

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E INOVAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL  
MESTRADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL  
*MODALIDADE PROFISSIONAL*

MÁQUINAS LINEARES COM TOPOLOGIA VERNIER E ENERGIAS RENOVÁVEIS  
APLICADAS À GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

FABIANO BALDEZ DA COSTA BRITO

MACAÉ-RJ

2021

FABIANO BALDEZ DA COSTA BRITO

MÁQUINAS LINEARES COM TOPOLOGIA VERNIER E ENERGIAS RENOVÁVEIS  
APLICADAS À GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, área de concentração Sustentabilidade Regional, linha de pesquisa Desenvolvimento, Sustentabilidade e Inovação.

Orientador(a): Dr. Marcos Antônio Cruz Moreira

MACAÉ-RJ

2021

## Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

B862m Brito, Fabiano Baldez da Costa, 1982-.  
Máquinas lineares com topologia Vernier e energias renováveis aplicadas à geração distribuída / Fabiano Baldez da Costa Brito. — Macaé, RJ, 2021.  
xviii, 97 f.: il. color.

Orientador: Marcos Antônio Cruz Moreira, 1964-.  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) — Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Macaé, RJ, 2021.  
Inclui referências.  
Área de concentração: Sustentabilidade Regional.  
Linha de Pesquisa: Desenvolvimento, Sustentabilidade e Inovação.

1. Energia - Fontes alternativas. 2. Geração distribuída de energia elétrica - Brasil. 3. Sistemas de energia fotovoltaica. 4. Energia solar. 5. Energia eólica.  
I. Moreira, Marcos Antônio Cruz, 1964-, orient. II. Título.

CDD 620.91

(23. ed.)

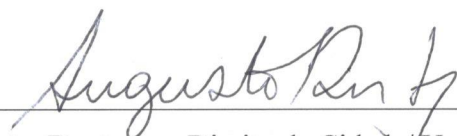
Dissertação intitulada **MÁQUINAS LINEARES COM TOPOLOGIA VERNIER E ENERGIAS RENOVÁVEIS APLICADAS À GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**, elaborado por **Fabiano Baldez da Costa Brito** e apresentada, publicamente perante a Banca Examinadora, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental do Instituto Federal Fluminense - IFFluminense, na área concentração Sustentabilidade Regional, linha de pesquisa Desenvolvimento, Sustentabilidade e Inovação.

Aprovado em: 26/03/2021

Banca Examinadora:



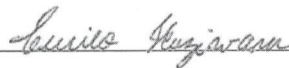
\_\_\_\_\_  
Marcos Antônio Cruz Moreira, Doutor em Engenharia Elétrica/ Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Instituto Federal Fluminense (IFFluminense) – Orientador



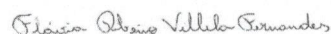
\_\_\_\_\_  
Augusto Eduardo Miranda Pinto, Doutor em Direito da Cidade/ Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Instituto Federal Fluminense (IFFluminense)



\_\_\_\_\_  
Severino Joaquim Correia Neto, Doutor em Ciências da Educação/ Universidade Americana – PY, Instituto Federal Fluminense (IFFluminense)



\_\_\_\_\_  
Eurico Huziwara, Doutor em Produção Vegetal/ Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), UNESA



\_\_\_\_\_  
Flávia Ribeiro Villela Fernandes, Mestre em Engenharia Elétrica/ Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), UFRJ Campus Macaé

**DEDICATÓRIA**

Aos meus pais. Por um amor que a tudo vence.

## AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos (não necessariamente nesta ordem):

- Aos meus amigos e colegas da Petrobras, sobretudo aos meus companheiros de equipe e gerentes, pelo suporte e incentivo durante todos esses anos – Somos Um Só Time;
- Aos companheiros do PPEA/IFF, pelas amizades, pelos momentos de estudo e de lazer – juntos somos mais fortes;
- Aos professores e servidores do PPEA/IFF, pelo apoio e compreensão que prestaram ao longo do curso;
- Ao meu orientador Marcos Antonio Cruz Moreira, pelo trabalho impecável, pelos conselhos, pela insistência, pela paciência. Levarei seus ensinamentos para o resto da vida;
- À família da minha esposa, hoje minha também, pelo acolhimento, pelo apoio e pelo carinho ao longo dessas quase duas décadas;
- Aos meus pais, por tudo o que fizeram por mim ao longo da minha vida, e aos meus filhos, meu maior incentivo para acordar de manhã e lutar;
- À minha esposa, pelo amor incondicional (mesmo com a minha barba) nessas quase duas décadas – viveria algumas vidas ao seu lado;
- À Deus, nosso Redentor e Criador do mundo, que, além de tudo, ainda nos permite extrair um pouco da energia que anima cada lugar para transformá-la em energia elétrica.

