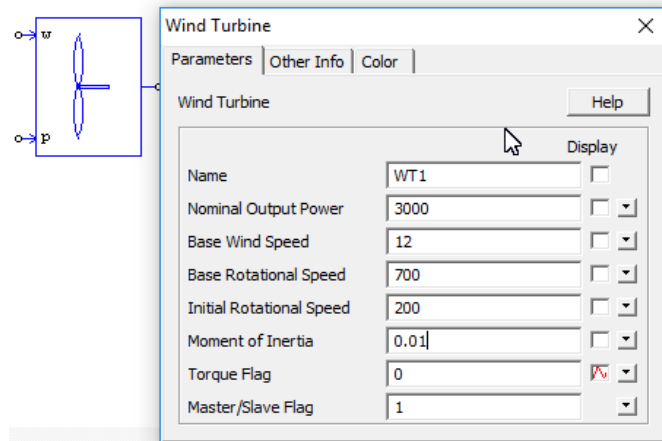


Figura 26: - Caixa de diálogo: *Wind Turbine*

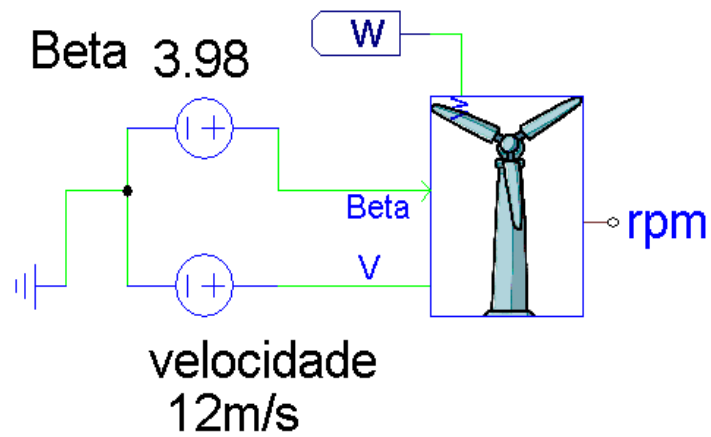


Figura 27: - Representação Simplificada do Circuito da Figura 28

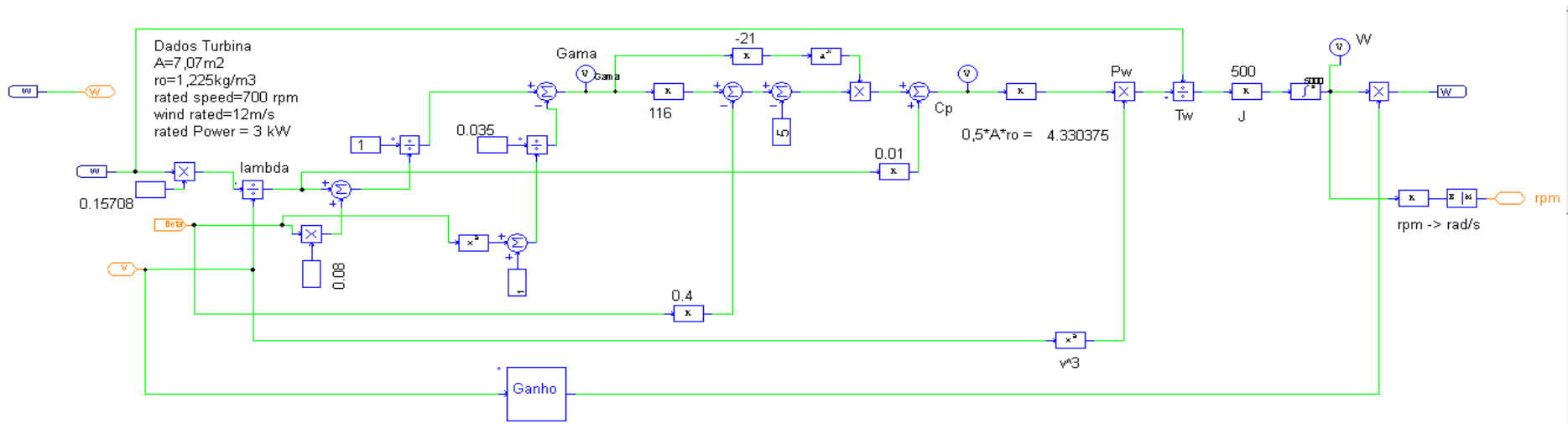


Figura 28: - Circuito que emula o funcionamento da Turbina Eólica

Basicamente as equações dinâmicas implementam as mesmas condições do bloco nativo do PSIM, a diferença fica por conta do bloco de Ganhos (Figura 28), que permite a manipulação da saída, sem no entanto, comprometer o comportamento dinâmico da turbina.

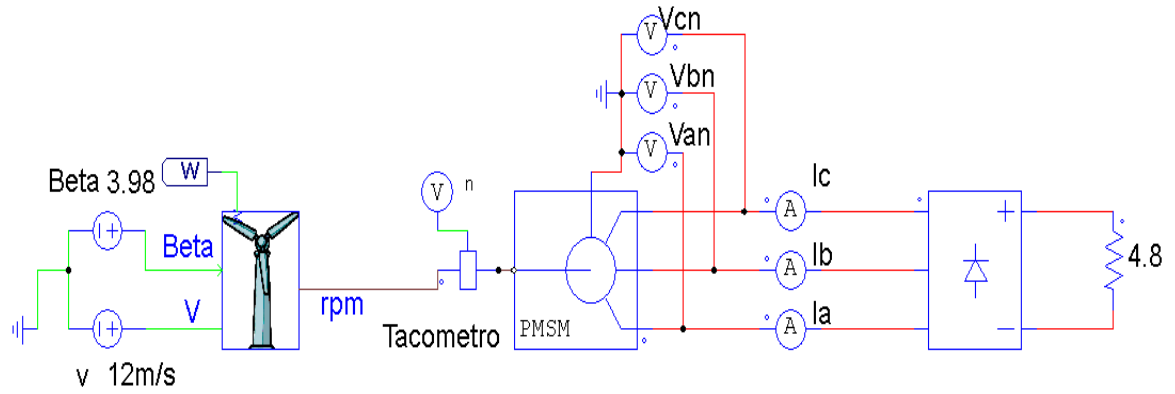


Figura 29: - Circuito Turbina-Gerador-Retificador

3.1.3 Filtro LC e Conversor Boost

A retificação a diodos de uma fonte de tensão trifásica implica geração de harmônicos de 5^a, 7^a, 11^a, 13^a e assim por diante [50]. Esta condição pode ser verificada na Figura 31, que apresentam sinais no tempo e na frequência da corrente para a condição de vento mínimo (9m/s).

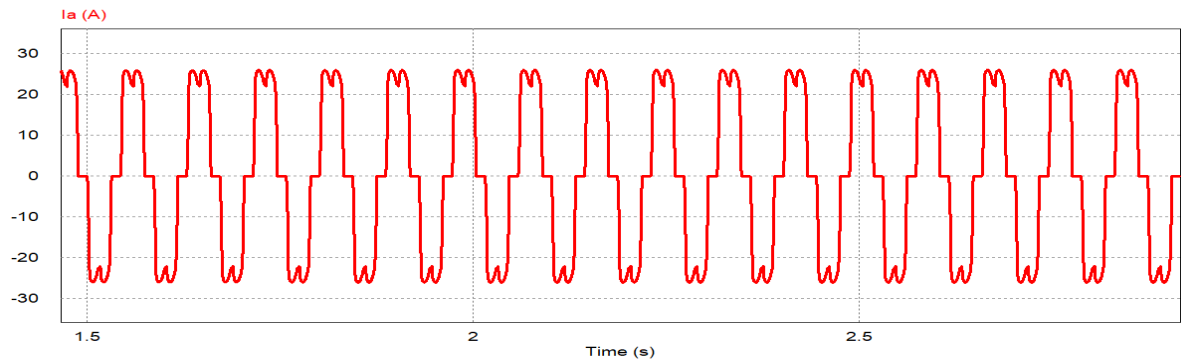


Figura 30: - Corrente Gerador - domínio do tempo

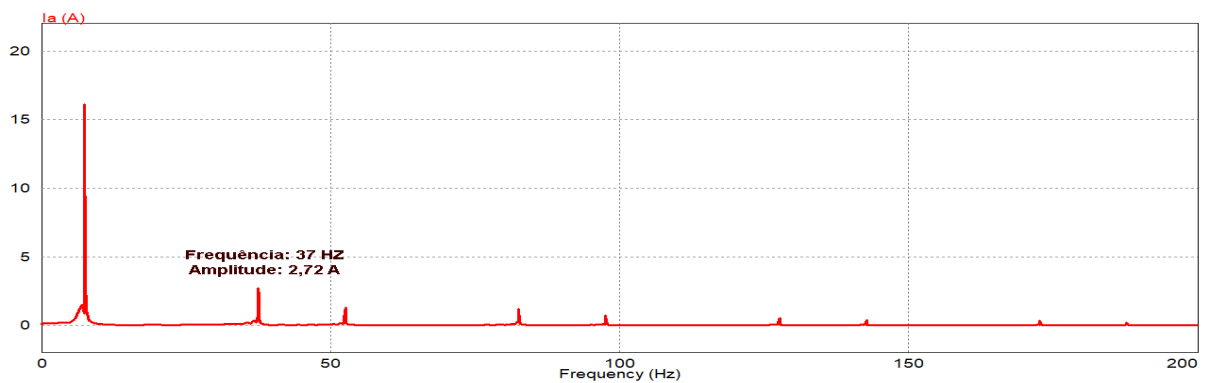


Figura 31: - Corrente Gerador - domínio da frequência

Com esta informação foi especificado um filtro LC para atenuar estas componentes harmônicas. Conforme [51]:

$$L_{min} \geq \frac{0,0129 \cdot V_{LL}}{f_o \cdot I_d} \geq 226mH \quad (27)$$

$$C_{min} \geq \frac{0,077 \cdot V_{LL}}{36 \cdot f_o^2 \cdot V_{ret} \cdot Rfv} \geq 4,6\mu F \quad (28)$$

Para a especificação dos componentes do conversor boost os vários cenários ope-

Tabela 10: -Dados para cálculo filtro LC

Dados	
Velocidade vento	9m/s
Potência	1200 W
V_{LL}	51,85 V
V_{ret}	70
Id	15,71 A
Frequência	37 Hz
Fator de <i>ripple</i>	1%

racionais foram considerados. Desde a condição definida como range mínimo (9m/s de velocidade de vento) , como a condição nominal (12m/s de velocidade do vento) . A decisão de considerar o range mínimo como 9m/s, advém do fato de que para 9m/s tem-se como tensão retificada 76V. Com 76V, o *Duty Cycle* necessário para obter a tensão desejada no link CC seria de 0,83. Em outras palavras, caso fosse considerado um valor abaixo de 9m/s seria necessário um *Duty Cycle* superior a 0,83 o que não é tecnicamente viável.

Tabela 11: - Cenários Operacionais - Aerogerador

Condições Operacionais		
-	min.	max.
Potência	1200 W	3000 W
Velocidade do vento	9m/s	12m/s
Tensão retificada	76 V	120 V
Frequencia chaveamento	10 kHz	
Fator de <i>ripple</i> (Rfv)	1%	

Tendo em vista que a tensão de alimentação (V_{LL} tensão eficaz linha-linha) do motor a ser acionado por um inversor PWM (*Pulse-Width-Modulation*) é 230 V (V_d) , o valor da tensão no link CC pode ser calculado conforme [50], e dado por:

$$V_{LL\text{linha-linha},rms} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}}ma \cdot V_d \quad (29)$$

$$V_{LL\text{linha-linha},rms} = 0,612 \cdot ma \cdot V_d \quad (30)$$

$$V_d = 469,77; \quad \text{com } ma=0,8 \quad (31)$$

$$V_d = 417,57 \quad \text{com } ma=0,9 \quad (32)$$

onde m_a é a taxa de modulação.

A Tabela 12 apresenta os cálculos do conversor *boost*.

Tabela 12: - Cálculo *Boost*

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
V_d	469,77	417,57	469,77	417,57
m_a	0,9	0,8	0,9	0,8
Potência Aerogerador	3000 W	1200 W	3000 W	1200 W
Tensão Retificada	120 V	76 V	120 V	76 V
Corrente I_{in}	25 A	16,77 A	25 A	16,77 A
R	73,56	58,12	173,08	136,76
D (<i>duty ratio</i>)	0,74	0,71	0,83	0,81
I_o	6,38 A	7,18 A	2,71 A	3,05 A
L (μ H)	178	171	190	185
C (μ F)	101	122	48	59

Tomando-se os maiores valores de indutor e capacitor calculados na Tabela 12, tem-se $L = 190\mu H$ e $C = 122\mu F$. Em valores comerciais: $L=1mH$ e $C=1mF$.

3.1.4 Controle MPPT

Como apresentado na Figura 25, para cada velocidade de vento existe um ponto máximo de potência possível. Neste sentido, para que este ponto seja perseguido faz-se necessário a implementação de um algoritmo do tipo MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) que force o aerogerador a trabalhar no seu ponto de máxima potência de operação. Existem na literatura diversos métodos e algoritmos MPPT, dos mais diversos tipos, utilizando sensores, lógica *fuzzy*, gradientes de aproximação e outros [52] [53]. Em [54] e [55] é possível encontrar um estudo comparativo dos métodos.

O algoritmo adotado neste trabalho foi o P&O (*Perturb and Observe*), um método clássico e com baixo custo de implementação. O fluxograma da Figura 32 apresenta este método [55].

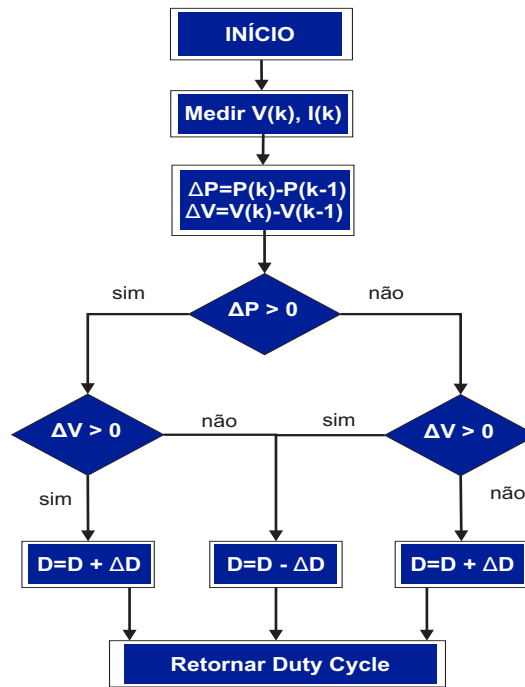


Figura 32: - Fluxograma: Algoritmo P&O - Adaptado de [55]

Como pode ser observado no fluxograma o principal responsável pelo MPPT (rastreamento de máxima potência) é o conversor *boost*, pois o seu D (*Duty Cycle*) é a variável controlada do sistema de controle. É baseado no seguinte critério: Figura 33, se a tensão de operação é perturbada numa determinada direção e $dP/dV > 0$, é sabido que a perturbação move o ponto de operação na direção do MPP, desta forma o algoritmo P&O continuaria então a perturbar a tensão do gerador na mesma direção. Por outro lado, se $dP/dV < 0$ a mudança no ponto de operação seria no sentido contrário (afastando-se) do MPP, e o algoritmo P&O reverteria a direção da perturbação. Em outras palavras, o sistema trabalha aumentando e diminuindo a tensão de operação e observando seu impacto na potência de saída [56].

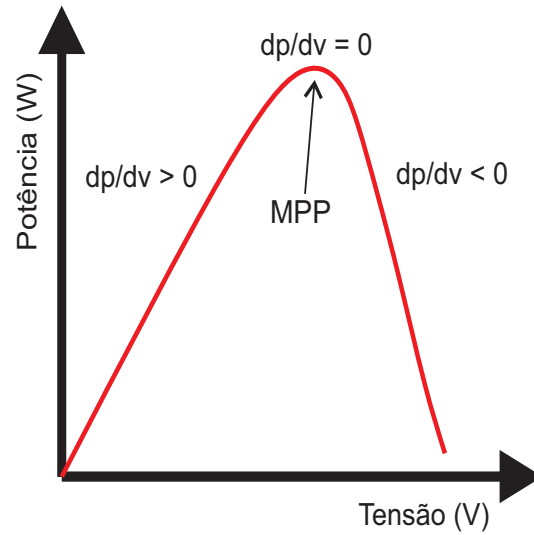


Figura 33: - Sinal de dP/dV em diferentes posições da curva de potência

A Figura 34 mostra o circuito com *boost* e o controle MPPT implementados. O algoritmo MPPT, do tipo P&O, foi implementado em código C na ferramenta disponível no PSIM.

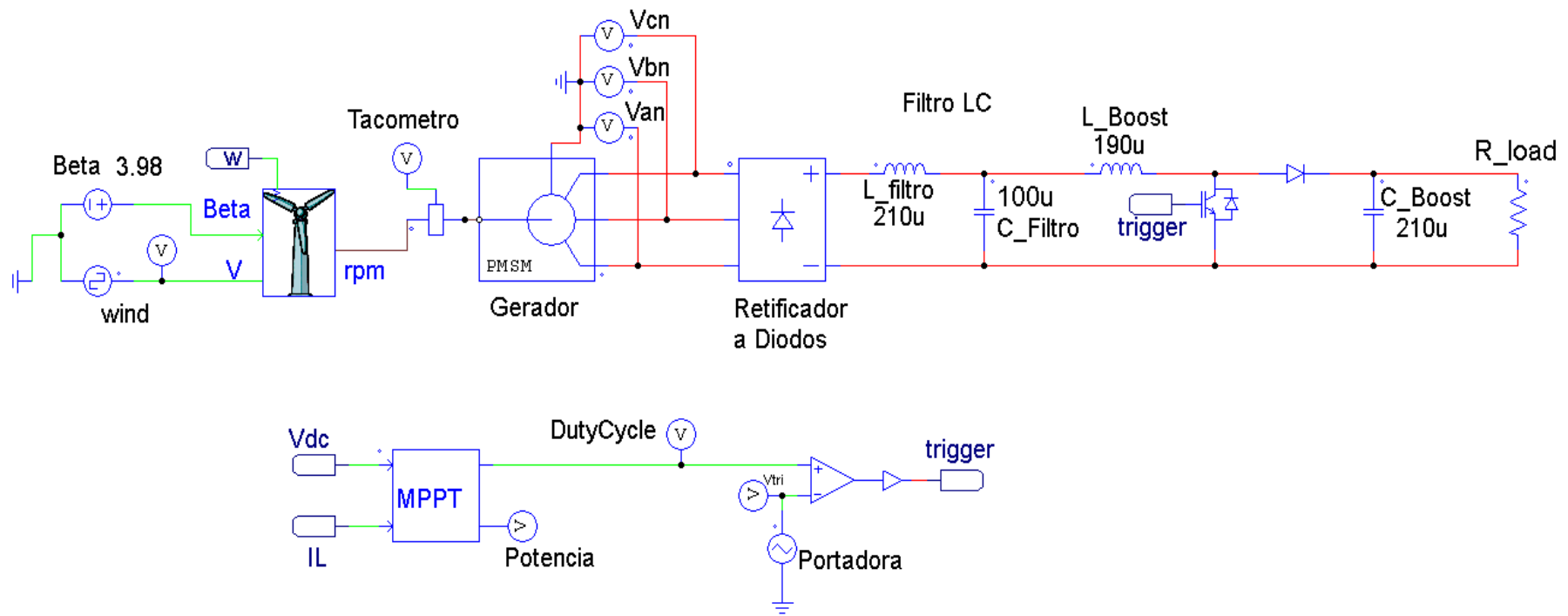


Figura 34: - Circuito com *Boost* e MPPT implementados

Tabela 13: - Tabela comparativa MPPT

Velocidade do vento	Potência (W)	
	Circuito sem MPPT	Circuito com MPPT
9 m/s	1206	1869
10 m/s	1506	2212
11 m/s	2122	2820
12 m/s	2861	3400

A Tabela 13 apresenta a comparação das potências extraídas do aerogerador, considerando a utilização ou não do MPPT. Pode-se concluir que a utilização do MPPT promove um acréscimo de extração de potência da ordem de 19% a 55%, dependendo da faixa de operação (condições de vento).

A Figura 35 mostra na sequência: a resposta dinâmica da Potência a uma variação da velocidade do vento; a variação da velocidade do vento (de 12 m/s para 10 m/s); variação do *Duty Cycle* para rastreamento da Potência.

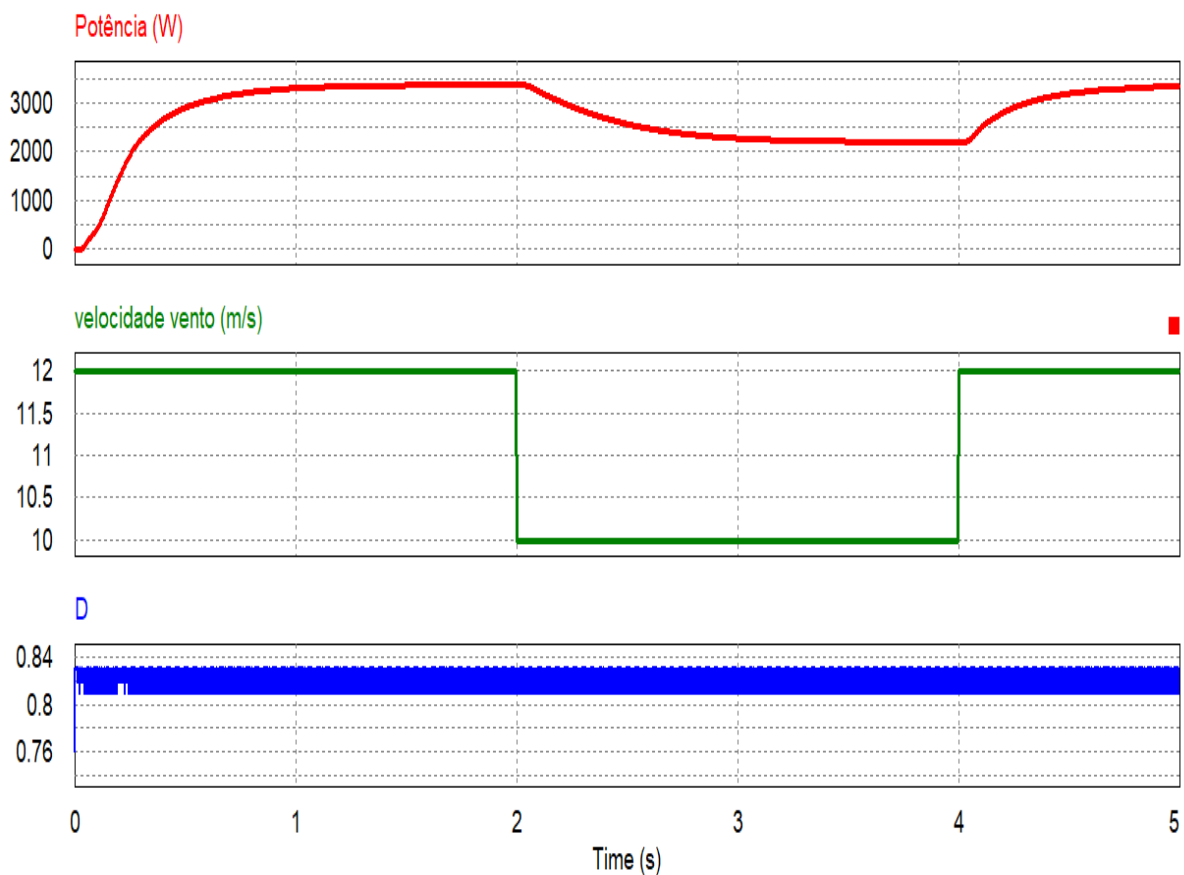


Figura 35: - Resposta dinâmica a variação do vento (de 12 m/s para 10 m/s)

3.2 Sistema Fotovoltaico

3.2.1 Modelo Matemático e Característica I-V

As curvas (I-V) são obtidas pela exposição das células a um nível constante de luz, a uma temperatura constante, variando-se a resistência da carga, e medindo-se a corrente produzida [30]. A curva I-V tipicamente passa pelos pontos sumarizados como a seguir:

- ♣ Corrente de curto circuito (ISC) : ISC é a corrente produzida quando os terminais positivo e negativo da célula são curto circuitados, e a tensão entre os terminais é zero, o que corresponde a uma carga de resistência nula;
- ♣ Tensão de Circuito Aberto (VOC) : VOC é a tensão através dos terminais positivos e negativos, sob condições de circuito aberto, quando a corrente é zero, o que corresponde a uma carga de resistência infinita;
- ♣ PM Potência máxima produzida sob condições padrão (STC) ;
- ♣ IM Corrente produzida no MPP (Máximo Ponto de Potência) ;
- ♣ VM Tensão no MPP;
- ♣ FF Fator de Preenchimento: é um parâmetro que determina a forma da curva característica I-V e é a taxa entre a máxima potência e o produto ($VOC * ISC$) da Tensão de circuito aberto multiplicada pela corrente de curto circuito;

Um sistema PV consiste de várias células conectadas em série e paralelo para prover a tensão e corrente de saída desejadas. Existem vários modelos matemáticos para o painel solar. Um painel solar equivalente é apresentado em [57].

$$V_{PV} = \frac{N_S \alpha K T}{q} \ln \left[\frac{I_{SC} - I_{PV} + N_p I_O}{N_p I_O} \right] - \frac{N_S}{N_p} R_S I_{PV} \quad (33)$$

Os parâmetros da equação são:

α é o fator de preenchimento;

I_O é a Corrente reversa de saturação;

I_{PV} é a Corrente de saída;

I_{SC} é a Corrente de curto circuito;

K é a Constante de Boltzmann ($1,380 \times 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$);

M_V é o Fator de Tensão;

N_p é o Número de strings em paralelo;

N_s é o Número de células em série por string;

q é a Carga de electrón ($1,602 * 10^{-19} \text{ C}$);

R_s é a Resistência em série (Ω);

T é a Temperatura da célula PV ($^\circ\text{K}$);

V_{MP} é a Tensão correspondente a máxima potência (V);

V_{OC} é a Tensão de circuito aberto (V);

V_{PV} é a Tensão nos terminais da célula PV (V).