**EPIGRAFE**

*“<sup>24</sup>Porque Ele olha até aos confins da terra, e vê debaixo de todos os shamayim; <sup>25</sup>Perpetra o peso para os ventos; e Ele pesa as mayim por medida. <sup>26</sup>Quando ele perpetrrou o decreto para a chuva, e um caminho para o relâmpago e o trovão: <sup>27</sup>Então Ele a viu, e a declarou; Ele a preparou, sim, e a esquadrinhou.”*

Iyov, 28:24-26

## LISTA DE FIGURAS

### Artigo Científico 1

Figura 1 – Evolução do mercado de energia fotovoltaica 2012 – 2018 (projeção).....	6
Figura 2 – Geração solar fotovoltaica média no mês de agosto/2018 por Estado.....	7
Figura 3 – Geração de energia elétrica por fonte - 1º trimestre de 2013.....	8
Figura 4 – Geração de energia elétrica por fonte - 1º trimestre de 2018.....	9
Figura 5 – Equação de Normalização.....	11
Figura 6 – Geração total de energia no Brasil 2013-2018.....	12
Figura 7 – Participação das energias EFV na geração total do Brasil 2013-2018.....	13
Figura 8 – Geração total de energia eólica/fotovoltaica no Brasil 2013-2018.....	13
Figura 9 – Comparação da participação (%) por trimestre 2013-2018.....	15
Figura 10 – Comparativos geração de energia eólica/fotovoltaica entre os 3º trim. de cada ano (%) 2013-2017.....	15
Figura 11 – Comparativo entre os valores normalizados de Geração Total e Geração EFV-2013 ao 1º trimestre 2018.....	16
Figura 12 – Gráfico de dispersão Geração total (normalizado) x Geração EFV (normalizado).....	17

### Artigo Científico 2

Figura 1 – Esquema típico de uma planta termosolar (ciclo Rankine).....	26
---	----

### Artigo Científico 3

Figura 1 – Produto Interno Bruto <i>per capita</i> mundial – 2007 – 2017.....	49
Figura 2 – Consumo de energia e PIB <i>per capita</i> nominal mundiais - 1980 a 2010.....	50
Figura 3 – Mapa de Localização: Araxá/MG – Mina de Nb rica em TR (sob concessão da CBMM).....	52

### Artigo Científico 4

Figura 1 – Esquema básico de um absorvedor pontual.....	66
Figura 2 – Fred Olsens Lifesaver, instalada no Hawaii, EUA.....	67
Figura 3 – Usina de Ondas do Pecém.....	67
Figura 4 – Diagrama Esquemático do Conversor Hiperbárico de Energia das Ondas.....	68
Figura 5 – Vista espacial do modelo em desenvolvimento pela COPPE/UFRJ.....	69
Figura 6 – Máquinas Lineares Tubular (à esquerda) e Plana (à direita).....	72
Figura 7 – Sequência simplificada de distribuição no arranjo Halbach.....	73



Figura 8 – Aspectos geométricos construtivos de motores lineares.....	73
Figura 9 – Protótipo de gerador de relutância variável em desenvolvimento no IFF: à esquerda, conjunto completo; à direita, detalhe de posicionamento de ímãs e bobinas.....	75
Figura 10 – Tensão gerada no protótipo de gerador de relutância variável.....	76
Figura 11 – Topologia do gerador com topologia vernier plana.....	79
Figura 12 – Seção de máquina vernier rotativa com rotor externo.....	80
Figura 13 – Configurações de máquinas vernier lineares: (a) com ímãs montados na superfície; (b) com ímãs montados na superfície em arranjo Halbach; (c) com ímãs internos	80

## LISTA DE TABELAS

### Artigo Científico 1

Tabela 1 – Índice de participação por fontes - Eólica/ Fotovoltaica.....	9
Tabela 2 – Índice de participação por fontes - Eólica/ Fotovoltaica – Distribuição por semestre.....	10
Tabela 3 – Resumo Numérico da Geração Total de Energia Elétrica no Brasil - 2013-2018 (GWh).....	12
Tabela 4 – Resumo Numérico da Geração Total de Energia Elétrica EFV no Brasil - 2013-2018 (GWh).....	14
Tabela 5 – Valores normalizados de Geração Total e Geração EFV.....	16

### Artigo Científico 3

Tabela 1 – Dados consolidados de produção potencial.....	53
Tabela 2 – Tabela de cálculo de preço médio dos ímãs.....	54
Tabela 3 – Preços dos produtos: Carbonatito concentrado, O.Nd, Nd, ímã.....	55
Tabela 4 – Receitas potenciais com o comércio de O.Nd, Nd e ímãs N35.....	56
Tabela 5 -Comparação $I_P/M_m$ x Potencial de Geração P.....	56