3.2.2 Painel Solar

O painel solar utilizado é o modelo comercial do fabricante CanadianSolar, modelo CS6U-320P. A Tabela 14 apresenta a folha de dados do modelo utilizado e a Figura 36 apresenta as curvas I-V.

Tabela 14: - Dados do Fabricante [58]

Dados Elétricos / STC	
CS6U	320P
Potência Max. Nominal (Pmax)	320 W
Tensão Operação (Vmp)	36.8 V
Corrente Operação (Imp)	8.69 A
Tensão Circuito Aberto (Voc)	45.3 V
Corrente Curto Circuito (Isc)	9.26 A
Eficiência Módulo	16.46%
Temperatura Operação	$-40^\circ \sim +85^\circ\text{C}$
Tensão Max. Sistema	1000 V (IEC) or 1000 V (UL)

* Sob condições padrão (STC) de irradiação de 1000 W/m^2 , spectrum AM 1.5 e temperatura de célula de 25°C

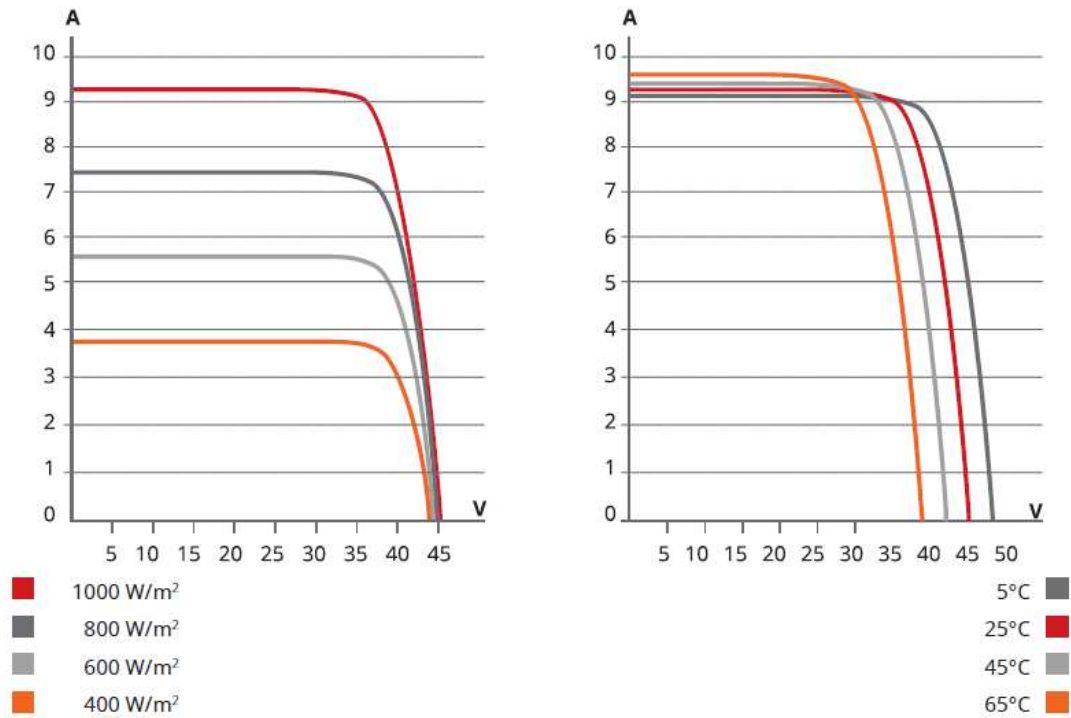


Figura 36: - Curvas I-V do Painel Fotovoltaico - Modelo CS6U 320P [58]

O *software* PSIM possui um modelo de painel fotovoltaico. A Figura 37 apresenta a caixa de diálogo deste modelo, bem como o circuito utilizado para validação do modelo. Todas as informações de catálogo disponíveis foram inseridas no modelo.

Ainda neste circuito, realizou-se diversas simulações (Figura 38), alterando a intensidade luminosa e a temperatura, de modo a poder comparar com o gráfico da Figura 36. Como pode-se verificar a modelagem apresentou resultados satisfatórios quando comparada com os dados de catálogo.

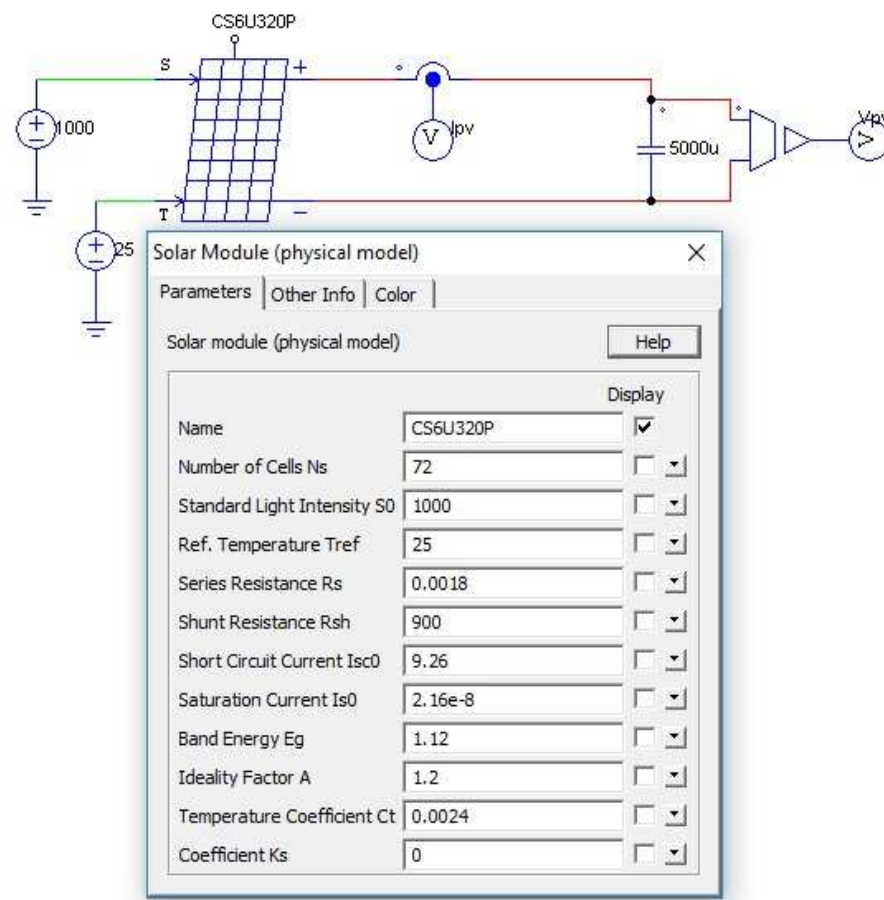
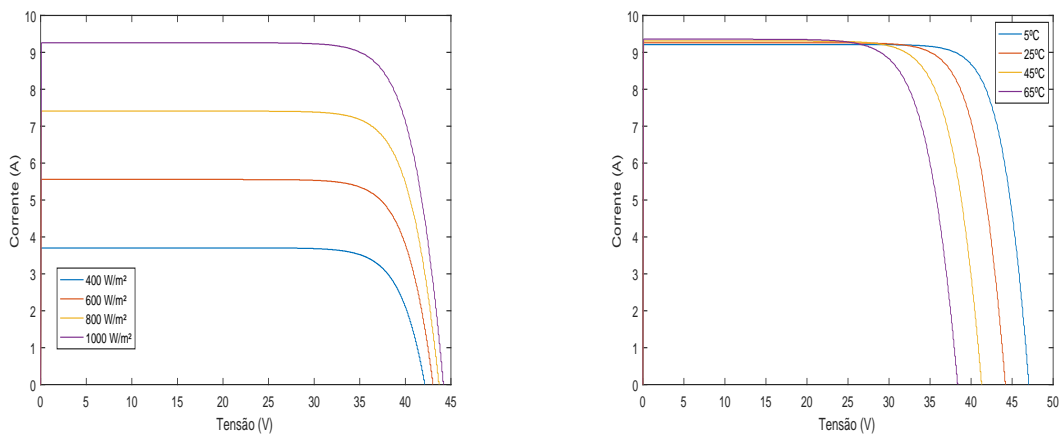


Figura 37: -Caixa de diálogo e Circuito para validação do modelo do painel fotovoltaico



(a) Curva IV para diferentes intensidades de Luz

(b) Curva IV para diferentes temperaturas de operação ambiente

Figura 38: Curvas IV - Simulação

3.2.3 Arranjo e Dimensionamento de Painéis

Deseja-se que o sistema solar dessa planta seja capaz de prover uma potência da ordem de 5,5 kW. Como existem perdas ao longo do circuito, tanto no conversor Boost como no Inversor, adota-se que o circuito terá um eficiência η de 85%. Este percentual embora seja reconhecidamente empírico é bastante usual [59]. Dessa forma, tem-se:

$$\frac{5500 \text{ kW}}{\eta = 0,85} = 6470 \text{ kW}$$

A corrente de saída do conversor boost, pode ser calculada por:

$$I_o = \frac{6470 \text{ kW}}{469,77 \text{ V}} = 13,77 \text{ A}$$

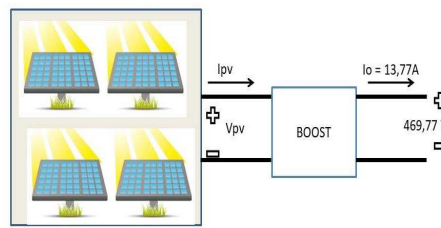


Figura 39: - Dimensionamento dos Painéis

A Tabela 15 apresenta o dimensionamento da matriz de painéis, levando em conta algumas projeções de arranjo.

Tabela 15: - Dimensionamento da Matriz de Painéis

Opção	V _{pv} (no P _{max})	D [$D = 1 - (\frac{V_{pv}}{469})$]	I _o ($\frac{I_o}{1-D}$)	Painéis em Série	Painéis em paralelo Calculado	Pecas	Total de painéis da matriz
1	36,8	0,921	175,83	1	20,23	21	21
2	73,6	0,843	87,91	2	10,11	11	22
3	110,4	0,764	58,61	3	6,74	7	21
4	147,2	0,686	43,95	4	5,05	6	24
5	184	0,608	35,16	5	4,04	5	25
6	220,8	0,529	29,30	6	3,37	4	24
7	257,6	0,451	25,11	7	2,89	3	21
8	294,4	0,373	21,97	8	2,52	3	24
9	331,2	0,294	19,53	9	2,24	3	27
10	368	0,216	17,58	10	2,02	3	30

A linha destacada em amarelo na Tabela 15 foi a escolhida por apresentar o menor número de painéis, além de possuir valores aceitáveis para *Duty Cycle*. Uma vez que os valores de D (*Duty Cycle*) devem considerar que as chaves de potência não são instantâneas, portanto, necessitam de um tempo para ligar e desligar. Lembrando que o tempo de ligar e desligar dos IGBTs (*Insulated Gate Bipolar Transistors*) utilizados nestes circuitos é da ordem de $1\mu s$ [50].

Para simularmos o funcionamento do array de painéis no PSIM não é necessário incluímos os 20 painéis na configuração matricial desejada (5 x 4) . Com uma aproximação bastante razoável, basta na caixa de diálogo do Solar Module, inserir os seguintes valores como apresentado na Figura 40 [60].

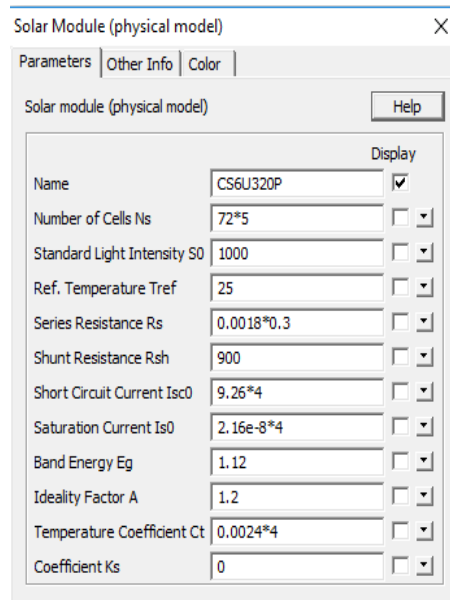


Figura 40: - Caixa de diálogo do *Solar Module*

A exceção ficou por conta do item Series Resistance R_s , o qual quando multiplicado por 5 apresentou distorções, por isso foi ajustado manualmente para um valor inferior.

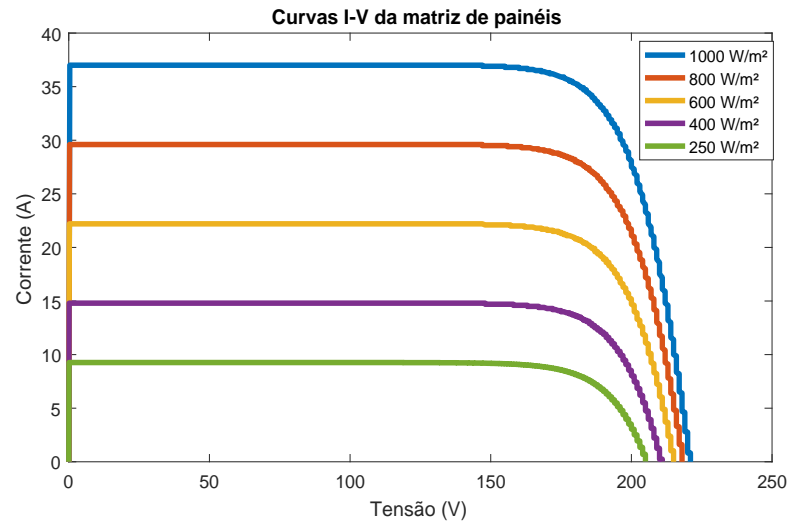


Figura 41: - Curva IV (array) para diferentes intensidades de luz

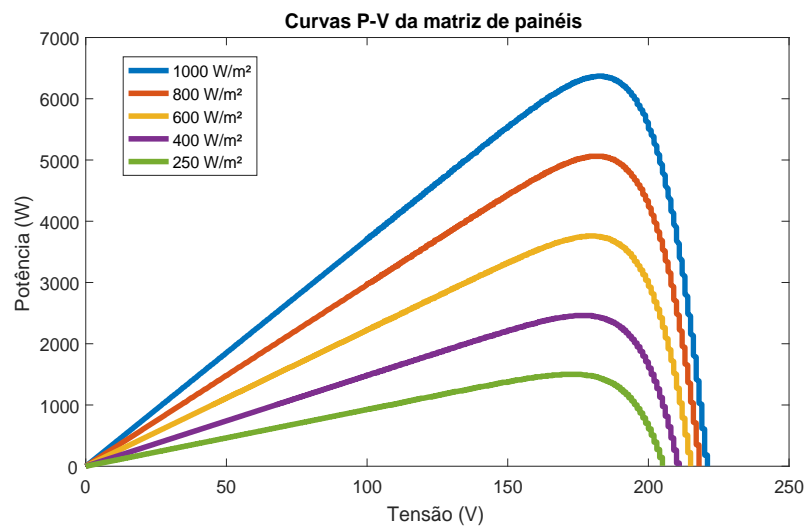


Figura 42: - Curva PV (array) para diferentes intensidades de luz

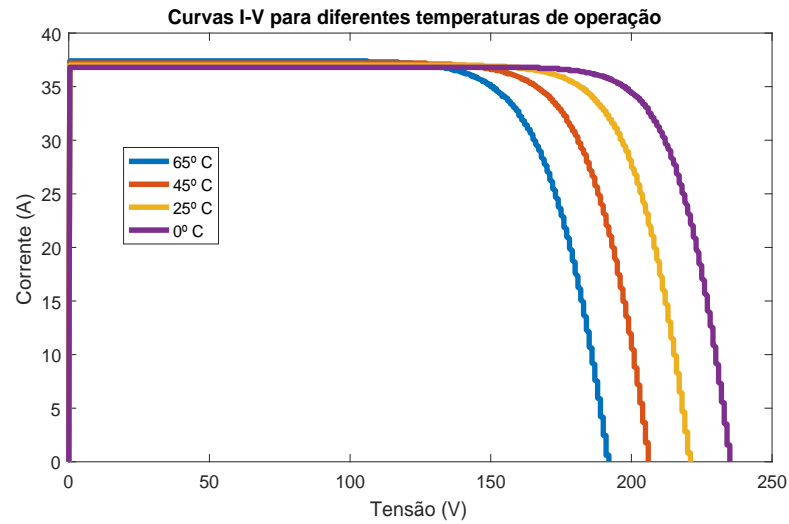


Figura 43: - Curva IV (array) para diferentes temperaturas

3.2.4 Projeto conversor *Boost*

Para o projeto do conversor foi considerada a faixa de operação exposta na Tabela 16.

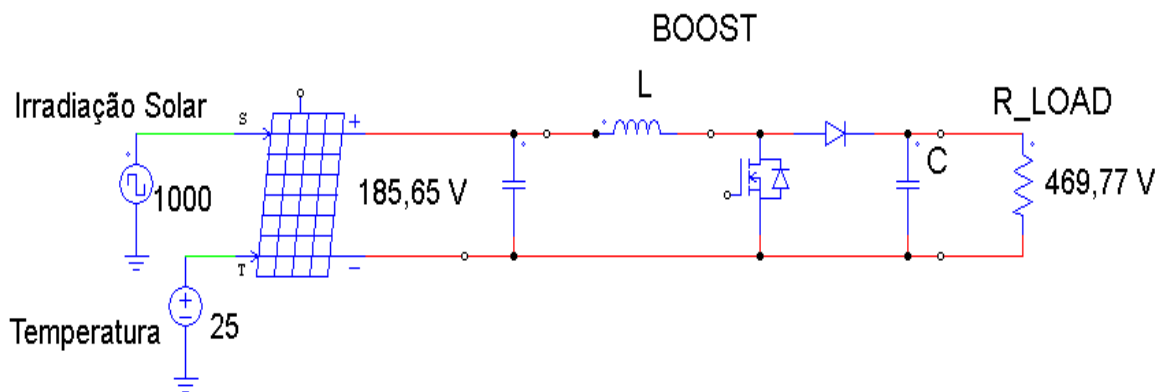


Figura 44: - Conversor *Boost* - Sistema Fotovoltaico

Conforme apontado na Tabela 12 os valores de tensão do link CC, considerando índices de modulação $ma = 0,8$ e $ma = 0,9$, são respectivamente $V_d = 417,57$ (V) e $V_d = 469,77$ (V).

O valor da carga R_L pode ser encontrado por:

$$R_L = \frac{V^2}{P} = \frac{469,77^2}{6400} = 34,48\Omega \quad (34)$$

Tabela 16: - Faixa de Operação - Sistema Photovoltaico

Faixa de Operação	mínimo	máximo
Itensidade luminosa	$250W/m^2$	$1000W/m^2$
Potência	1502 W	6400 W
V _{pv}	172 V	183,65 V
I _{pv}	9,22 A	34,85 A

O valor do *Duty Cycle* teórico D:

$$D = 1 - \frac{V_{in}}{V_{out}} = 1 - \frac{183,65}{469,77} \approx 0,609 \quad (35)$$

Com o valor de D, pode-se calcular o valor da corrente de saída I_{out} :

$$I_{out} = I_{in} (1 - D) = 34,85 (1 - 0,609) = 13,62A \quad (36)$$

Com os valores obtidos anteriormente, é possível calcular o valor do Capacitor C e da Indutância L, por:

$$L = \frac{D \cdot (1 - D)^2 \cdot R}{2 \cdot f} \quad (37)$$

$$C = \frac{D \cdot V_{out}}{Rfv \cdot f \cdot R} \quad (38)$$

onde:

- f é a frequência de chaveamento - $f = 10$ kHz
- Rfv é o fator de ripple de tensão - $Rfv = 1\%$

Deste modo, tem-se: $L = 161\mu H$ e $C = 177\mu F$

A Tabela 17 sumariza os cálculos para todas as situações, conforme os passos (34), (35), (36), (37) e (38) aplicados acima:

Tabela 17: - Cálculo dos Componentes Conversor *Boost*

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
R_L (Ω)	34,48	27,24	146,92	116,09
D	0,60	0,564	0,63	0,58
I_{out} (A)	13,62	15,32	3,37	3,79
L (H)	$160\mu H$	$147\mu H$	$591\mu H$	$548\mu H$
C (F)	$176\mu F$	$205\mu F$	$43\mu F$	$50\mu F$

Tomando-se os valores máximos da Tabela 17, tem-se $L = 591\mu H$ e $C = 205\mu F$. Estes valores foram usados nas simulações. Em valores comerciais, poderiam ser utilizados $L = 1$ mH e $C = 1$ mF.

3.2.5 MPPT

Embora a energia solar seja uma fonte de recurso importante, por ser gratuita, não poluente e abundante, os sistemas fotovoltaicos possuem dois grandes problemas: a baixa eficiência da conversão (em geral inferior a 17%) , e também a alta sensibilidade da fonte solar às variações climáticas e de intensidade luminosa.

Por essa razão, o algoritmo MPPT desempenha um papel fundamental no sistema de geração fotovoltaico, pois ele irá garantir o rastreamento do ponto de máxima potência, a despeito do seu desconhecimento e das susceptíveis variações inerentes a esta fonte de energia.

Várias tipos de algoritmos estão disponíveis na literatura [61], contudo o que foi escolhido nesta implementação é o Incremental Conductance (INC) . O método INC se baseia no fato de que a inclinação da curva de potência da matriz de painéis PV é zero no ponto MPP (Ponto de Máxima Potência) . Além disso, à esquerda de MPP a inclinação é negativa, e à direita positiva.

A Figura 46 mostra o fluxograma do algoritmo INC.

O circuito em malha fechada pode ser visto na Figura 47. O algoritmo MPPT foi implementado em código C, aproveitando essa funcionalidade do PSIM. Uma adaptação foi feita ao algoritmo original para garantir o ajuste da tensão no barramento CC, bem como melhorar a performance do algoritmo. De forma resumida, a alteração consistiu em delimitar dinamicamente a excursão do valor de duty cycle, de acordo com o ponto operacional do painel PV.

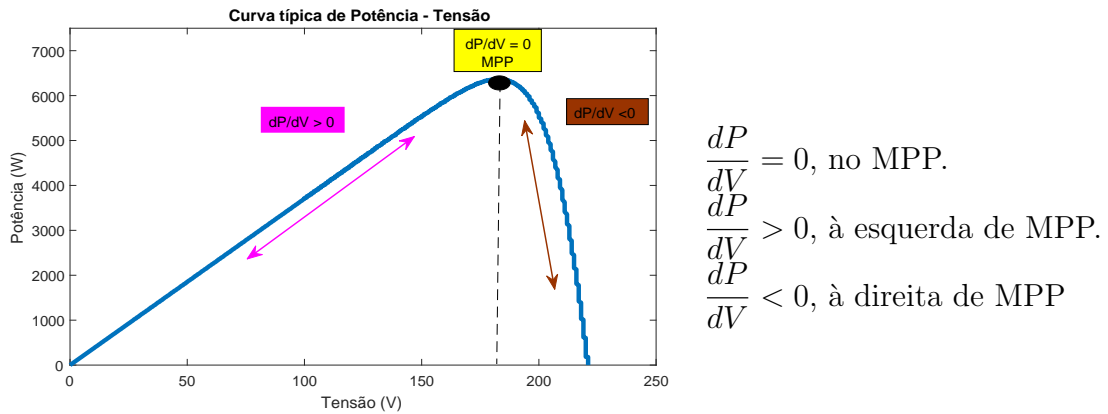


Figura 45: - Curva típica Potência - Tensão

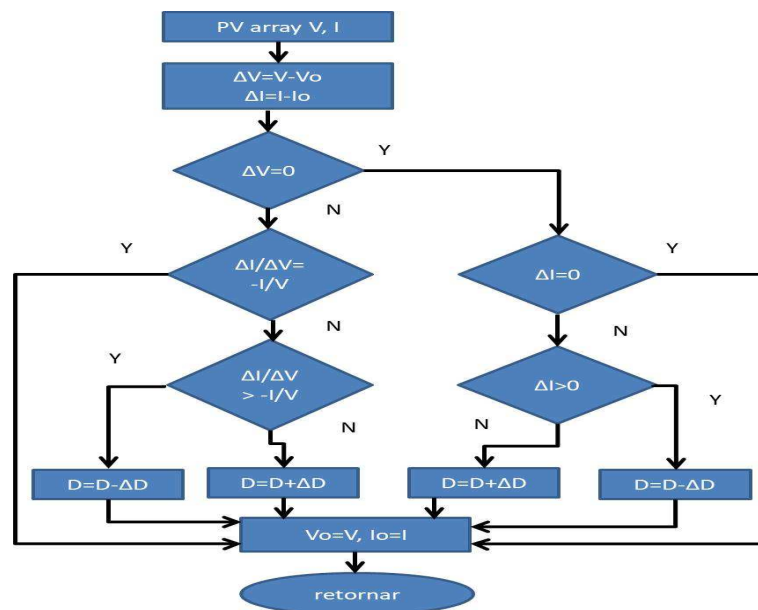


Figura 46: - Fluxograma do Algoritmo INC

Comparando-se o circuito em malha aberta, com o circuito em malha fechada (*boost + MPPT*), constata-se a seguinte diferença de performance.

Tabela 18: - Quadro Comparativo de Potência: malha aberta x malha fechada

Intensidade Luminosa	Potência extraída (W)		Ganho
	Malha aberta	Malha fechada	
1000 W/m ²	6364	6366	0%
800 W/m ²	4565	4968	8%
600 W/m ²	2595	3544	27%
400 W/m ²	1154	1880	39%

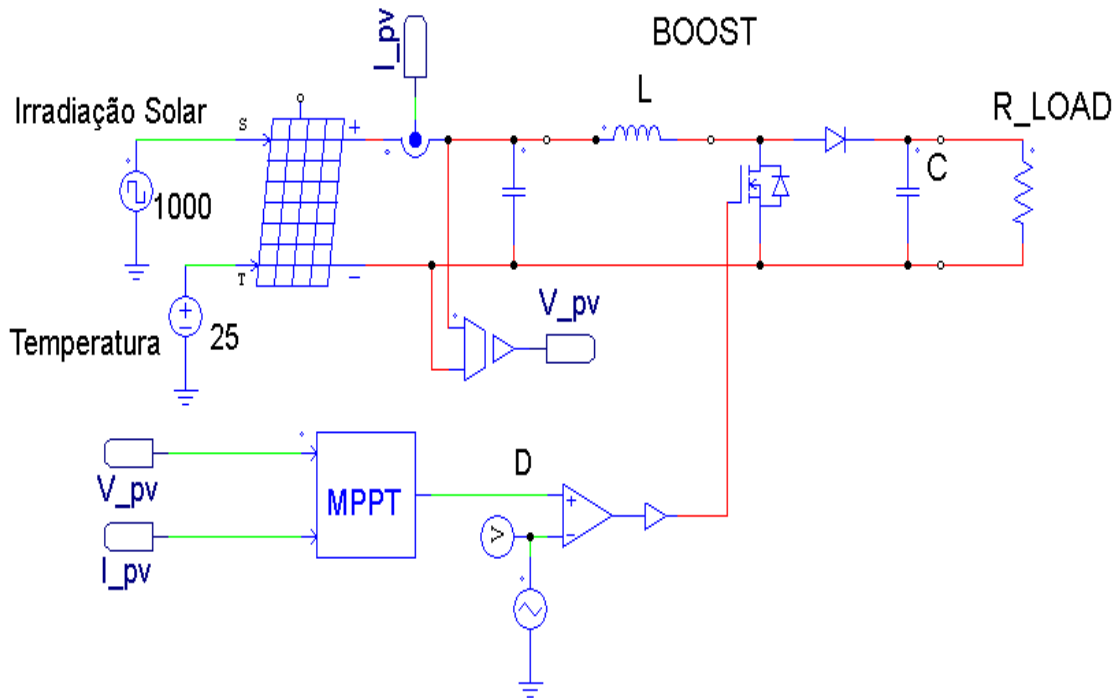


Figura 47: - Circuito matriz PV em malha fechada (*boost + MPPT*)

A coluna ganho na Tabela 18 representa o acréscimo obtido em malha fechada, quando comparado com a malha aberta.

A obtenção dos valores da Tabela 18 foi feita com carga resistiva fixa, e alterando-se apenas os valores de intensidade luminosa, nos circuitos em malha aberta e fechada. É possível verificar que os maiores ganhos foram observados quando o ponto operacional estava mais distante da condição nominal do equipamento.

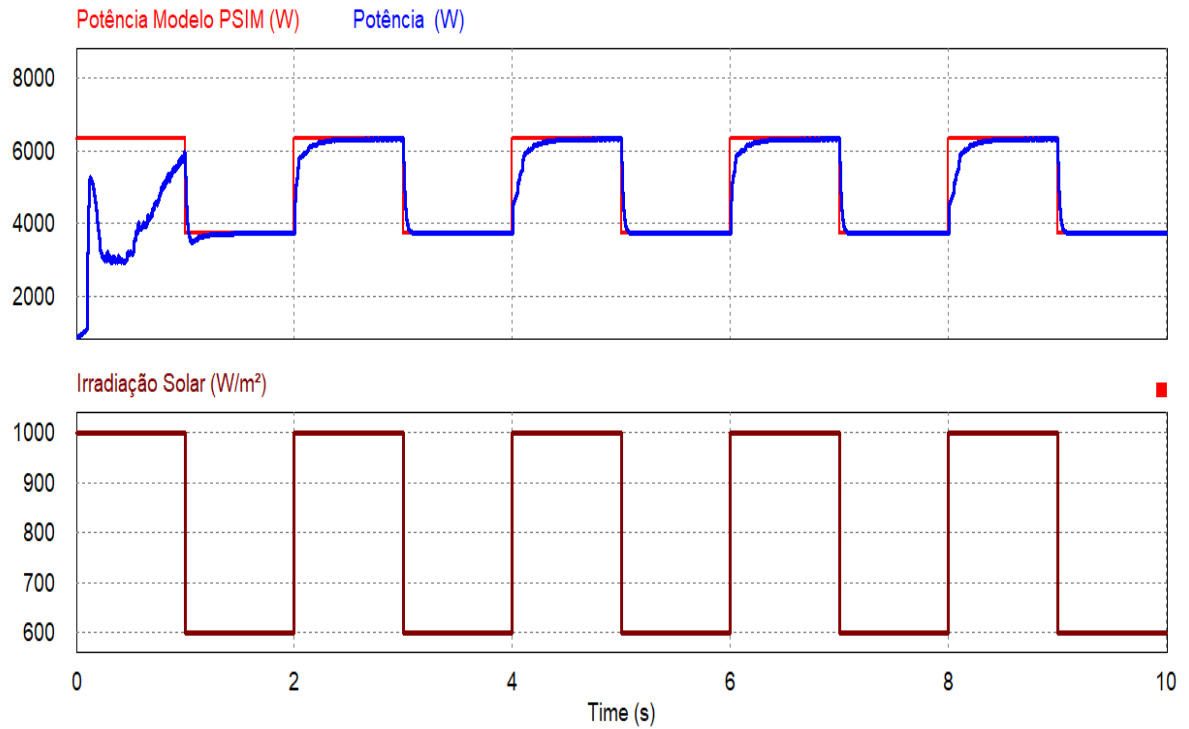


Figura 48: - Resposta dinâmica a uma variação na intensidade luminosa

No gráfico da Figura 48, na posição superior, em azul está a Potência teórica e em vermelho a Potência efetiva. Na posição inferior, a variação da intensidade luminosa representada por uma onda quadrada. Pode-se concluir que o rastreamento da potência teórica foi satisfatório.

3.3 Sistema de Baterias

3.3.1 Modelagem

Simular o comportamento de uma bateria não é uma tarefa das mais simples. Por si só, discutir um modelo dinâmico de uma bateria foge do escopo do presente trabalho. Em [62] são discutidas várias possibilidades quanto à simuladores capazes de emular o comportamento de uma bateria.

Tipicamente a grande questão de gerar um modelo apropriado e factível de bateria, está na complexa interrelação dos seus parâmetros elétricos, os quais precisam ser considerados juntos para se obter a precisão desejada. O desafio está associado a se obter um modelo que não seja demasiadamente complexo, mas que seja capaz de emular a tensão terminal e a resistência interna, os quais são função de vários outros parâmetros como o estado de carga (SOC) [63].

Em [62] encontra-se disponível um modelo de fácil implementação, o qual será utilizado neste desenvolvimento. Trata-se de uma realização em linguagem C, de um modelo matemático para uma bateria. Como a saída do modelo é um valor matemático, foi incluída uma fonte de tensão controlada para a conversão do valor matemático para valor elétrico de tensão. O terminal positivo recebeu o valor numérico de tensão calculado dinamicamente pelo modelo, enquanto o terminal negativo recebeu um valor constante zero.

Os valores de entrada e saída, estão explicados abaixo, na sequência em que aparecem na Figura 49.

Entradas:

- 1 - Valor inicial Ah de capacidade da bateria;
- 2 - Capacidade nominal da bateria;
- 3 - Número de células em serie por setor/ramo;
- 4 - Número de setores/ramos (células em paralelo);
- 5 - Corrente de carga (+ para descarga / - para carga);
- 6 - Corrente de auto descarga.

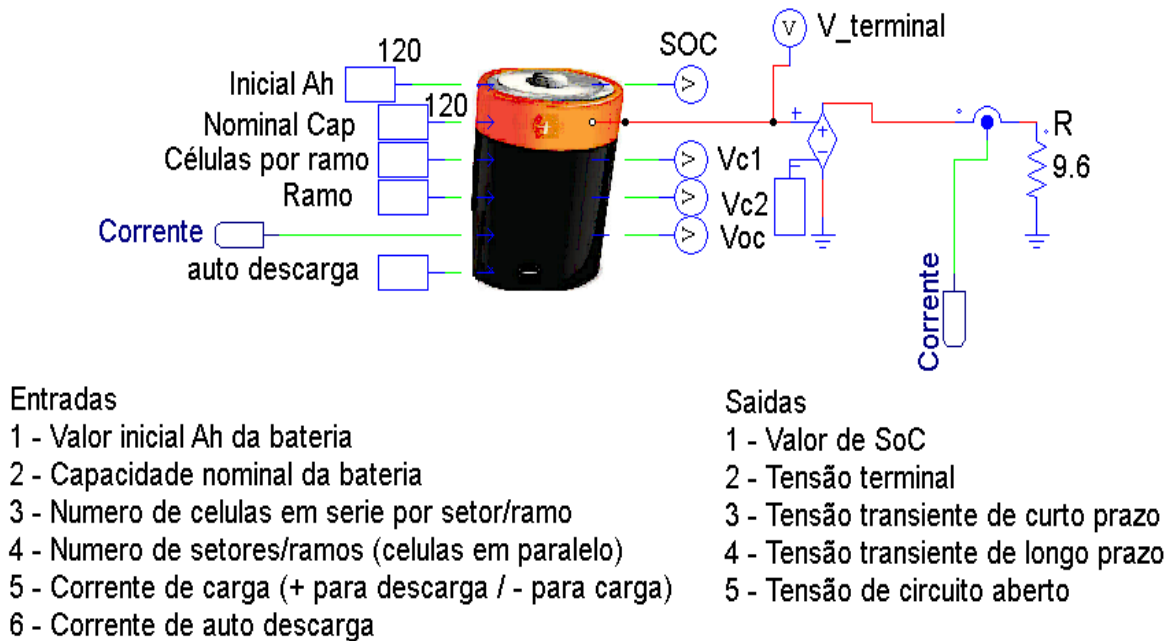


Figura 49: - Representação da Bateria - Bloco C PSIM

Saídas:

- 1 - Valor de SoC;
- 2 - Tensão terminal;
- 3 - Tensão transiente de curto prazo;
- 4 - Tensão transiente de longo prazo;
- 5 - Tensão de circuito aberto.

Pela manipulação dos valores de entrada, com este modelo é possível montar diversos tipos de configurações de bateria (associações em série-paralelo) .

As equações originais propostas em [62] foram modificadas para refletir o modelo que se desejava simular.

O modelo comercial utilizado como referência neste trabalho é o DF4001 do fabricante Tudor. A capacidade nominal é de 120 Ah, com tensão terminal de 12 V. Maiores detalhes do modelo utilizado podem ser encontrados em [64].



Figura 50: - Tensão terminal x Estado de carga [64]

Na Figura 51 são apresentadas as duas curvas - original do fabricante e simulado - no mesmo gráfico. As diferenças apresentadas são desprezíveis, pois trata-se de menos de 0,2V (< 2%), no seu pior caso.

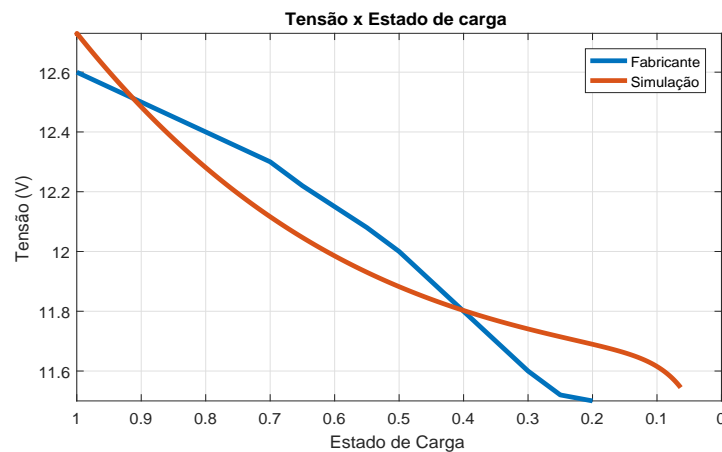


Figura 51: - Dados Fabricante x Modelo

Não se tem a pretensão neste projeto de se construir um complexo banco de baterias, com autonomia para várias horas. Pois, bancos de baterias dessa magnitude demandam uma infraestrutura especial, com salas climatizadas e manutenção onerosa, o que foge do objetivo deste projeto que tem um caráter mais aplicável a localidades remotas, com foco na sustentabilidade. A bateria neste projeto cumpre um papel de suportar pequenas oscilações e flutuações indesejadas do sistema, que são inerentes a um projeto com fontes renováveis.

Neste sentido, tem-se um arranjo de oito baterias ligadas em série, totalizando 96V

e com a capacidade de 120Ah. Como será apresentado mais adiante o motor do *skid* de dessalinização possui uma demanda de corrente de cerca 15A. Assim, em média, a bateria possuirá uma autonomia de 1,6 horas, quando utilizado em até 20% de descarga.

Para que o sistema de baterias seja acoplado ao sistema de geração de energia (Aerogerdor + Fotovoltaico) temos três preocupações principais:

- implementar um conversor buck boost para carga/descarga do sistema
- manter no nível de tensão desejado (469V)
- implementar uma lógica de acionamento do sistema de baterias

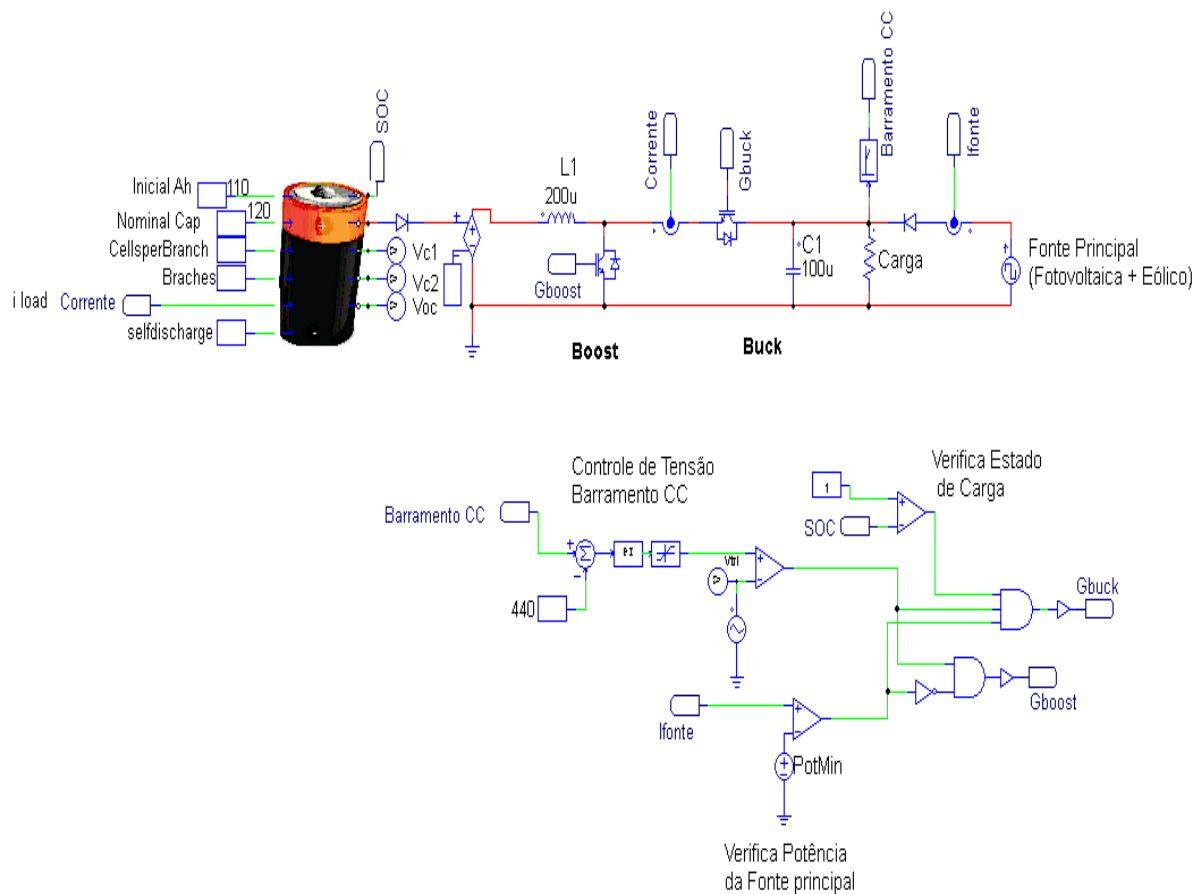


Figura 52: - Circuito teste do sistema de baterias

A Figura 52 apresenta um circuito teste para o sistema de baterias, onde é possível testar o funcionamento de todo o sistema. Na parte inferior da figura nota-se uma lógica que foi criada que inibe o sistema de baterias de ser carregado caso ele já esteja carregado. Além disso há uma lógica de disparo do sistema de bateria, ou seja, ele só ficará ativo caso

a potência suprida pelo conjunto - Aerogerador e Fotovoltaico - esteja num valor inferior a um *set point* pré estabelecido. Para esta simulação isolada, o conjunto Aerogerador e Painel Fotovoltaico foi substituído por uma fonte de corrente em onda quadrada. Assim, quando a corrente for inferior ao *set point*, o sistema de bateria ficará habilitado.

Também há um sistema de controle de chaveamento do boost, levando-se em conta o nível de tensão no link CC que se deseja manter.

A Figura 53 e Figura 56 apresentam, respectivamente, a tensão terminal e o estado de carga da bateria na condição de descarga.

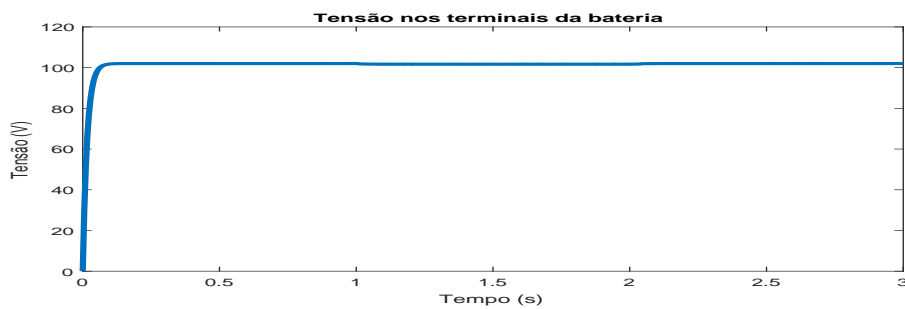


Figura 53: - Tensão nos terminais do Sistema de Baterias

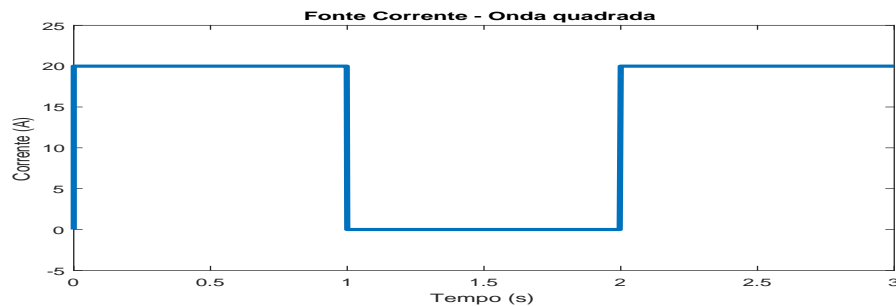


Figura 54: - Fonte Corrente

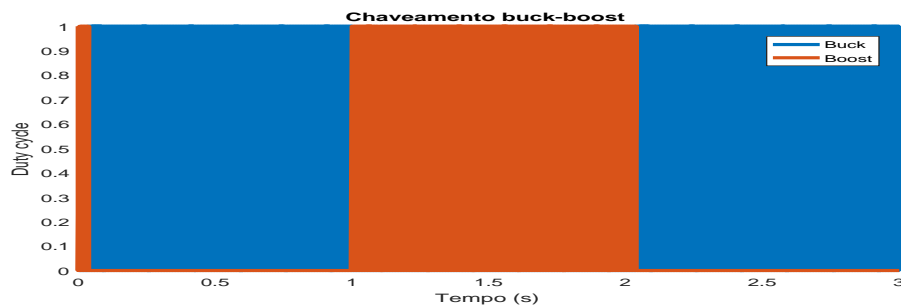


Figura 55: - Chaveamento buck-boost

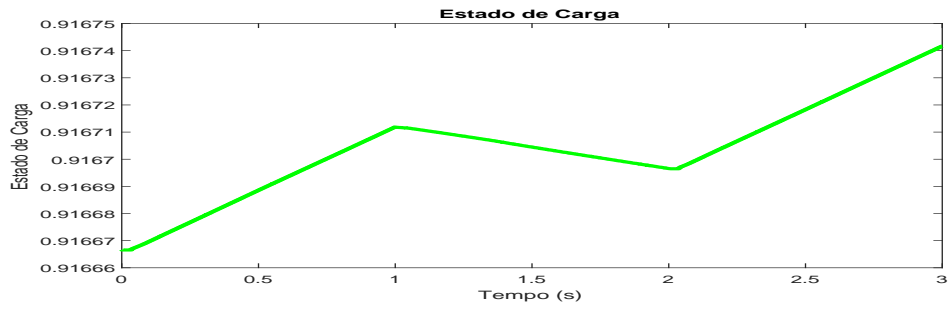


Figura 56: - Estado de carga

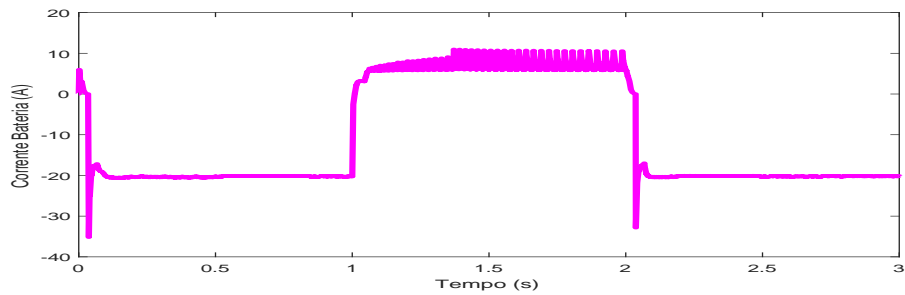


Figura 57: - Corrente bateria

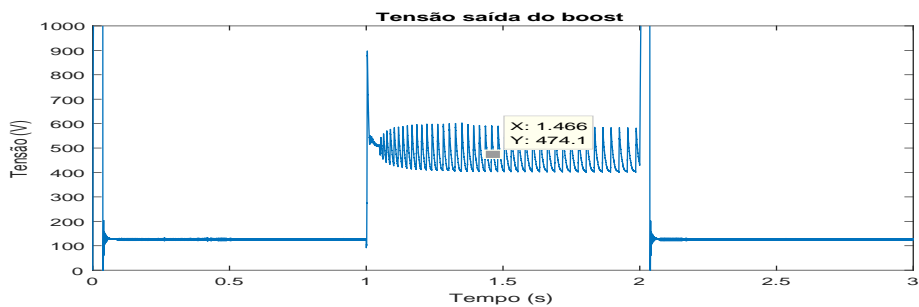


Figura 58: - Tensão no barramento CC

Pode-se concluir alguns pontos sobre as curvas levantadas:

O chaveamento *buck boost* correspondeu ao esperado, ou seja, a bateria ora enviou (*boost*) e ora recebeu (*buck*) corrente do sistema (Figura 55).

O estado de carga (Figura 56) apresentou momentos de crescimento e diminuição, de acordo com a corrente na bateria - ora positiva, ora negativa - (Figura 57).

Outro ponto que está funcional é o controle do chaveamento *boost*, que foi capaz de rastrear a tensão na saída conforme *set point* atribuído nesta simulação (Figura 58).

3.4 O Inversor

O principal objetivo do conversor estático de potência é produzir uma forma de onda alternada, com tensão e fases constantes, a partir de uma fonte de tensão contínua [51].

Conforme configuração apresentada na Figura 17, as fontes de potência estão conectadas no mesmo barramento CC. Cabe ao Inversor (VSD) fazer a conversão desta energia na forma adequada para o motor da dessalinizadora, na forma de uma tensão senoidal, trifásica, em 60Hz, e com nível de tensão de linha-linha de 230V. Os detalhes da carga serão discutidos na seção seguinte.

Conversores estáticos de potência, especialmente inversores, são construídos a partir de chaves de potência, portanto a forma de onda alternada de saída é realizada com valores discretos. Isto resulta na geração de uma forma de onda com características abruptas, ao invés de contornos suaves [51]. Esta característica poderia ser uma preocupação do presente trabalho. Entretanto, por se tratar de um motor, o qual possui altas cargas indutivas, então, filtros e outras medidas não são necessárias.

Nesta topologia, utiliza-se uma configuração clássica de conversores com chaveamento PWM (Pulse Width Modulation), composta por três pernas, sendo uma perna por fase. A Figura 59 apresenta o circuito. Nesta figura, o barramento CC foi substituído por uma fonte de tensão CC, apenas para propósito de simulação. Outro ponto a se destacar da figura é que ela apresenta um índice de modulação fixo, $m_a = 0,8$, em malha aberta.

O valor nominal do barramento CC, foi calculado conforme [50], para uma modulação linear, ou seja com índice de modulação inferior a 1 ($m_a \leq 1$). Assim:

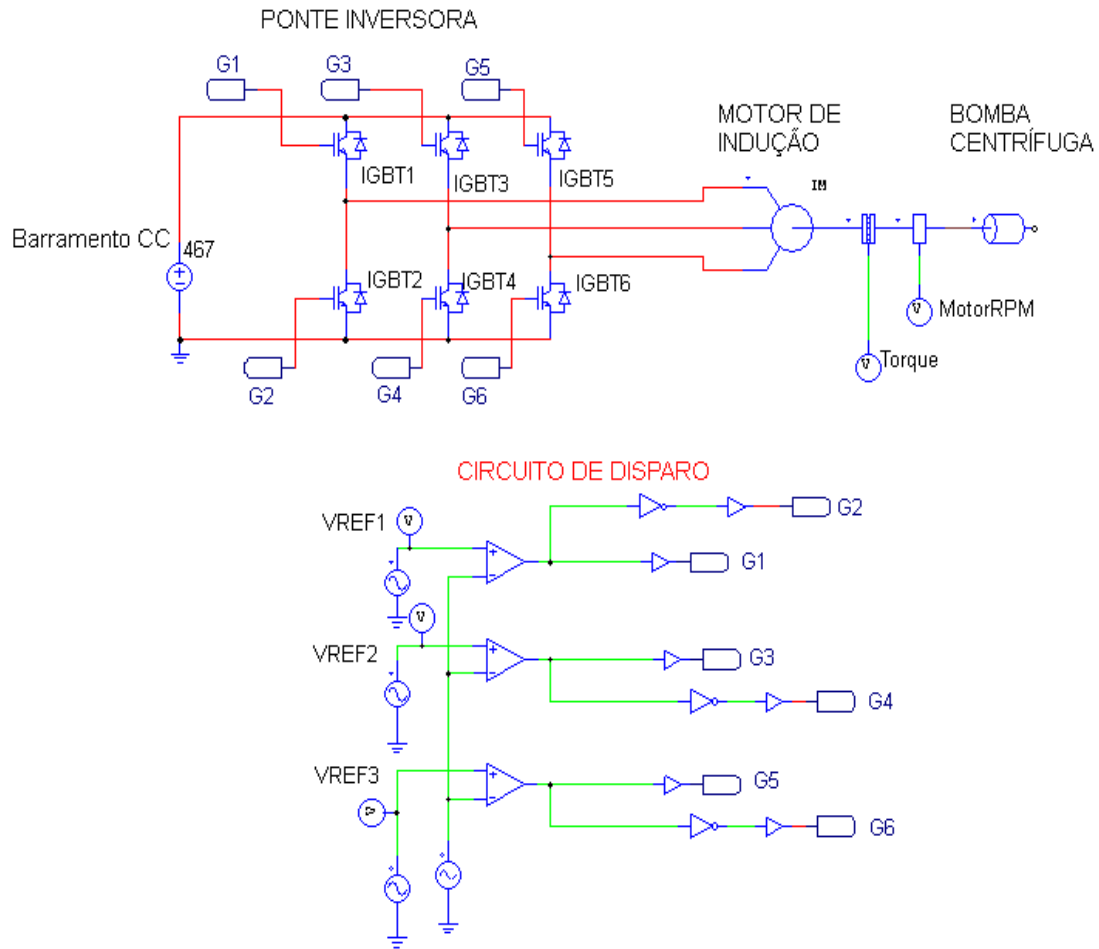


Figura 59: - Circuito Inversor - Motor

$$(\hat{V}_{AN})_1 \approx m_a \frac{V_d}{2} \quad (39)$$

$$V_{LL1}(\text{linha-linha}, \text{rms}) \approx \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} (\hat{V}_{AN})_1 \quad (40)$$

$$\approx \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} m_a V_d \quad (41)$$

$$\approx 0,612 m_a V_d \quad (42)$$

$$V_d = \frac{V_{LL1}(\text{linha-linha}, \text{rms})}{0,612 m_a} \quad (43)$$

$$V_d = \frac{230}{0,612 \cdot 0,8} = 469,77V \quad , \quad (44)$$

onde V_d é a tensão no barramento CC. $(\hat{V}_{AN})_1$, a amplitude da fundamental da tensão de saída. $V_{LL1}(\text{linha-linha}, \text{rms})$, a tensão de linha-linha do motor em rms.

Para o controle da tensão de alimentação do motor, implementou-se um controle por variação do índice de modulação. Assim, flutuações que por ventura possam acontecer no barramento CC, poderão ser compensadas pelo sistema de controle.

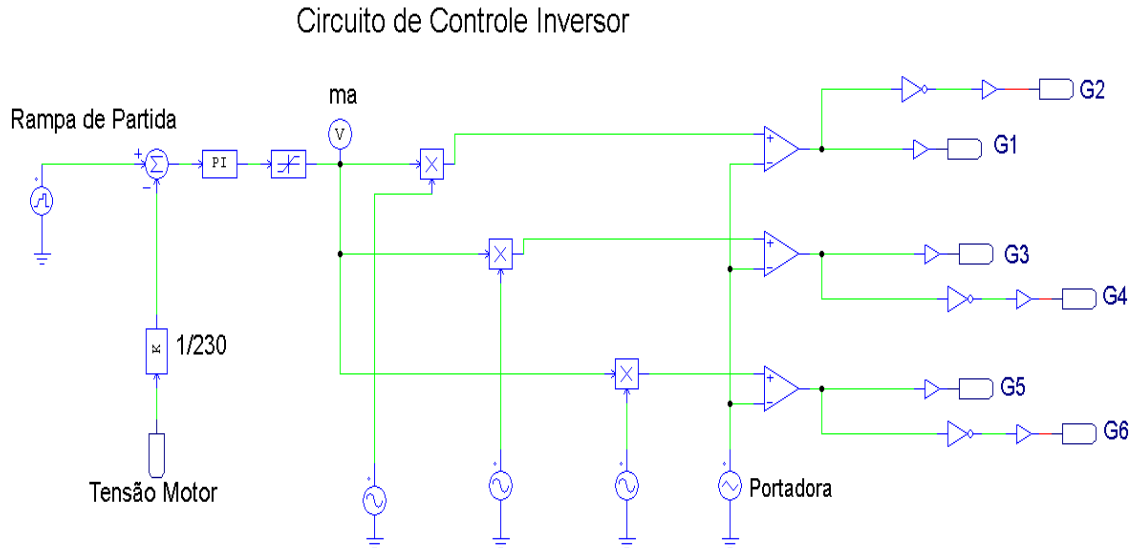


Figura 60: - Circuito de controle do índice de modulação

A Figura 60 apresenta esta implementação. Trata-se de um desdobramento direto das equação 44.

Para o teste do sistema de controle, a tensão contínua do barramento CC foi substituída por uma senóide (Figura 61), de forma a observar se o sistema iria variar o índice de modulação. E, por consequência, a tensão do motor rastrear o set point (Figura 62). Como pode ser observado a implmentação atingiu o objetivo. Mesmo para oscilações da ordem de 160 V pico a pico, a tensão de saída apresentou-se comportada.

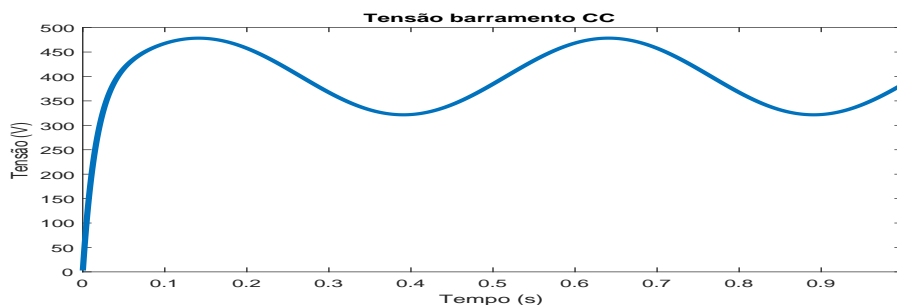


Figura 61: - Tensão barramento CC

Outro ponto a ser destacado é que, para minimizar os efeitos indesejáveis inerentes

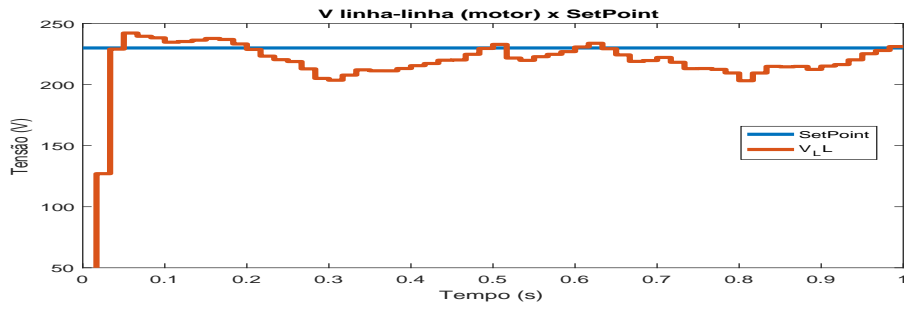


Figura 62: - $V_{LL1}(rms,motor)$ x SetPoint

a uma partida de motor de indução, onde a corrente de partida pode ultrapassar várias vezes o seu valor nominal, foi implantado uma partida em rampa.

3.5 Osmose Reversa - Conjunto Motor-Bomba

Como mencionado no capítulo 2, o modelo utilizado como referência é o S-34A do fabricante Applied. A Figura 63 apresenta o modelo que é dedicado à dessalinização da água do mar.



Figura 63: - Skid Modelo S-34A [65] - Cortesia Applied

Apresentado o modelo, o foco precisa ser o conjunto motor-bomba.

Tabela 19: - Dados do Conjunto Motor-Bomba [66]

Dados conjunto Motor-Bomba do skid	
Modelo bomba	3SV
Tipo de bomba	Centrífuga
Rotação nominal Motor	3500 rpm
Potência Motor	7,5 HP / 5,5 kW
Eficiência da bomba	60%
Head máximo	1085 (ft) / 330,71 (m)
densidade água do mar	1025 kg/m^3
n^o polos motor	2

Com os dados do conjunto motor-bomba em mãos, o desafio passa a ser transferir estas informações para o modelo do PSIM. As Figura 64 e Figura 65 mostram, respectivamente, a representação do conjunto motor-bomba no PSIM, bem como a caixa de diálogo de cada uma.

Para o devido preenchimento da caixa de diálogo do motor (Figura 65a), seria necessário o acesso aos dados de placa do motor, o que não foi possível por razões práticas. Assim, a simulação foi feita com os dados default do programa PSIM, com exceção do número de polos, que foi disponibilizado no catálogo.

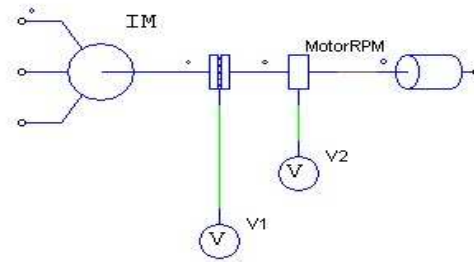
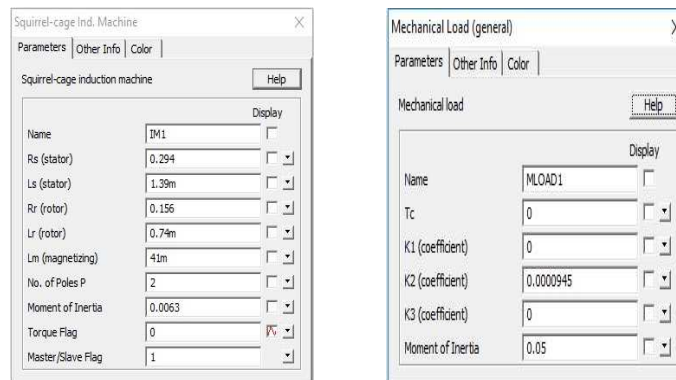


Figura 64: - Conjunto Motor-Bomba no PSIM



(a) Caixa de diálogo do Motor

(b) Caixa de diálogo Carga (bomba centrífuga)

Figura 65: Caixas de Diálogo Motor e Bomba Centrífuga

Já com relação aos dados de carga (Figura 65b), uma série de procedimentos teve que ser realizado para se obter o coeficiente solicitado. O coeficiente solicitado k_2 , para esclarecimento, é o que estabelece uma relação quadrática com a velocidade, dado que se trata de uma bomba centrífuga.

O primeiro passo foi ter acesso a curva de performance da bomba como pode ser visto na Figura 66. Antes da performance é conveniente apresentar o conceito de *Head*. De acordo com [67], *Head* é a expressão da energia contida num líquido em referência a um dado arbitrário. Está associada à energia por unidade de peso que a bomba consegue transferir ao fluido. A unidade de medida para o *Head* é metros de líquido.

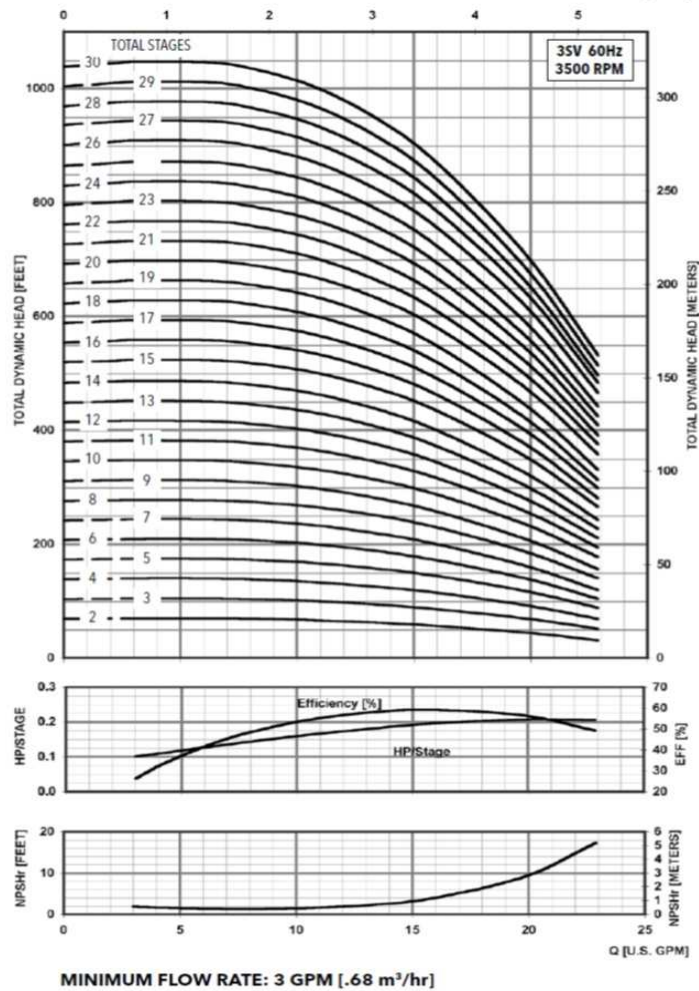


Figura 66: - Curva de Performance da Bomba [66]

Da Figura 66 obtém-se a Tabela 20. Como se trata de uma bomba centrífuga, pode-se valer das equações (45), (46) e (47) para se deduzir outras condições operacionais [68]. Aplicando-se estas equações, obtém-se a Tabela 21.

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad (45)$$

$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 \quad (46)$$

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (47)$$

Tabela 20: - *Head* x *Vazão*

Desempenho Rotação nominal - 3500 rpm			
<i>Head</i> (feet)	Q (gpm)	<i>Head</i> (m)	Q (m ³ /h)
1040	0	316,99	0
1043	1	317,91	0,227124
1046	2	318,82	0,454248
1048	3	319,43	0,681372
1050	4	320,04	0,908496
1050	5	320,04	1,13562
1045	6	318,52	1,362744
1042	7	317,6	1,589868
1035	8	315,46	1,816992
1025	9	312,42	2,044116
1010	10	307,85	2,27124
1000	11	304,8	2,498364
970	12	295,66	2,725488
955	13	291,08	2,952612
930	14	283,46	3,179736
900	15	274,32	3,40686
870	16	265,17	3,633984
850	17	259,08	3,861108
780	18	237,74	4,088232
750	19	228,6	4,315356
700	20	213,36	4,54248
650	21	198,12	4,769604
575	22	175,26	4,996728
525	23	160,02	5,223852

Com os valores de *Head* e *Vazão*, pode-se utilizar a equação (48), para obter-se a potência requerida pelo motor desta bomba.

$$P_{cons} = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{\eta} \quad (48)$$

Onde:

P_{cons} , Potência motor requerida pela bomba em [kgm/s]

γ , peso específico da água do mar em [kgf/m³]

Q, vazão em [m³/s]

H, head em [m]

Tabela 21: - Head x Vazão

2625 rpm - 75% nominal		1750 rpm - 50% nominal	
Head (m)	Q (m ³ /h)	Head (m)	Q (m ³ /h)
178,3069	0	79,2475	0
178,8244	0,170343	79,4775	0,113562
179,3363	0,340686	79,705	0,227124
179,6794	0,511029	79,8575	0,340686
180,0225	0,681372	80,01	0,454248
180,0225	0,851715	80,01	0,56781
179,1675	1,022058	79,63	0,681372
178,65	1,192401	79,4	0,794934
177,4463	1,362744	78,865	0,908496
175,7363	1,533087	78,105	1,022058
173,1656	1,70343	76,9625	1,13562
171,45	1,873773	76,2	1,249182
166,3088	2,044116	73,915	1,362744
163,7325	2,214459	72,77	1,476306
159,4463	2,384802	70,865	1,589868
154,305	2,555145	68,58	1,70343
149,1581	2,725488	66,2925	1,816992
145,7325	2,895831	64,77	1,930554
133,7288	3,066174	59,435	2,044116
128,5875	3,236517	57,15	2,157678
120,015	3,40686	53,34	2,27124
111,4425	3,577203	49,53	2,384802
98,58375	3,747546	43,815	2,498364
90,01125	3,917889	40,005	2,611926

Com os valores de potência conhecidos, pode-se obter o torque pela expressão:

$$T_{motor} = \frac{P_{cons} \cdot 60}{\omega_{rpm} \cdot 2 \cdot \pi} \quad (49)$$

A Tabela 22 mostra os valores de Potência e Torque após a aplicação da equações (48) e (49).

Tabela 22: - Potência e Torque em 100%, 75% e 50%

3500 rpm	2625 rpm	1750 rpm	3500 rpm	2625 rpm	1750 rpm
Potência kW	Potência kW	Potência kW	Torque	Torque	Torque
0	0	0	0	0	0
0,336015	0,141756354	0,042002	0,9168	0,5157	0,2292
0,673954	0,284324248	0,084244	1,8388	1,0343	0,4597
1,012865	0,427302371	0,126608	2,7635	1,5545	0,6909
1,353065	0,570824493	0,169133	3,6917	2,0766	0,9229
1,691332	0,713530616	0,211416	4,6146	2,5957	1,1536
2,019959	0,852170123	0,252495	5,5112	3,1	1,3778
2,349812	0,991326875	0,293726	6,4112	3,6063	1,6028
2,667404	1,125311176	0,333426	7,2777	4,0937	1,8194
2,971912	1,253775225	0,371489	8,1085	4,561	2,0271
3,253821	1,372705912	0,406728	8,8776	4,9937	2,2194
3,543743	1,495016528	0,442968	9,6686	5,4386	2,4172
3,749975	1,582020711	0,468747	10,231	5,7551	2,5578
3,999542	1,687306831	0,499943	10,912	6,1381	2,7281
4,194444	1,769530957	0,524305	11,444	6,4372	2,861
4,349139	1,834793012	0,543642	11,866	6,6747	2,9665
4,484344	1,891832655	0,560543	12,235	6,8822	3,0587
4,65519	1,963908076	0,581899	12,701	7,1444	3,1753
4,523028	1,908152628	0,565379	12,34	6,9415	3,0851
4,590758	1,936725957	0,573845	12,525	7,0455	3,1313
4,510218	1,902748309	0,563777	12,306	6,9219	3,0764
4,397463	1,855179601	0,549683	11,998	6,7488	2,9995
4,075304	1,719269008	0,509413	11,119	6,2544	2,7797
3,890063	1,641120416	0,486258	10,614	5,9701	2,6534

As Figura 67, Figura 68 e Figura 69 apresentam de forma gráfica as tabelas anteriores.

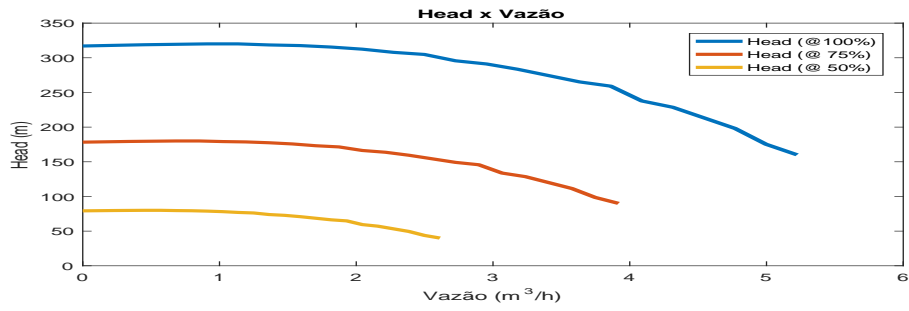


Figura 67: - Head x Vazão

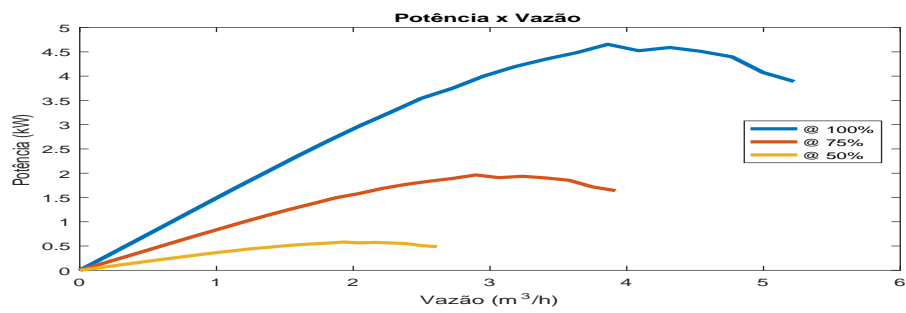


Figura 68: - Potência x Vazão

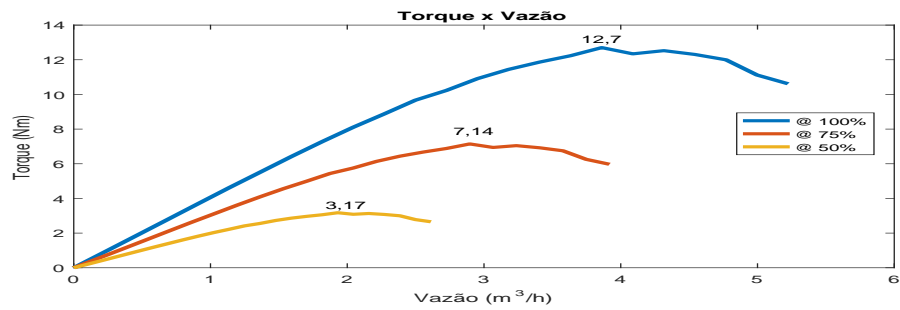


Figura 69: - Torque x Vazão

Os pontos de máximos destacados na Figura 69, serão utilizados para encontrarmos o coeficiente k_2 da Figura 65 (b) . Trata-se do coeficiente de carga que tem uma relação quadrática com a velocidade. Por isso ao dividir o Torque (em seu ponto máximo) pela velocidade, obtêm-se:

$$k_2 = \frac{T_{max}}{\omega_{nominal}} = \frac{12,7 \cdot 60}{3500 \cdot 2 \cdot \pi} = 9,45e^{-5} \quad (50)$$

Pode-se verificar que o mesmo valor de k_2 seria encontrado, caso fosse utilizado valores de torque máximo nas outras condições operacionais, desde que utilizado a respectiva velocidade.

Com o valor inserido caixa de diálogo da carga, é possível simular o motor para verificar o funcionamento. A Figura 70 apresenta o gráfico da velocidade no tempo. Pode-se concluir que o coeficiente k_2 utilizado na simulação foi corretamente calculado, pois o gráfico de velocidade correspondeu ao esperado para este motor, conforme velocidade nominal especificada em catálogo.

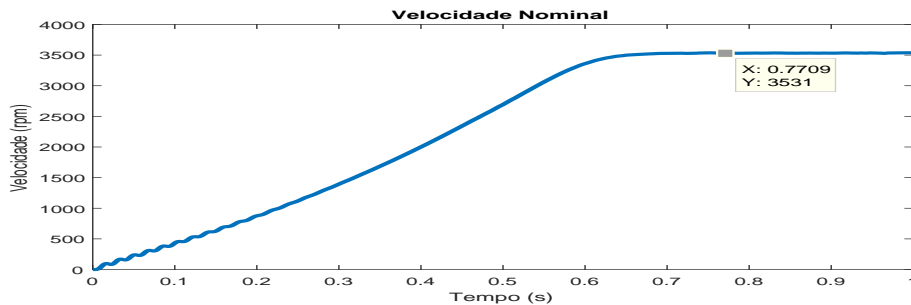


Figura 70: - Velocidade Nominal

3.6 Circuito Completo - Topologia Sistema 1

Após todas considerações feitas, tomando-se cada sub-sistema em separado, apresenta-se o circuito completo da topologia 1.

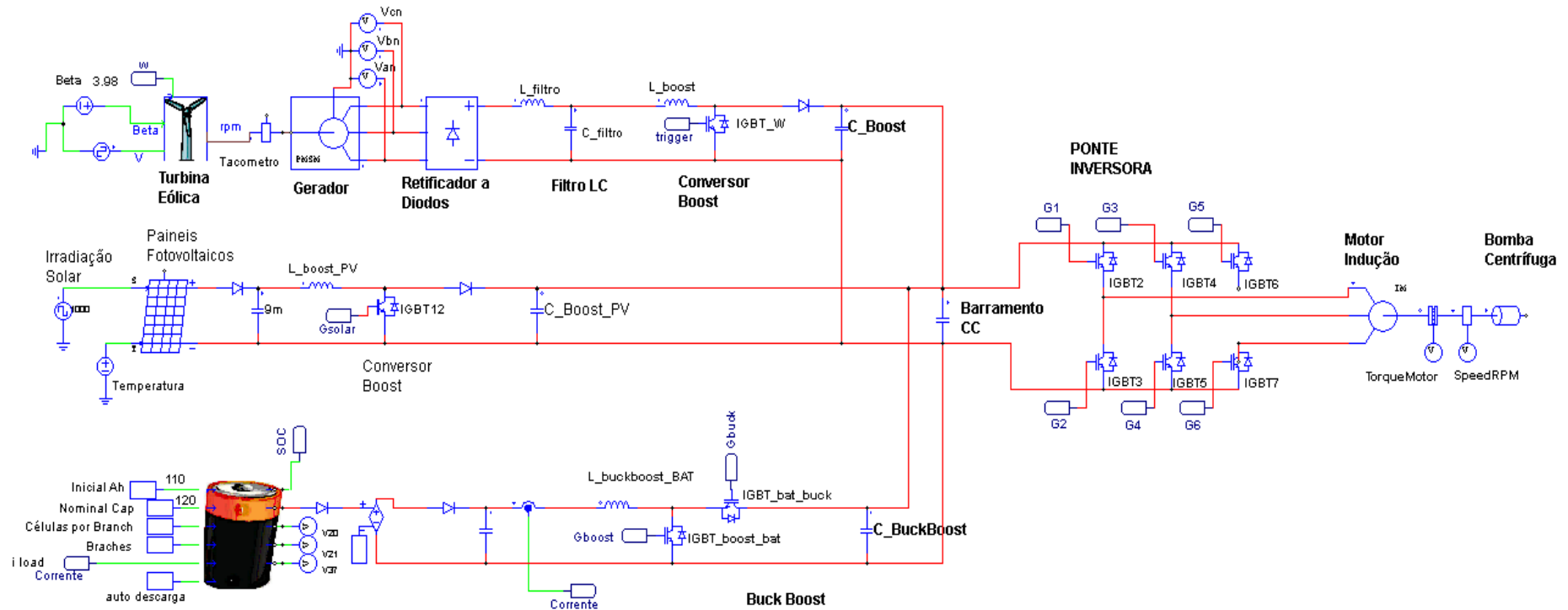


Figura 71: - Circuito Completo - Topologia 1

A apresentação dos resultados será objeto do capítulo 5.

4 MODELAGEM DA PLANTA - TOPOLOGIA SISTEMA 2

Este capítulo será dedicado ao detalhamento da topologia proposta na Figura 18. Trata-se de uma topologia alternativa àquela apresentada no Capítulo 3. Por alternativa, entenda-se no âmbito dos conversores de potência, já que o objetivo geral é o mesmo, ter um sistema de energia renovável para uma planta de dessalinização.

O foco, neste capítulo, será a apresentação do escopo que se diferencia da topologia anterior. De forma que, aquilo que não for destacado neste capítulo, deve ser assumido pelo leitor, que não houve alteração ao que foi abordado no capítulo anterior.

Para facilitar o entendimento, os seguintes sub-sistemas, de forma geral, não sofreram alteração: Sistema Eólico, Sistema Fotovoltaico, Sistema de Baterias e o Skid Osmose Reversa. As mudanças pontuais, serão discutidas a seguir para cada sub sistema.

4.1 Apresentação da Topologia

A topologia proposta envolve uma combinação de um boost clássico, com um elevador de tensão baseado em um multiplicador Cockcroft-Walton. Historicamente a ideia original dos circuitos multiplicadores foi proposta por Greinacher em 1921. Entretanto, ela não teve a devida atenção por um longo tempo, até o experimento realizado por Cockcroft e Walton, utilizando este circuito em 1932[69].

Os circuitos multiplicadores de tensão originalmente foram concebidos para a retificação, entretanto, recentemente vem sendo utilizados com fontes DC [70].

A Figura 72 apresenta a topologia proposta.

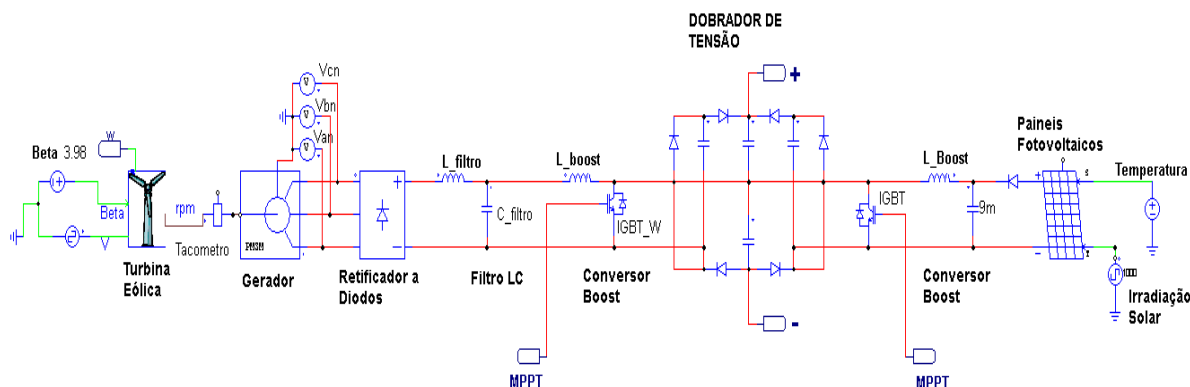


Figura 72: - Topologia Proposta

Os sinais positivo e negativo na Figura 72 indicam os terminais do barramento CC, que por sua vez irão alimentar o inversor. O tipo de inversor escolhido será um NPC (Neutral Pointed Clamped) de três níveis, com diodos de grampeamento,

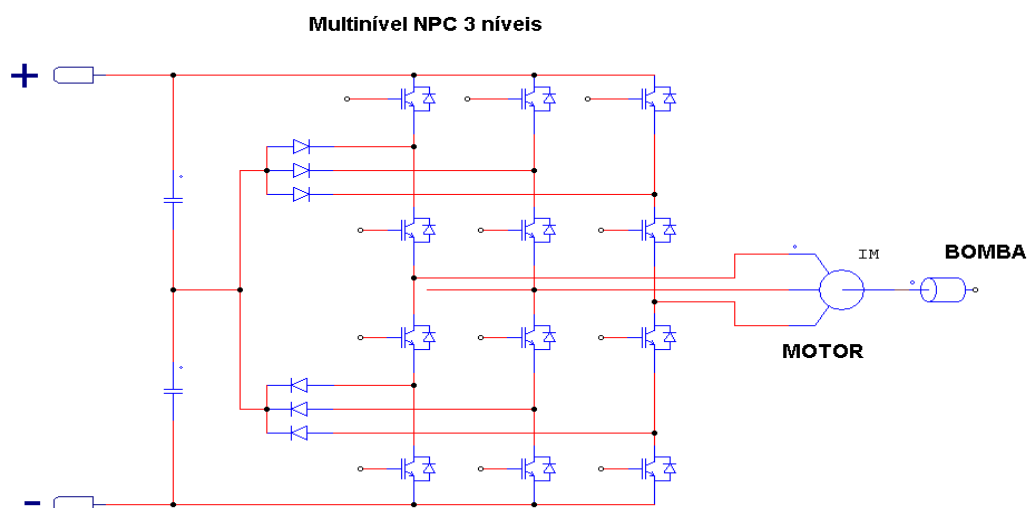


Figura 73: - NPC 3 Níveis

4.2 Sistema Eólico

O multiplicador de tensão é na prática um circuito dobrador. Por ser um dobrador de tensão, é esperado uma folga operacional ao *duty cycle*, quando comparado à topologia anteriormente apresentada.

O ponto acima fica mais evidente, quando o cálculo dos componentes do conversor *boost* é refeito. Ver Tabela 23. Deve ser destacado a alteração feita para cálculo do *duty cycle*, que levou em conta a tensão dobrada na saída do *boost* - item destacado em amarelo.

Da Tabela 23 pode-se extrair que os valores escolhidos para o indutor e capacitor devem ser, respectivamente: $L = 306\mu H$ e $C = 73\mu F$. Estes valores foram usados nas simulações. Em valores comerciais, poderiam ser utilizados $L=1\text{ mH}$ e $C=1\text{ mF}$.

Vale destacar que os valores de *Duty Cycle* foram definidos observando dois aspectos. Um deles, evidentemente, é o MPPT. Outro, não menos importante, é excursionar numa faixa que não comprometa o valor do barramento CC desejável para o inversor (469V). É neste último ponto que, ao utilizar um circuito dobrador, a folga operacional para o *Duty Cycle* se materializa.

Tabela 23: - Cálculo Comoponentes do Conversor - Topologia 2- Sistema Eólico

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
V link CC	469,77	417,57	469,77	417,57
ma	0,8	0,9	0,8	0,9
Potencia Aerogerador	3000 W	1200 W	3000 W	1200 W
Tensao retificada	120	76	120	76
Corrente I _{in}	25	16,77	25	16,77
RL	73,56	58,12	173,08	136,75
D $1-(2V_{in}/V_{out})$	0,489	0,425	0,676	0,635
I _o	12,77	14,36	5,42	6,1
L (μH)	234	204	306	288
C (μF)	66	73	39	46

4.3 Sistema Fotovoltaico

No sistema fotovoltaico, assim como no sistema eólico, o impacto da nova topologia recai sobre o dimensionamento dos componentes do conversor boost. Seguindo o mesmo procedimento adotado na topologia anterior, os vários cenários precisam ser considerados. A Tabela 24 apresenta o dimensionamento dos componentes.

Tabela 24: - Cálculo Comoponentes do Conversor - Topologia 2- Sistema Fotovoltaico

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
V link CC	469,77	417,57	469,77	417,57
ma	0,8	0,9	0,8	0,9
Potência Array Painéis	6400 W	1502 W	6400 W	1502 W
Tensão retificada	183,65	172	183,65	172
Corrente entrada I _{in}	34,85	9,22	34,85	9,22
RL	34,48	27,24	146,92	116,09
D $1-(2V_{in}/V_{out})$	0,218	0,12	0,267	0,176
I _o	27,24	30,65	6,75	7,59
L (μH)	114	63	499	328
C (μF)	63	44	18	15

Da Tabela 24 pode-se extrair que os valores escolhidos para o indutor e capacitor devem ser respectivamente: $L = 499\mu H$ e $C = 63\mu F$. Estes valores foram utilizados nas simulações. E também neste caso, valores comerciais iguais a $L=1$ mH e $C=1$ mF poderiam ser utilizados.

4.4 Inversor NPC

O conversor NPC (Neutral-Point-Clamped) de três níveis fornece uma saída de tensão em três diferentes níveis: $+V_{cc}/2$, 0 e $-V_{cc}/2$. A Figura 74 explica o seu funcionamento. Neste circuito o barramento CC é obtido por dois capacitores, $C1$ e $C2$, ligados em série, onde o ponto médio destes capacitores é definido como *Neutral Point*.

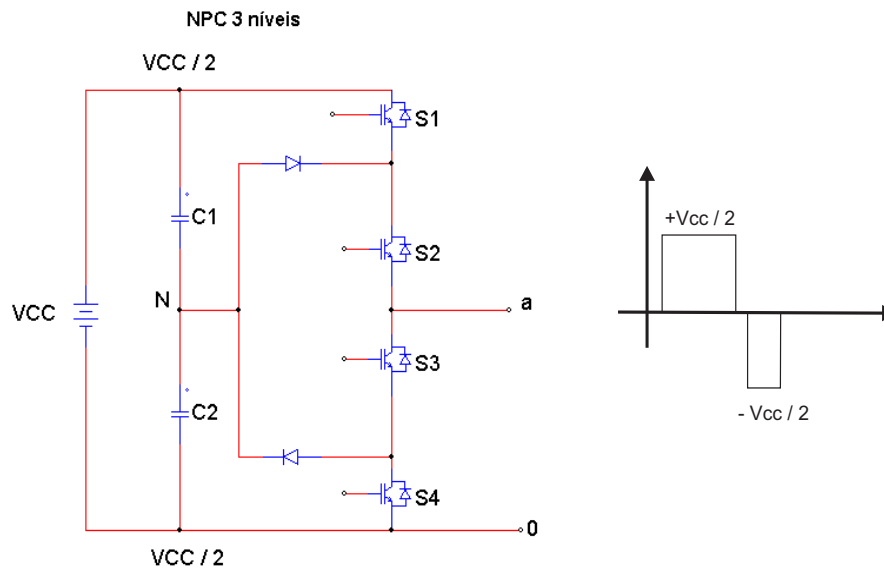


Figura 74: - NPC 3 Níveis - Funcionamento

A obtenção dos diferentes níveis de tensão na saída é realizada pelo adequado disparo das chaves de potência. A Tabela 25 mostra a sequência de chaveamento. Deve-se notar que há pares de chaves que são complementares, ou seja, uma chave nunca está aberta, caso a outra esteja. São elas: $S1$ e $S3$; $S2$ e $S4$.

Tabela 25: - Sequência de Chaveamento

Tensão de Saída	Chaves acionadas
$V_{cc}/2$	$S1$ e $S2$
0	$S2$ e $S3$
$-V_{cc}/2$	$S3$ e $S4$

Outro sutil detalhe é que os tempos de condução das chaves não são iguais. O gráfico da Figura 74 mostra esse detalhe. Isto ocorre pois os períodos de condução das chaves externas ($S1$ e $S4$) é inferior ao das chaves internas ($S2$ e $S3$). A razão é que $S1$

conduz durante o semiciclo positivo, S4 conduz durante o semiciclo negativo, enquanto as chaves S2 e S3 conduzem durante todo o ciclo.

O conversor NPC apresenta uma série de vantagens e desvantagens [71].

Vantagens:

- A tensão sobre os dispositivos semicondutores é a tensão sobre um capacitor de entrada, $V_{cc}/(n - 1)$, onde n é o número de níveis de tensão.
- O número de capacitores requeridos é menor que em outras topologias multiníveis. Partindo do princípio que os armazenadores de energia são os que possuem um maior custo no conversor, este é um ponto importante.
- Pode ser conectado diretamente a um barramento contínuo, sem que seja necessário criar outros barramentos.
- Não requer transformadores.
- A mudança de um nível a outro se dá acionando apenas uma única chave.

Desvantagens:

- Os diodos de grampeamento devem ser de recuperação rápida e capazes de conduzir a corrente nominal do conversor.
- É necessário manter o equilíbrio das tensões nos capacitores do barramento CC. O equilíbrio dos capacitores torna-se mais difícil à medida que o número de níveis aumenta.

A Figura 75 apresenta o circuito de chaveamento do NPC, o qual recebeu o mesmo controle de índice de modulação utilizado na Topologia 1.

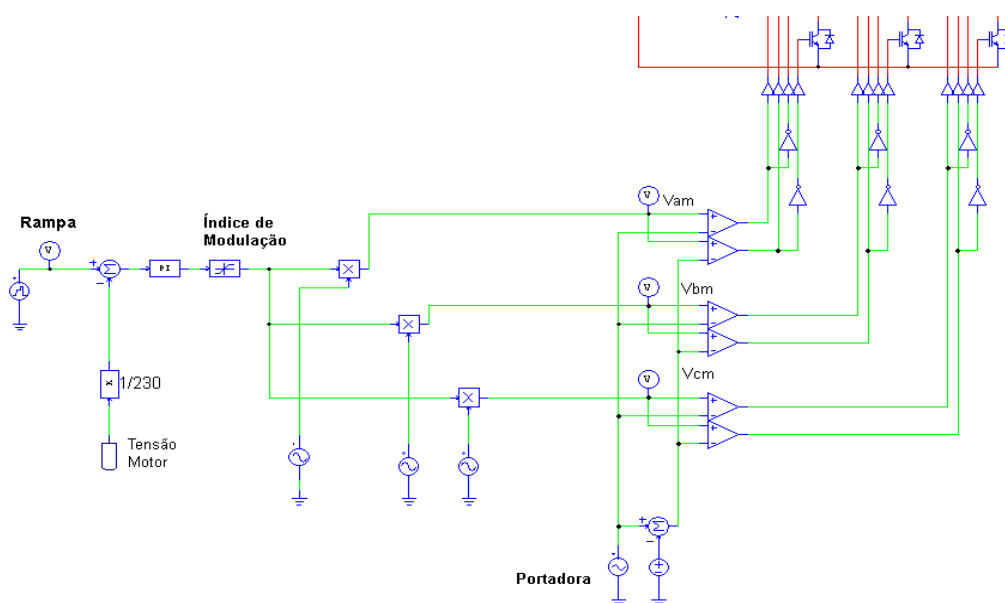


Figura 75: - Circuito da lógica de Chaveamento - Inversor NPC

4.5 Circuito Completo - Topologia 2

A Figura 76 apresenta o circuito completo da Topologia 2. A apresentação dos resultados será objeto do capítulo 5.

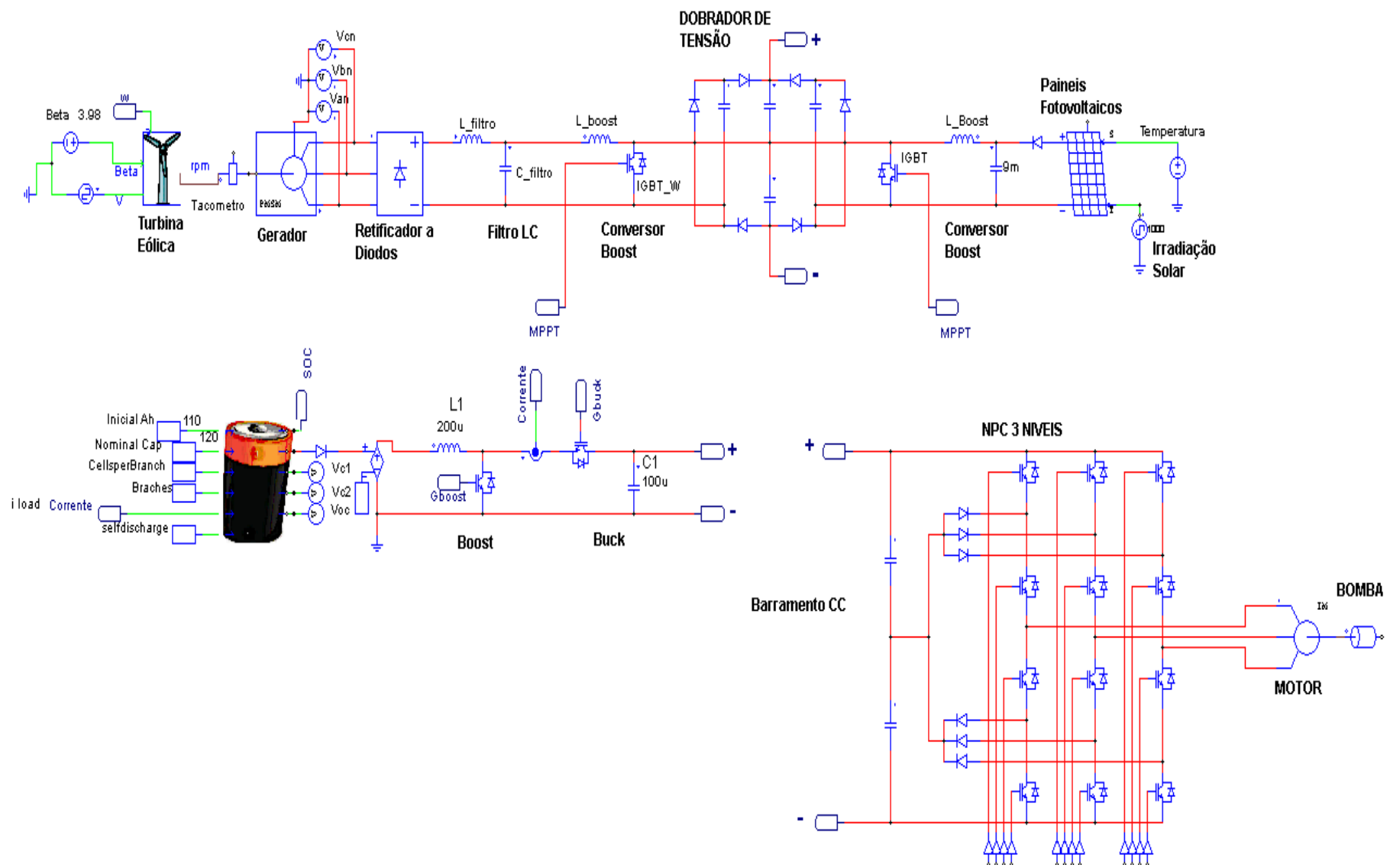


Figura 76: - Circuito Completo - Topologia 2

5 APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados das simulações feitas no software comercial PSIM, para os dois sistemas abordados. Além de demonstrar a funcionalidade do sistema, busca-se apresentar diferentes cenários de disponibilidade de vento e sol.

5.1 Sistema 1

A seguir serão apresentados as simulações relativas ao sistema 1, que foi detalhado no capítulo 3.

5.1.1 Cenário 1

O primeiro cenário é considerado a situação nominal, tanto de vento quanto de irradiação solar. A Tabela 26 apresenta o cenário 1 considerado.

Tabela 26: - Cenário 1

Geração			
Sistema	Vento/Irradiação	Status	Potência
Aerogerador	12 m/s	nominal	3 kW
Fotovoltaico	1000 W/m ²	nominal	6,4 kW
Carga			
Motor	5,2 kW		

A Figura 77 apresenta a Potência de Saída (motor) e as Potências de Entrada do Sistema (Aerogerador e Fotovoltaico)

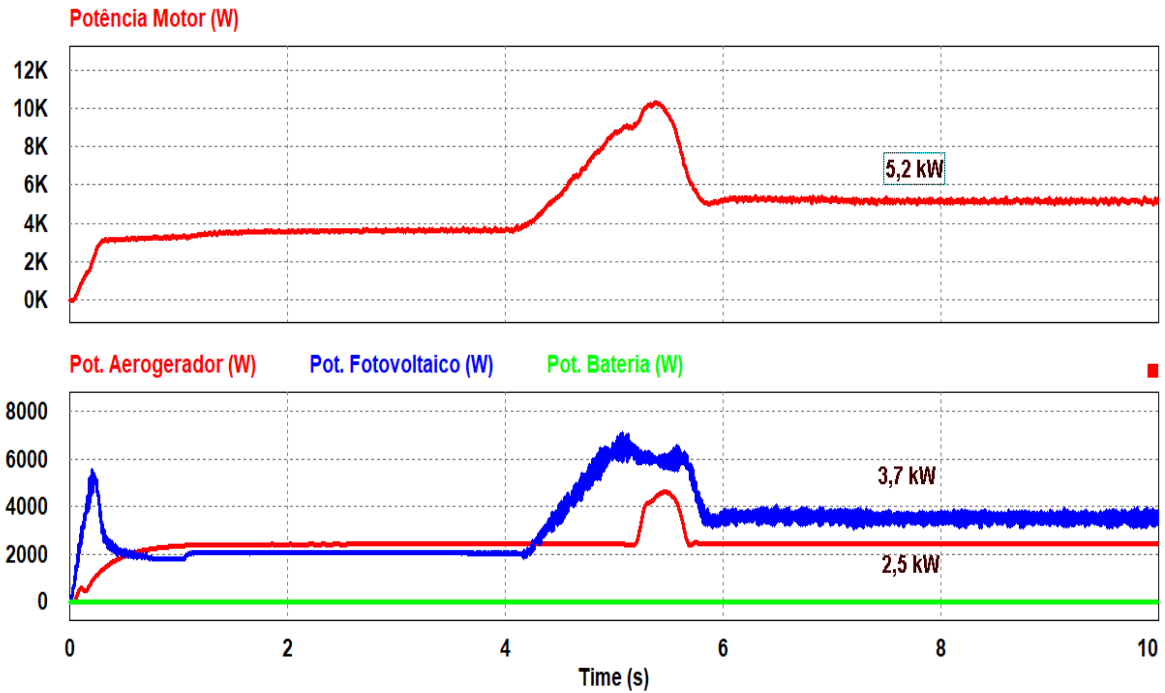


Figura 77: - Potência Motor e Potência Aerogerador, Fotovoltaico e Bateria

Nota-se que a potência nominal demandada pelo motor foi suprida pelo sistema de geração.

A Figura 78 apresenta a tensão eficaz no motor e a velocidade em rpm.

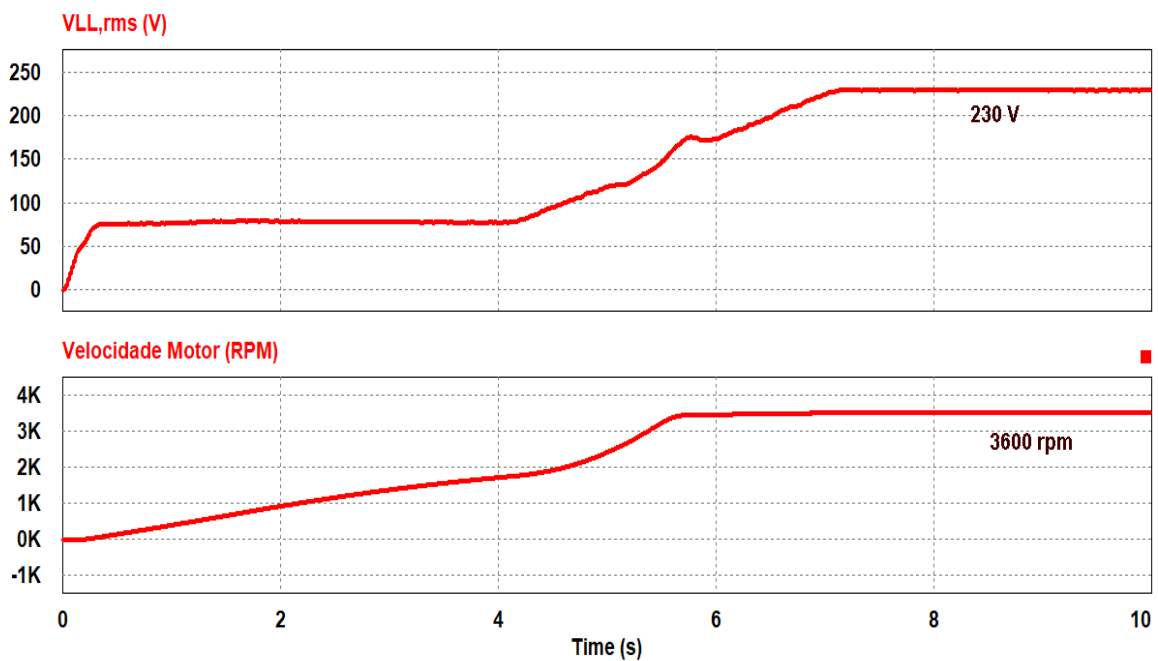


Figura 78: - Tensão Eficaz e Velocidade do Motor

Os valores de tensão e velocidade nominal correspondem ao esperado pelo motor. A Figura 79 apresenta a tensão no barramento CC.

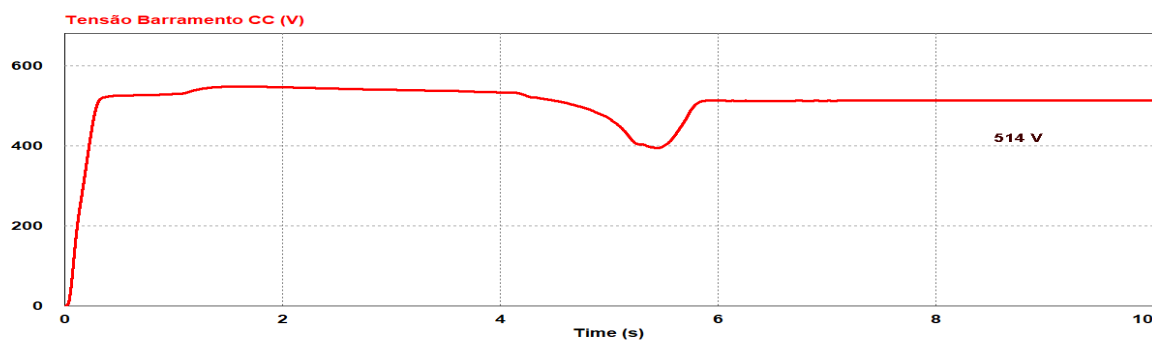


Figura 79: - Tensão Barramento CC

A Figura 80 apresenta a corrente no motor.

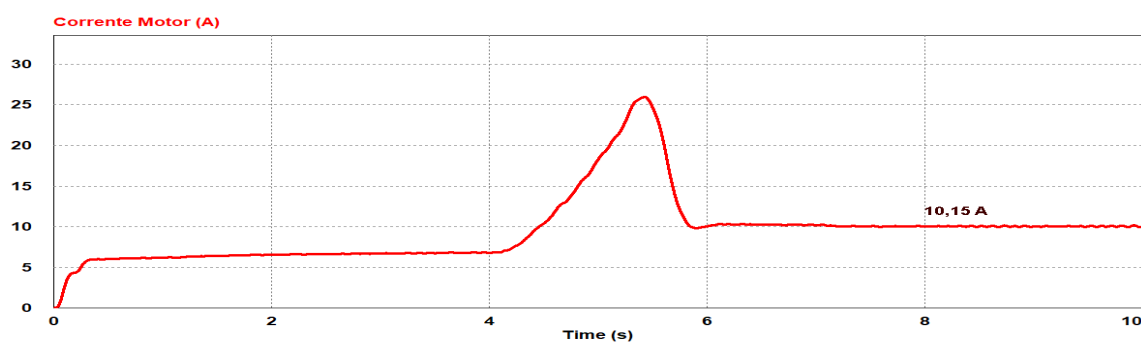


Figura 80: - Corrente no motor - Partida suave

Nota-se que a corrente no motor apresenta-se suave, sem o pico de corrente de partida típica de um motor de indução. Isto se deve a rampa de partida que foi programada. A Figura 81 apresenta em azul a corrente no motor para a partida normal, ou seja, sem a implementação da partida suave. Em seu pico é possível observar que a corrente atingiu 35 A. Muito diferente da situação da partida suave, onde a corrente atingiu no máximo cerca de 25 A.

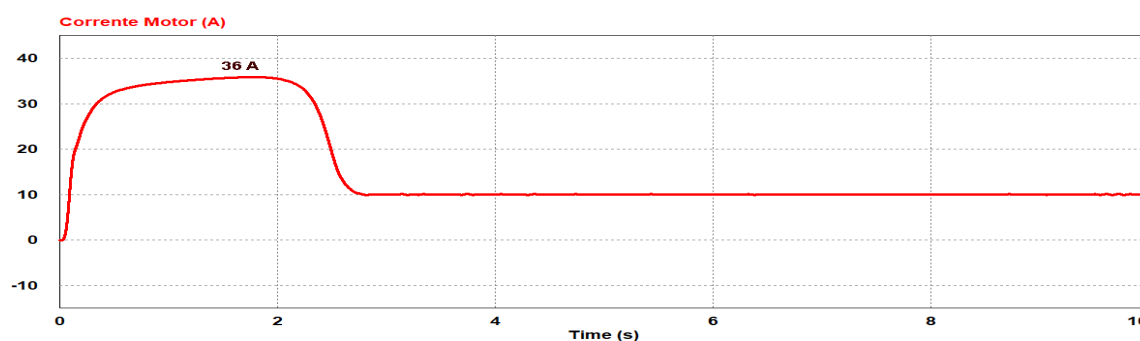


Figura 81: - Corrente no motor - Partida direta

5.1.2 Cenário 2

A Tabela 27 apresenta o cenário 2 considerado. Neste cenário vale destacar que é considerado a situação de vento mínimo, e também de irradiação solar mínima. Pode-se dizer que se trata do pior cenário para o sistema de geração. Para esta condição é esperado que a bateria supra as necessidades do sistema.

Tabela 27: - Cenário 2

Geração			
Sistema	Vento/Irradiação	Status	Potência
Aerogerador	9 m/s	mínimo	1,1 kW
Fotovoltaico	250 W/m ²	mínimo	1,2 kW
Carga			
Motor	5,2 kW		

A Figura 82 apresenta a Potência de Saída (motor) para o cenário 2. Apesar de um pouco de oscilação na saída, o valor médio é de 5,25 kW, o que atende a carga motórica.

A Figura 83 mostra a contribuição de cada elemento da geração. Como alertado anteriormente, o destaque fica para a bateria, que assumiu o suprimento de potência ao sistema, dado a insuficiência do conjunto Aerogerador e Fotovoltaico.



Figura 82: - Potência Motor

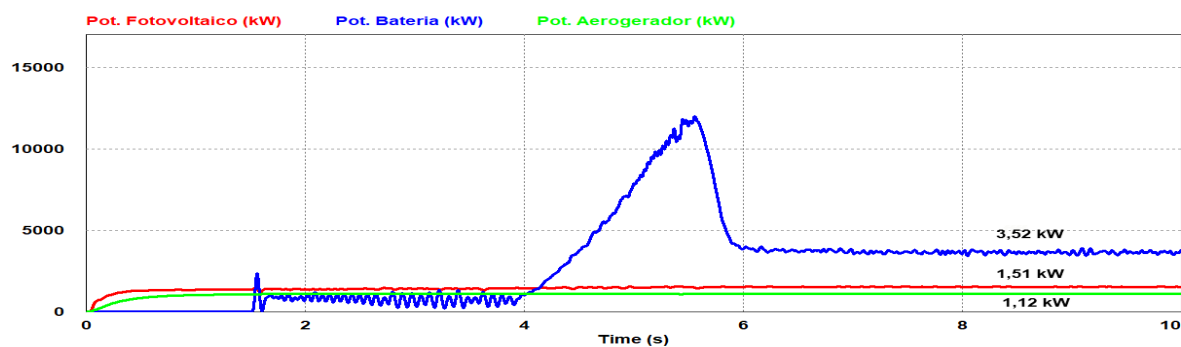


Figura 83: - Potência Motor

A Figura 84 apresenta a tensão no barramento CC e a tensão eficaz no motor.

Pode-se concluir que graças a influência da bateria, o sistema se comportou adequadamente.

A Figura 85 apresenta a corrente no motor.

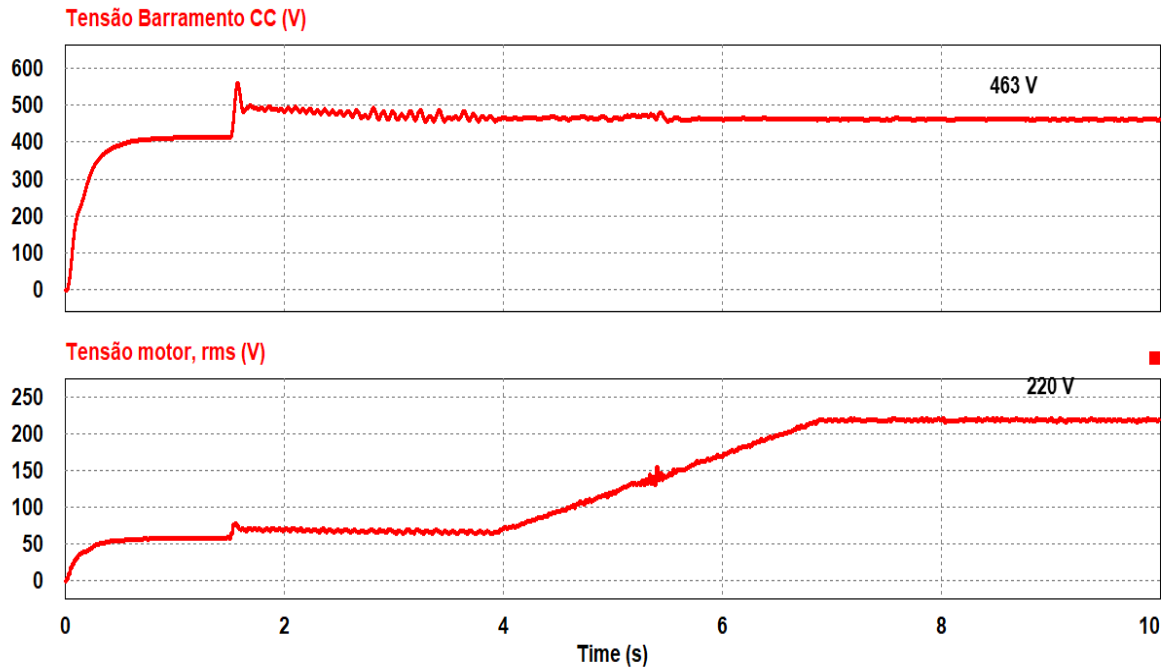


Figura 84: - Tensão Barramento CC e no Motor

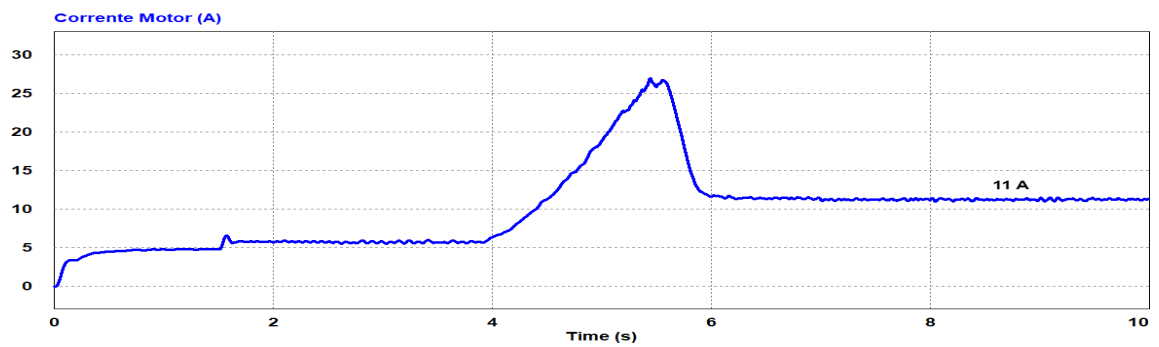


Figura 85: - Corrente Motor

A Figura 86 mostra a velocidade atingida pelo motor e também a rampa para partida suave.

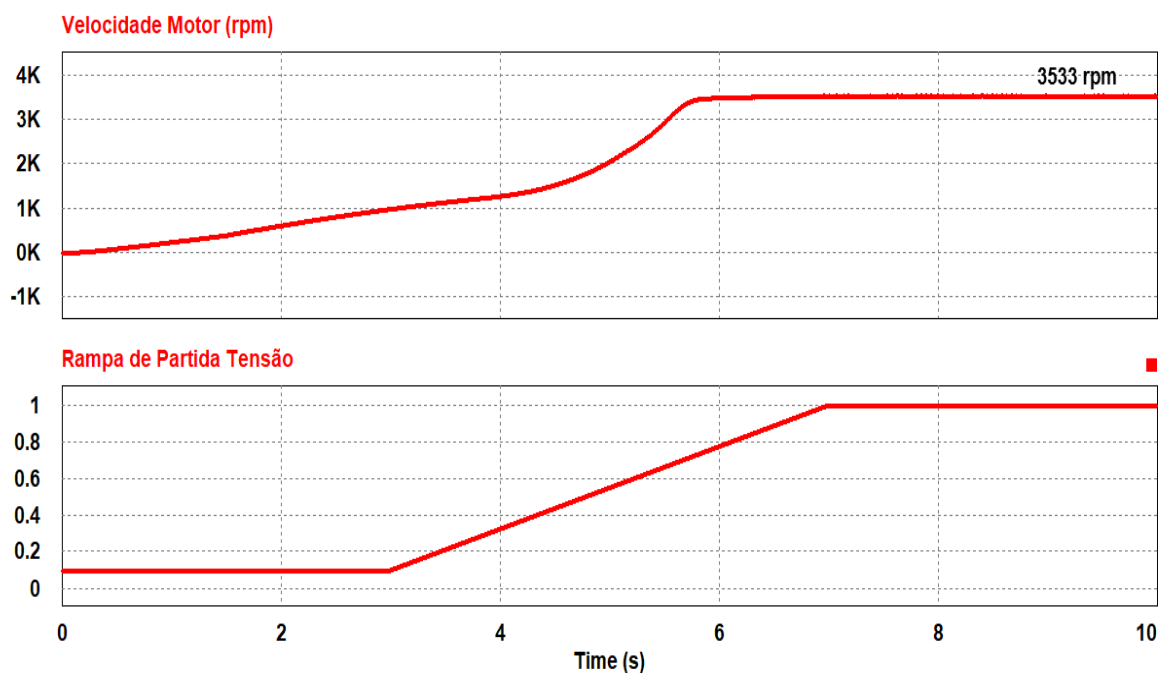


Figura 86: - Velocidade Motor e rampa de partida

5.1.3 Cenário 3

A Tabela 28 apresenta o 3º cenário considerado. Neste cenário é considerado a situação de vento e sol em suas condições nominais. Para a carga, será simulado uma condição de carga máxima, ou seja, uma carga que demande toda a energia capaz de ser suprida pelo sistema de geração.

Vale esclarecer que a carga simulada anteriormente é a carga principal do sistema - motor da planta de Osmose Reversa. Contudo, o sistema de geração foi dimensionado para uma capacidade superior, visando dois objetivos: acomodar flutuações inerentes à geração; ser capaz de alimentar outras cargas além do núcleo da planta principal. Como por exemplo, alimentar um motor adicional de captação da água a ser dessalinizada.

Tabela 28: - Cenário 3

Geração			
Sistema	Vento/Irradiação	Status	Potência
Aerogerador	12 m/s	nominal	3 kW
Fotovoltaico	1000 W/m ²	nominal	6,4 kW
Carga			
Resistiva	9,4 kW		

A Figura 87 apresenta a Potência de Saída (motor) e as Potências de Entrada do Sistema (Aerogerador e Fotovoltaico)

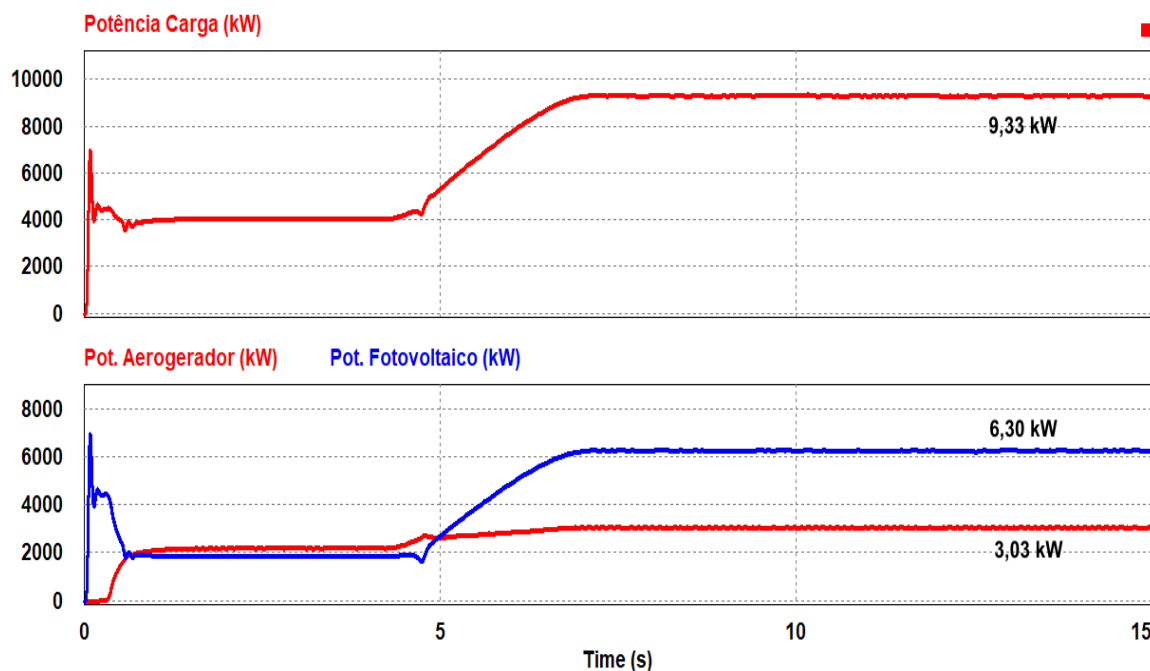


Figura 87: - Potência Motor e Potência Aerogerador e Fotovoltaico

Nota-se pela Figura 87 que o sistema supriu a potência requerida pela carga.

A Figura 88 mostra a rampa de tensão utilizada na partida do sistema. Ela explica os perfis de potência apresentados na Figura 87.

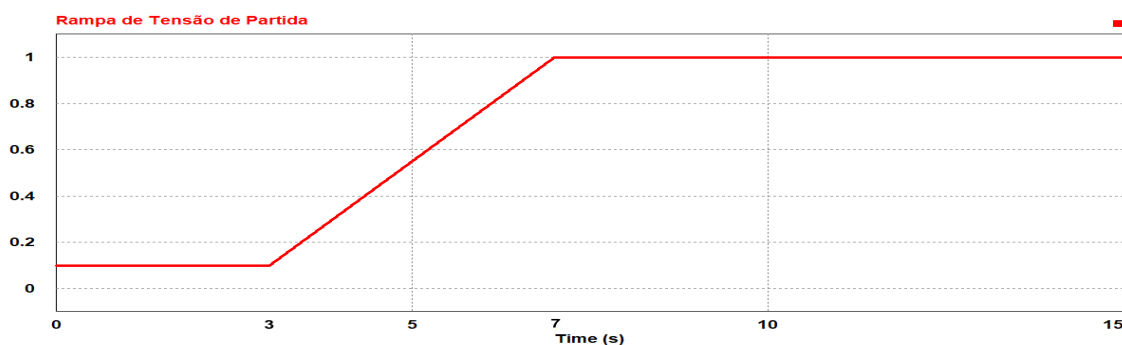


Figura 88: - Potência Bateria

A Figura 89 apresenta o barramento CC e a tensão na carga. Conclui-se que mesmo com o aumento da potência requerida pela carga, manteve-se nível do barramento CC e a tensão nominal no motor desejados.

A Figura 90 apresenta a corrente na carga e as tensões nos terminais do Aerogerador

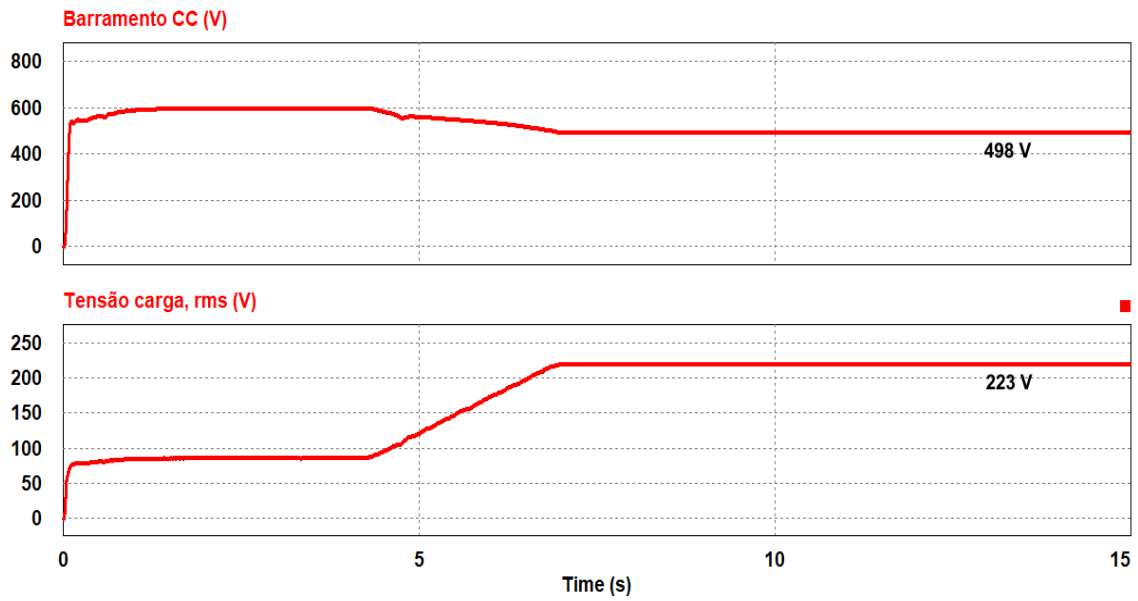


Figura 89: - Tensão barramento CC e Tensão na carga

e do conjunto de painéis. Nota-se que a tensão na saída do conjunto de painéis está dentro da faixa de extração de máxima potência. Diferente do que ocorre com a tensão na saída do aerogerador, que apresentou um valor inferior ao identificado com carga motórica.

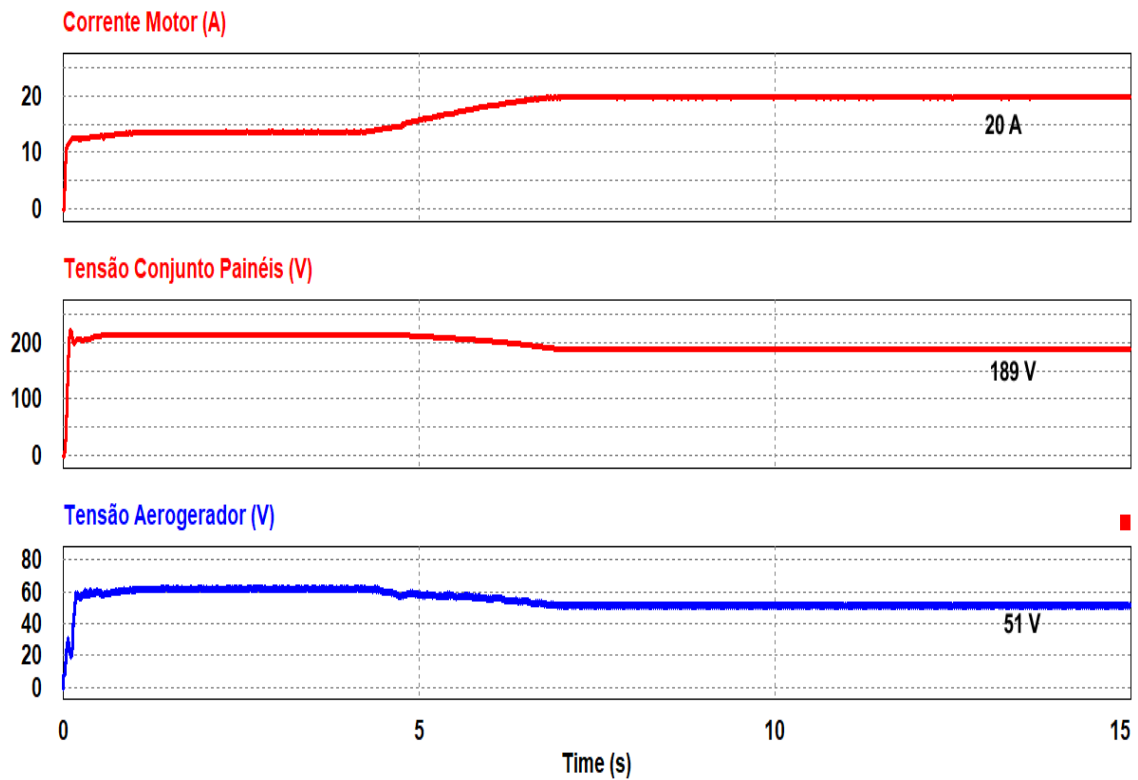


Figura 90: - Corrente Carga / Tensão Matriz Painéis / Tensão Aerogerador

5.2 Sistema 2

A seguir serão apresentadas as simulações relativas ao sistema 2, que foi detalhado no capítulo 4.

5.2.1 Cenário 1

O primeiro cenário é considerado a situação nominal, tanto de vento quanto de irradiação solar. A Tabela 29 apresenta o cenário 1 considerado.

Tabela 29: - Cenário 1

Geração			
Sistema	Vento/Irradiação	Status	Potência
Aerogerador	12 m/s	nominal	3 kW
Fotovoltaico	1000 W/m ²	nominal	6,4 kW
Carga			
Motor	5,2 kW		

A Figura 91 apresenta a Potência de Saída (motor) e as Potências de Entrada do Sistema Aerogerador e Fotovoltaico.

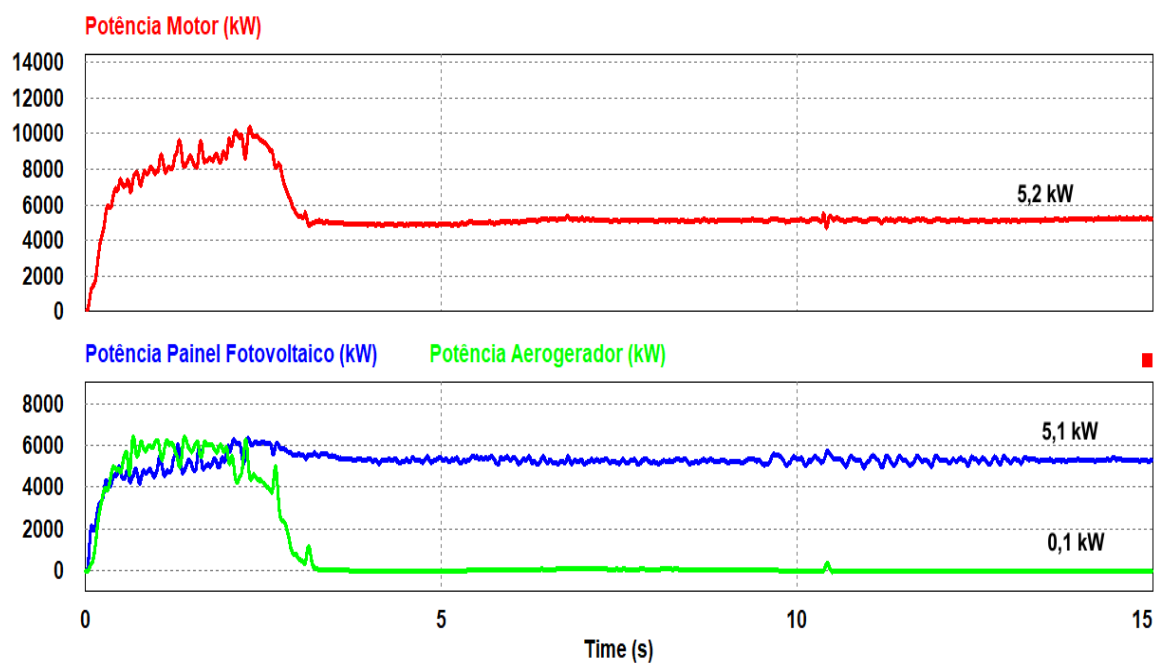


Figura 91: - Potência Motor e Potência Aerogerador e Fotovoltaico

Como parte do procedimento de partida, o sistema de baterias foi inibido durante os primeiros segundos. Passados os primeiros segundos, com o sistema em regime, a bateria não é solicitada, uma vez que o conjunto - Aerogerador e Fotovoltaico - são capazes de suprir a demanda de carga. A Figura 92 apresenta a potência da bateria nesta simulação.

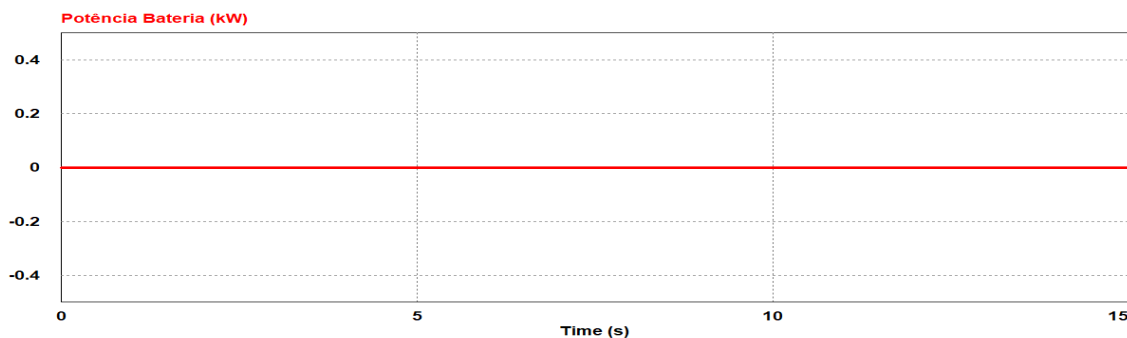


Figura 92: - Potência Bateria

A Figura 93 apresenta o barramento CC e a tensão no motor.

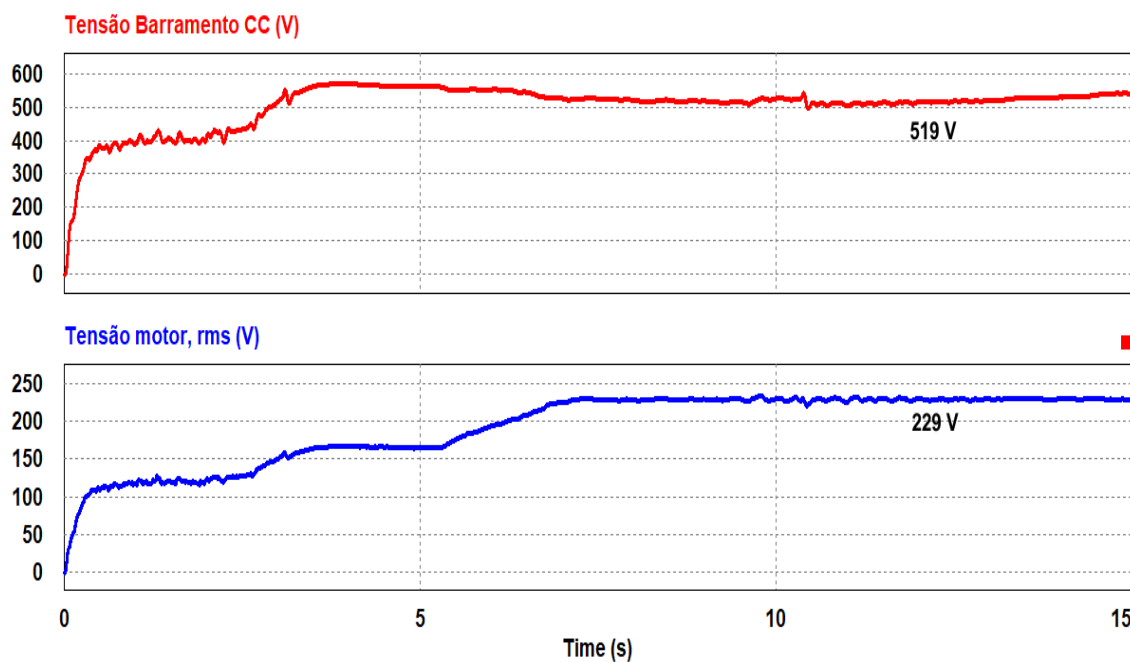


Figura 93: - Tensão Barramento CC e Tensão motor

A Figura 94 a velocidade nominal atingida pelo motor bem como a rampa de partida que foi programada.

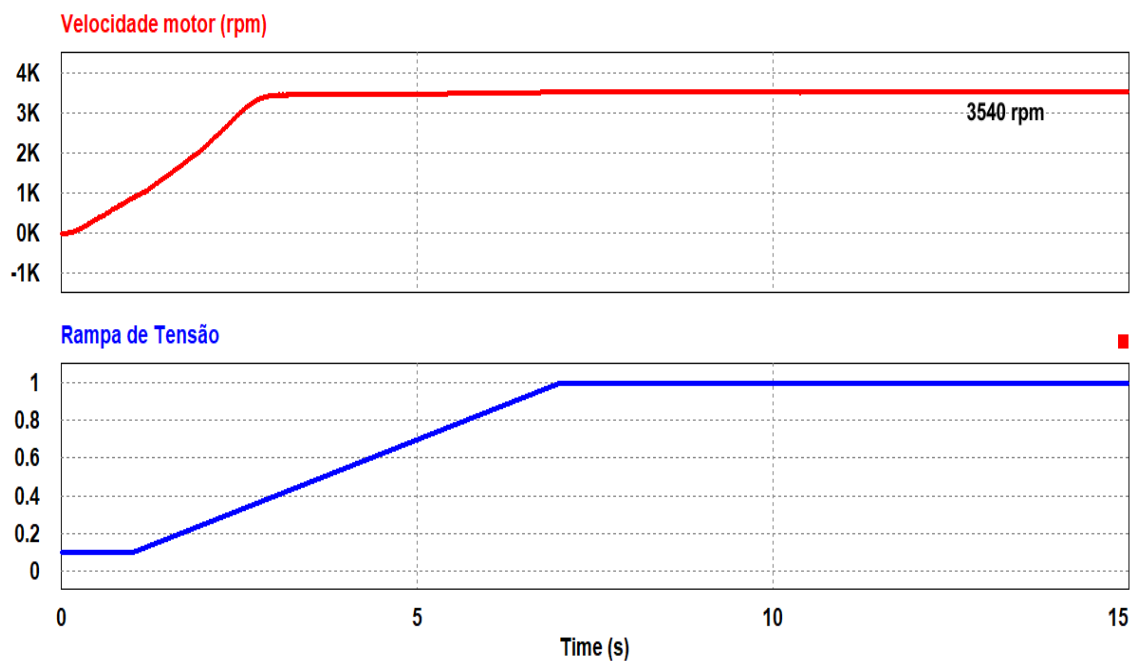


Figura 94: - Velocidade Motor e Partida em rampa

5.2.2 Cenário 2

Neste cenário considerou-se a disponibilidade de Potência em sua condição nominal, tanto na geração como também no consumo (carga). Para simular a carga foi considerado uma carga Resistiva capaz de extrair a potência nominal.

Tabela 30: - Cenário 2

Geração			
Sistema	Vento/Irradiação	Status	Potência
Aerogerador	12 m/s	nominal	3 kW
Fotovoltaico	1000 W/m ²	nominal	6,4 kW
Carga			
Resistiva	9,4 kW		

A Figura 95 apresenta a Potência de Saída na carga resistiva e as Potências de Entrada do Sistema Aerogerador e Fotovoltaico.

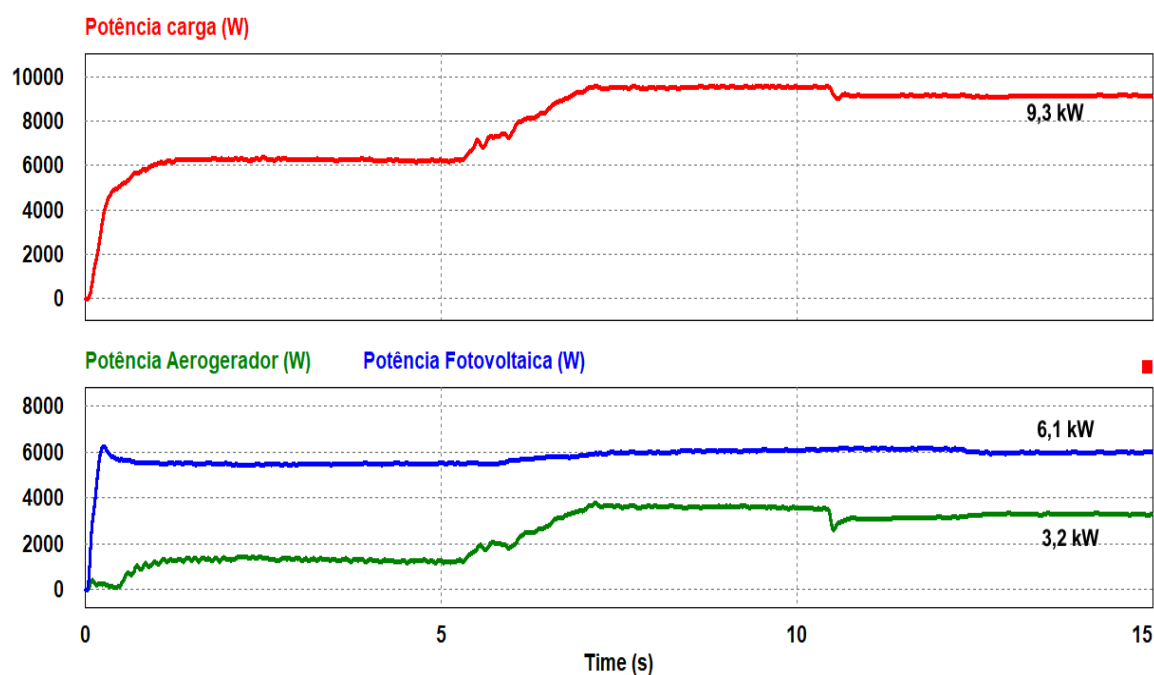


Figura 95: - Potência Motor e Potência Aerogerador e Fotovoltaico

Pode-se notar que a potência máxima extraída do sistema corresponde a condição nominal esperada. Conclui-se que é possível extrair uma potência superior ao motor do sistema principal de osmose reversa (5,2 kW). Em outras palavras, pode-se interligar

outras cargas além do motor principal. Vale destacar que, caso esta possibilidade seja considerada, deve-se ter uma preocupação adicional com o barramento CC. Vale destacar que a rampa de partida de tensão, considerada nesta simulação, foi a mesma da Figura 94.

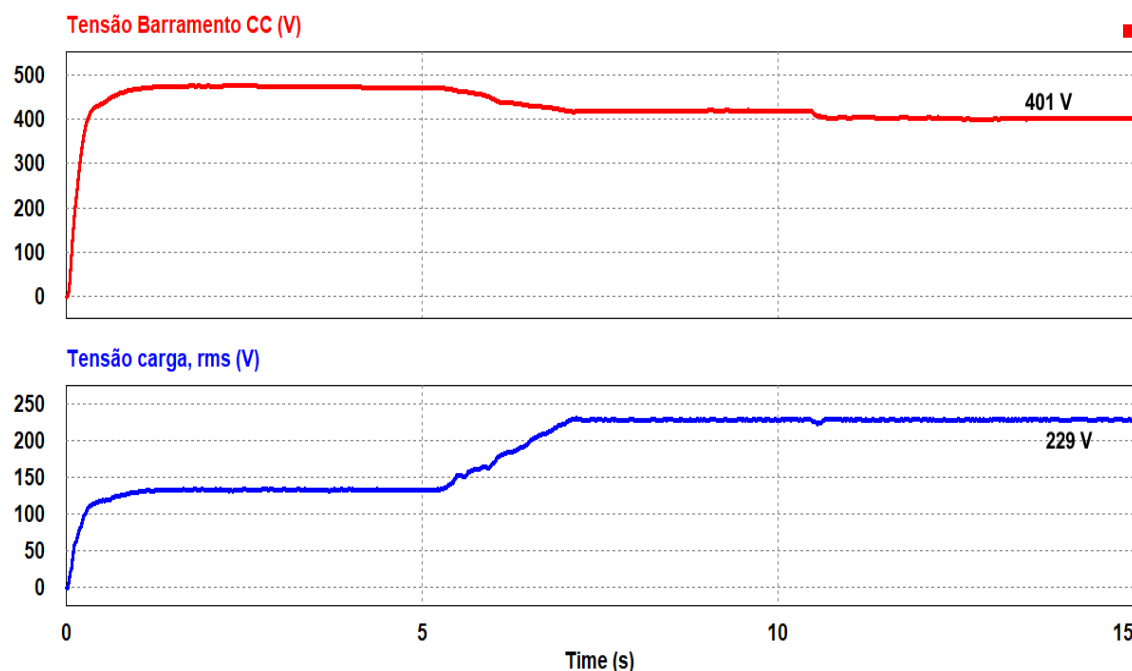


Figura 96: - Tensão barramento CC e Tensão no Motor

A Figura 97 mostra as tensões nos terminais do array de painéis e na saída do aerogerador. Conclui-se que, conforme levantamento feito nos capítulos anteriores, estes valores de tensão estão dentro das faixas esperadas para extração das maiores potência. Isto, por sua vez, contribui para a manutenção da tensão esperada no barramento CC, e por consequência da alimentação plena da carga.

A Figura 98 apresenta a intensidade luminosa e a velocidade de vento considerada neste cenário.

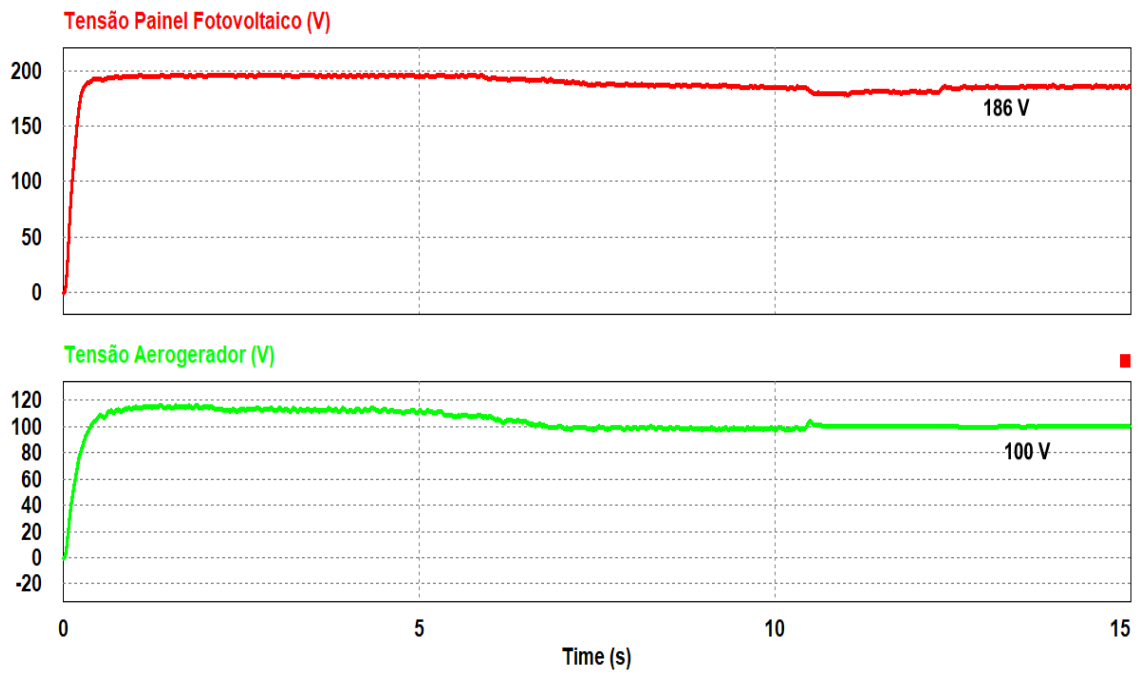


Figura 97: - Tensão Array de Painéis e Tensão Aerogerador

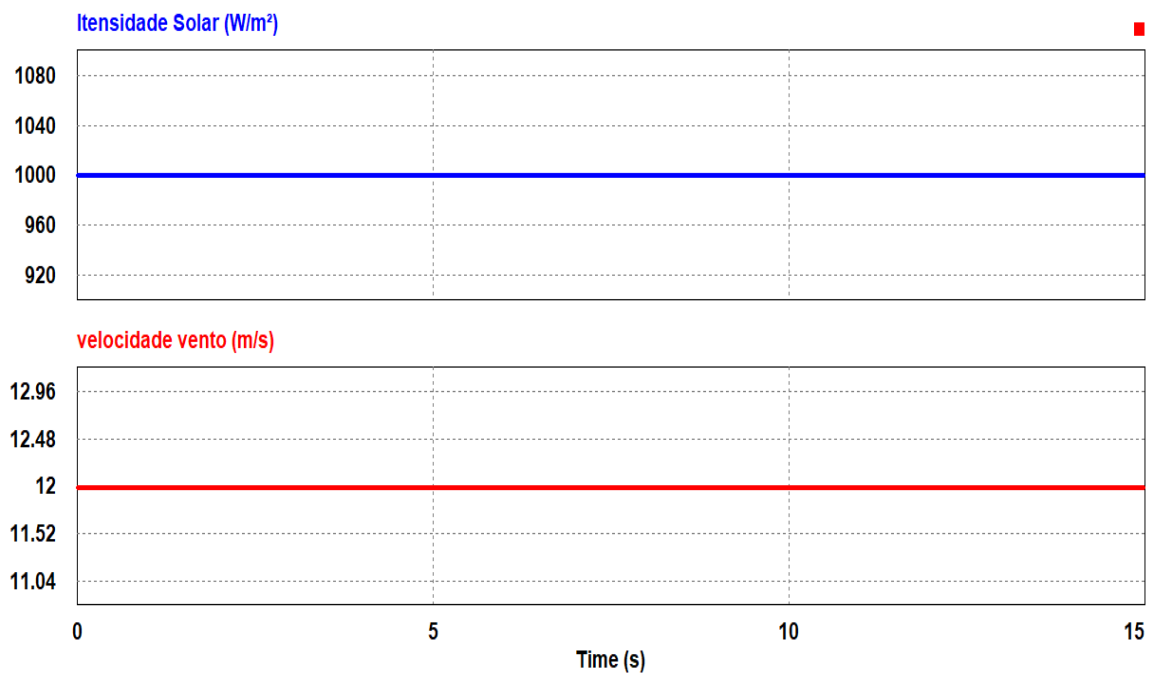


Figura 98: - Intensidade Luminosa e Velocidade de Vento - Cenário 2

CONCLUSÃO

Este trabalho abordou dois estudos de casos, considerando duas abordagens distintas de se integrar um sistema híbrido de energia renovável a uma planta de dessalinização. O sistema híbrido contou com uma matriz de painéis solares e um aerogerador. O sistema híbrido foi auxiliado por um banco de baterias. Com relação à planta de dessalinização, optou-se pela tecnologia da Osmose Reversa.

Emular as condições de funcionamento de todos estes sub sistemas, dentro da plataforma do *software* comercial PSIM, foi um grande de desafio. Algumas condições de contornos tiveram que ser assumidas, como no caso do aerogerador, que precisou ser totalmente implementado por meio de equações matemáticas, uma vez que o modelo nativo do *software* não se mostrou aderente à performance do equipamento comercial utilizado como referência.

Para o adequado funcionamento do sistemas de geração de energia renovável, foram estudados vários algoritmos de MPPT, tendo sido utilizado um sistema mais simples no sistema eólico e um outro um pouco mais elaborado no sistema solar. Ambos foram implementados em linguagem C. A escolha dos algoritmos foi baseada no critério da simplicidade de operação e naqueles que envolviam os menores custos com sensoreamento.

O sistema de baterias também foi emulado em linguagem C, utilizando-se uma dissertação [62], especificamente escrita sobre modelos de bateria. Evidentemente, algumas adaptações tiveram que ser feitas no código em C, para se adequar ao equipamento comercial que buscou-se referenciar. Um desafio, neste ponto, foi equilibrar o mapeamento das equações matemáticas para dentro do ambiente de variáveis elétricas.

O dimensionamento da capacidade do sistema híbrido de geração mostrou-se bastante assertivo, conforme conclui-se das simulações, especialmente se for considerada a energia necessária para a partida de motores de indução, mesmo tendo implementado uma partida suave. Uma partida direta seria inviável para o sistema proposto.

As duas configurações de sistema mostraram-se funcionais. Contudo, deve ser destacado que a segunda topologia de sistema proposta, apresentou resultados melhores em condições de máxima carga. Quantitativamente, a tensão no barramento CC e na carga apresentou valores mais próximos do desejado, mesmo em condições adversas. Como ficou evidenciado quando comparado o cenário 3 do Sistema 1, frente ao cenário 2 do Sistema 2.

TRABALHOS FUTUROS

Como trabalho futuro, poderia ser aproveitado o esforço de integração que já foi feito, e aprofundar algumas questões, tais como o levantamento das perdas ocorridas neste circuito, visto que este ponto foi ignorado neste trabalho.

Outro ponto, são os controladores PI que foram utilizados poderiam ter os parâmetros mais discutidos e aprofundados.

Outras melhorias no controle MPPT poderiam ser estudadas. Um exemplo seria possibilidade de se utilizar um controle em cascata no chaveamento do boost. Com um controle interno regulando o MPPT e um externo regulando o barramento CC.

Do ponto de vista do próprio MPPT, poderia ser feito uma simulação utilizando outros algoritmos, de modo a se fazer uma escolha baseada em performance.

Caberia também uma discussão mais aprofundada sobre o papel do sistema de baterias neste trabalho. Outras alternativas podem ser estudadas, como por exemplo, o armazenamento da água em reservatórios específicos. Baterias são tidas como complexas e com passível ambiental discutível. Contudo, não existe solução perfeita, a implantação de reservatórios em ambientes com pouca infraestrutura pode não ser trivial.

REFERÊNCIAS

- 1 GHAFFOUR, N. The challenge of capacity-building strategies and perspectives for desalination for sustainable water use in mena. *Desalination and Water Treatment*, Taylor & Francis, v. 5, n. 1-3, p. 48–53, 2009.
- 2 IDADESAL.ORG. *Desalination by the Numbers*. Disponível em: <http://www.teleco.com.br/ncel.aps>. Acesso em: 21 de Maio de 2016.
- 3 Global Water Intelligence (GWI/IDA DesalData). *Market Profile and Desalination Markets, 2013?2014 Yearbooks and GWI*. Disponível em: <http://www.desaldata.com>. Acesso em: 02 de Junho de 2016.
- 4 Water World. *GLOBAL DESALINATION CAPACITY GROWING SUBSTANTIALLY, FINDS STUDY*. Disponível em: <http://www.waterworld.com/articles/2013/10/global-desalination-capacity-tops-80-million-cubic-meters-per-day.html>. Acesso em: 06 de Junho de 2017.
- 5 QAZI, S. *Standalone Photovoltaic (PV) Systems for Disaster Relief and Remote Areas*. [S.l.]: Elsevier, 2016.
- 6 ZHOU, C.; LI, Y. Analysis and comparison between current major technologies of seawater desalination. *Power Station Auxiliary Equipment*, v. 4, p. 001, 2008.
- 7 LIU, X.; LIU, D.; SHEN, S.; CHEN, W.; CAO, G. Comparative study on parallel feed and mixed feed lt-med desalination systems. In: IEEE. *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2011 Asia-Pacific*. [S.l.], 2011. p. 1–4.
- 8 ELTAWIL, M. A.; ZHENGMING, Z.; YUAN, L. A review of renewable energy technologies integrated with desalination systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 13, n. 9, p. 2245–2262, 2009.
- 9 MECO MARINE OIL GAS. *Marine Vapor Compression*. Disponível em: [http://www.meco.com/public/userfiles/2013/Size\\$_and\\$_Utility_Sheets/](http://www.meco.com/public/userfiles/2013/Size$_and$_Utility_Sheets/). Acesso em: 20 de Julho de 2016.
- 10 CADOTTE, J.; PETERSEN, R.; LARSON, R.; ERICKSON, E. A new thin-film composite seawater reverse osmosis membrane. *Desalination*, Elsevier, v. 32, p. 25–31, 1980.
- 11 AHMAD, A.; OOI, B.; MOHAMMAD, A. W.; CHOUDHURY, J. Development of a highly hydrophilic nanofiltration membrane for desalination and water treatment. *Desalination*, Elsevier, v. 168, p. 215–221, 2004.
- 12 SCHÄFER, A. I.; FANE, A.; WAITE, T. D. *Nanofiltration: principles and applications*. [S.l.]: Elsevier, 2005.
- 13 IRVINE, E.; WELCH, D.; SMITH, A.; RACHWAL, T. Nanofiltration for colour removal-8 years' operational experience in scotland. *Water Science and Technology: Water Supply*, IWA Publishing, v. 1, n. 5-6, p. 55–63, 2001.

- 14 HAMED, O. A. et al. Nanofiltration (nf) membrane pretreatment of swro feed & msf make up. *Research & Development Center, Saline Water Conversion Corporation, Citeseer*, 2005.
- 15 ZHOU, D.; ZHU, L.; FU, Y.; ZHU, M.; XUE, L. Development of lower cost seawater desalination processes using nanofiltration technologies? a review. *Desalination*, Elsevier, v. 376, p. 109–116, 2015.
- 16 Long Beach Water Department. *Long Beach Desalination Technology to Receive U.S. Patent Protection*. Disponível em: <http://www.businesswire.com/news/home/20060907006012/en/Long-Beach-Desalination-Technology-Receive-U.S.-Patent>. Acesso em: 22 de Agosto de 2016.
- 17 LLENAS, L.; RIBERA, G.; MARTÍNEZ-LLADÓ, X.; ROVIRA, M.; PABLO, J. de. Selection of nanofiltration membranes as pretreatment for scaling prevention in swro using real seawater. *Desalination and Water Treatment*, Taylor & Francis, v. 51, n. 4-6, p. 930–935, 2013.
- 18 SONG, Y.; XU, J.; XU, Y.; GAO, X.; GAO, C. Performance of uf–nf integrated membrane process for seawater softening. *Desalination*, Elsevier, v. 276, n. 1, p. 109–116, 2011.
- 19 VUONG, D. X. *Two stage nanofiltration seawater desalination system*. [S.l.]: Google Patents, fev. 5 2013. US Patent 8,366,924.
- 20 PONTIÉ, M.; DERAUW, J.; PLANTIER, S.; EDOUARD, L.; BAILLY, L. Seawater desalination: nanofiltration a substitute for reverse osmosis? *Desalination and Water Treatment*, Taylor & Francis, v. 51, n. 1-3, p. 485–494, 2013.
- 21 HILAL, N.; AL-ZOUBI, H.; MOHAMMAD, A. W.; DARWISH, N. Nanofiltration of highly concentrated salt solutions up to seawater salinity. *Desalination*, Elsevier, v. 184, n. 1, p. 315–326, 2005.
- 22 AL-KARAGHOULI, A.; KAZMERSKI, L. Economic and technical analysis of a reverse-osmosis water desalination plant using deep-3.2 software. *Journal of Environmental Science and Engineering. A*, David Publishing Company, Inc., v. 1, n. 3A, 2012.
- 23 NOBLE, R. D.; STERN, S. A. *Membrane separations technology: principles and applications*. [S.l.]: Elsevier, 1995.
- 24 TURKI, M.; RHOUMA, A. B.; BELHADJ, J. Experimental characterization of a reverse osmosis desalination process fed by hybrid power source. In: IEEE. *Systems, Signals and Devices, 2009. SSD'09. 6th International Multi-Conference on*. [S.l.], 2009. p. 1–6.
- 25 ARDEN, T. V. *Water purification by ion exchange*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012.
- 26 YOUNOS, T.; TULOOU, K. E. Overview of desalination techniques. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, Wiley Online Library, v. 132, n. 1, p. 3–10, 2005.

- 27 AMY, G. et al. Membrane-based seawater desalination: Present and future prospects. *Desalination*, Elsevier, v. 401, p. 16–21, 2017.
- 28 REN21 2016. *Renewables 2016 Global Status Report (Paris: REN21 Secretariat)*. Disponível em: [http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR\\$\"_Full\\$\"_Report.pdf](http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR$\). Acesso em: 09 de Agosto de 2016.
- 29 ABEEólica - Associação Brasileira de Energia Eólica. *Números do Setor*. Disponível em: <http://www.portalabeeolica.org.br/>. Acesso em: 13 de Outubro de 2016.
- 30 KHALIGH, A.; ONAR, O. C. *Energy harvesting: solar, wind, and ocean energy conversion systems*. [S.l.]: CRC press, 2009.
- 31 ANDERSON, J. H.; ANDERSON, J. J. H. *Sea water power plant*. [S.l.]: Google Patents, abr. 4 1967. US Patent 3,312,054.
- 32 BRUCH, V. *An assessment of research and development leadership in ocean energy technologies*. [S.l.], 1994.
- 33 LYNN, P. A. *Electricity from sunlight: an introduction to photovoltaics*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011.
- 34 CLARK, R. H. *Elements of tidal-electric engineering*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007.
- 35 LEMONIS, G.; CUTLER, J. Wave and tidal energy conversion. *Encyclopedia of energy*, v. 6, p. 385–396, 2004.
- 36 TAVANA, H. M. Study of wave energy potential in tonekabon (n iran). In: IEEE. *Developments in Renewable Energy Technology (ICDRET), 2009 1st International Conference on The*. [S.l.], 2009. p. 1–3.
- 37 BROMLEY, C. J.; MONGILLO, M. A. Geothermal power. *Transition to Renewable Energy Systems*, Wiley Online Library, p. 339–350, 2013.
- 38 HE, T.-x.; YAN, L.-j. Application of alternative energy integration technology in seawater desalination. *Desalination*, Elsevier, v. 249, n. 1, p. 104–108, 2009.
- 39 RODRÍGUEZ-GIRONÉS, M.; PEREZ, J.; VEZA, J. A systematic approach to desalination powered by solar, wind and geothermal energy sources. In: *Proceedings of the Mediterranean conference on renewable energy sources for water production*. [S.l.: s.n.], 1996. p. 20–25.
- 40 MATHIOULAKIS, E.; BELESSIOTIS, V.; DELYANNIS, E. Desalination by using alternative energy: Review and state-of-the-art. *Desalination*, Elsevier, v. 203, n. 1, p. 346–365, 2007.
- 41 VOIVONTAS, D.; YANNOPOULOS, K.; RADOS, K.; ZERVOS, A.; ASSIMACOPOULOS, D. Market potential of renewable energy powered desalination systems in greece. *Desalination*, Elsevier, v. 121, n. 2, p. 159–172, 1999.
- 42 FORSTMEIER, M. et al. Feasibility study on wind-powered desalination. *Desalination*, Elsevier, v. 203, n. 1, p. 463–470, 2007.

- 43 VOIVONTAS, D.; MISIRLIS, K.; MANOLI, E.; ARAMPATZIS, G.; ASSIMACOPOULOS, D. A tool for the design of desalination plants powered by renewable energies. *Desalination*, Elsevier, v. 133, n. 2, p. 175–198, 2001.
- 44 GU, W.; HE, X. Development of an innovative seawater desalination system using nongridconnected wind power. In: IEEE. *2009 World Non-Grid-Connected Wind Power and Energy Conference*. [S.l.], 2009. p. 1–4.
- 45 YUAN, L.; LU, Y.; ELTAWIL, M.; ZHAO, Z. Dc/dc converter applied in the photovoltaic-inclined thermal collector hybrid systems for brackish water desalination. In: IEEE. *Electrical Machines and Systems, 2008. ICEMS 2008. International Conference on*. [S.l.], 2008. p. 2616–2620.
- 46 CIPOLLINA, A.; MICALE, G.; RIZZUTI, L. *Seawater desalination: conventional and renewable energy processes*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2009.
- 47 Ministério do Meio Ambiente. *Água - um recurso cada vez mais escasso*. Disponível em: [http://www.mma.gov.br/estruturas/secex/_consumo/_arquivos/3\\$\%\\$20-\\$\%\\$20mcs_agua.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/secex/_consumo/_arquivos/3$\%$20-$\%$20mcs_agua.pdf). Acesso em: 15 de Fevereiro de 2017.
- 48 HEIER, S. *Grid integration of wind energy: onshore and offshore conversion systems*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2014.
- 49 HY ENERGY. *HY 3000 Small Wind Turbine*. Disponível em: <http://www.hyenergy.com.cn/uploads/soft/151216/1-151216155116.pdf>. Acesso em: 17 de Maio de 2017.
- 50 MOHAN TORE M. UNDELAND, W. P. R. N. *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*. 3. ed. [S.l.]: Wiley, 2002. ISBN 0471226939,9780471226932.
- 51 RASHID, M. H. E. *Power Electronics Handbook - Devices, Circuits, and Applications*. 3rd edition. ed. [S.l.]: Elsevier, 2011. ISBN 978-1-61344-164-0,978-0-470-60956-9,978-0-12-382036-5.
- 52 HONG, Y.-Y.; LU, S.-D.; CHIOU, C.-S. Mppt for pm wind generator using gradient approximation. *Energy Conversion and Management*, Elsevier, v. 50, n. 1, p. 82–89, 2009.
- 53 THONGAM, J. S.; OUHROUCHE, M. Mppt control methods in wind energy conversion systems. In: *Fundamental and advanced topics in wind power*. [S.l.]: InTech, 2011.
- 54 SHIRAZI, M.; VIKI, A. H.; BABAYI, O. A comparative study of maximum power extraction strategies in pmsg wind turbine system. In: IEEE. *Electrical Power & Energy Conference (EPEC), 2009 IEEE*. [S.l.], 2009. p. 1–6.
- 55 KOT, R.; ROLAK, M.; MALINOWSKI, M. Comparison of maximum peak power tracking algorithms for a small wind turbine. *Mathematics and Computers in Simulation*, Elsevier, v. 91, p. 29–40, 2013.
- 56 LAHFAOUI, B.; ZOUGGAR, S.; MOHAMMED, B.; ELHAFYANI, M. L. Real time study of p&o mppt control for small wind pmsg turbine systems using arduino microcontroller. *Energy Procedia*, Elsevier, v. 111, p. 1000–1009, 2017.

- 57 MASOUM, M. A.; DEHBONEI, H.; FUCHS, E. F. Theoretical and experimental analyses of photovoltaic systems with voltage and current-based maximum power-point tracking. *IEEE Transactions on energy conversion*, IEEE, v. 17, n. 4, p. 514–522, 2002.
- 58 CanadianSolar. *MaxPower datasheet*. Disponível em: https://www.canadiansolar.com/downloads/datasheets/en/new/Canadian_Solar-Datasheet-MaxPower_CS6U-P_en.pdf. Acesso em: 30 de Maio de 2017.
- 59 MASTERS, G. M. *Renewable and efficient electric power systems*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2013.
- 60 Powersim. *User Manual*. Disponível em: <https://powersimtech.com/drive/uploads/2016/06/PSIM-User-Manual.pdf>. Acesso em: 02 de Março de 2017.
- 61 ESRAM, T.; CHAPMAN, P. L. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques. *IEEE Transactions on energy conversion*, IEEE, v. 22, n. 2, p. 439–449, 2007.
- 62 WANG, H. *Design and Performance Evaluation of a Battery Simulator*. Dissertação (Mestrado) — University of Waterloo, 2016.
- 63 MEDORA, N. K.; KUSKO, A. Dynamic battery modeling of lead-acid batteries using manufacturers' data. In: IEEE. *Telecommunications Conference, 2005. INTELEC'05. Twenty-Seventh International*. [S.l.], 2005. p. 227–232.
- 64 Tudor. *Catalogo*. Disponível em: http://tudor.com.br/assets/upload/layout_catalogo_tudor_estacionarias.pdf. Acesso em: 02 de Maio de 2017.
- 65 Applied Membranes. *S SERIES SEAWATER RO SYSTEMS*. Disponível em: https://www.appliedmembranes.com/media/wysiwyg/pdf/systems/s_series_seawater_ro_systems.pdf. Acesso em: 02 de Fevereiro de 2017.
- 66 Gould Pumps. *GOULDS E-SV SERIES BROCHURE*. Disponível em: https://www.appliedmembranes.com/media/wysiwyg/pdf/pumps/goulds_e-sv_series_brochure.pdf. Acesso em: 02 de Fevereiro de 2017.
- 67 Hydraulic Institute. *Pump Terms and Definitions*. Disponível em: http://www.pumps.org/Pump_Fundamentals/Pump_Terms_and_Definitions.aspx. Acesso em: 06 de Março de 2018.
- 68 BACHUS, A. C. L. *Know and Understand Centrifugal Pumps*. [S.l.]: Elsevier, 2003. ISBN 9781856174091,1-85617-409-3.
- 69 EVERHART, E.; LORRAIN, P. The cockcroft-walton voltage multiplying circuit. *Review of Scientific Instruments*, AIP, v. 24, n. 3, p. 221–226, 1953.
- 70 BERKOVICH, Y.; AXELROD, B.; SHENKMAN, A. A novel diode-capacitor voltage multiplier for increasing the voltage of photovoltaic cells. In: IEEE. *Control and Modeling for Power Electronics, 2008. COMPEL 2008. 11th Workshop on*. [S.l.], 2008. p. 1–5.
- 71 MENÉNDEZ, S. S. A. *Aportació al control del convertidor CC/CA de tres nivells*. [S.l.]: Universitat Politècnica de Catalunya, 2004.