### Artigo Científico 4

Tabela 1 – Comparação entre o MVPP, MCEPP e MCEC.....	78
Tabela 2 – Parâmetros e requisitos para o sistema de geração.....	83

## LISTA DE SÍMBOLOS

$(Na,Ca)_2Nb_2O_6(OH,F)$ – Pirocloro.....	52
$[OTR, Th]PO_4$ – Monazita.....	52

°C – graus Celsius.....	25
$\rho_{ímã}$ – Massa específica do ímã.....	55
$\chi_{Nd_{O,Nd}}$ – Fração mássica de Nd no óxido de neodímio.....	53
$\chi_{Nd_{ímã}}$ – Fração mássica de Nd no ímã.....	53
$\chi_{O,Nd}$ – Fração mássica de O.Nd em $Q_{OTR}$ .....	54
C – Carbono.....	31
CA – Corrente Alternada.....	68
$Ca(NO_3)_2$ – Nitrato de cálcio.....	32
CC – Corrente Contínua.....	68
$CH_4$ – Metano.....	31
$CO_2$ – Dióxido de carbono.....	31
CuNi – Liga de cobre-níquel.....	82
CV – Coeficiente de variação.....	13
$CV_{EFV}$ – Coeficiente de variação da energia fotovoltaica total.....	14
$CV_{geração}$ – Coeficiente de variação da geração total.....	13
g – Grama.....	54
GW – Gigawatt.....	6
GWh – Gigawatt-hora.....	8
$GW_{th}$ – Gigawatt termal.....	25
$H_2O$ – Água.....	35
Hz – Hertz.....	77
i – índice.....	54
$I_{p/Mm}$ – Índice potência/ massa magnética.....	55
$KNO_3$ – Nitrato de sódio.....	31
kg – Kilograma.....	54
kW – Kilowatt.....	3
LiBr – Brometo de lítio.....	35
$LiNO_3$ – Nitrato de lítio.....	32
m – Metro.....	65
$m.s^{-1}$ – Metros por segundo.....	84
$m_{ímã}$ – Massa total dos ímãs utilizados no gerador.....	55
$M_{Nd}$ – Massa molecular do Nd.....	53
$M_O$ – Massa molecular do Oxigênio.....	53

max – valor máximo.....	11
Mg – Magnésio.....	32
min – valor mínimo.....	11
Mton – milhões de toneladas métricas.....	48
MW – Megawatt.....	7
MWh – Megawatt-hora.....	6
N <sub>2</sub> – Nitrogênio.....	31
NaNO <sub>3</sub> – Nitrato de sódio.....	31
Nb – Nióbio.....	55
Nd – Neodímio.....	48
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – Óxido de Neodímio.....	53
NdFeB – Neodímio-Ferro-Boro.....	50
P – Potencial de Geração.....	56
Pa – Pascal.....	68
$P_{máquina}$ – Potência elétrica gerada pela máquina.....	55
Pr – Praseodímio.....	52
PWh/ano – Petawatt hora por ano.....	64
$\varphi_{Carbonatito}$ – Preço médio do carbonatito concentrado.....	55
$\varphi_i$ – Preço médio do item i.....	54
$\varphi_{ímã}$ – Preço do ímã NdFeB N35.....	55
$\varphi_{Nd}$ – Preço médio do Nd.....	55
$\varphi_{O.Nd}$ – Preço médio do óxido de neodímio.....	55
$Q_i$ – Quantidade do item i.....	54
$Q_{Nd}$ – Quantidade de Nd metálico.....	54
$Q_{O.Nd}$ – Quantidade explotável de óxido de neodímio.....	54
$Q_{OTR}$ – Quantidade de óxidos de terras-raras.....	54
R\$ – Reais.....	6
RPM – Rotações Por Minuto.....	55
$\mathfrak{R}_i$ – Receita obtenível com o item i.....	54
$\mathfrak{R}_{ímã}$ – Receita obtenível com ímãs N35.....	56
$\mathfrak{R}_{Nd}$ – Receita obtenível com Nd metálico.....	56
$\mathfrak{R}_{O.Nd}$ – Receita obtenível com óxido de neodímio.....	56
s – Segundo.....	83

SiO <sub>2</sub> – Dióxido de silício.....	35
SmCo – Samário-Cobalto.....	50
US\$, USD – Dólares dos Estados Unidos da América.....	6
$V_{ímã}$ – Volume total dos ímãs empregados.....	55
W – Watt.....	55
x – variável de entrada.....	10
Xe – Xenônio.....	28
y – variável de saída.....	10
Zn – Zinco.....	30

### LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABSOLAR – Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica

AFVHM – *Axial Flux Vernier Hybrid Machine* (Máquina Vernier Híbrida De Fluxo Axial)

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ASTM – *American Society for Testing and Materials*, atualmente *ASTM International*

CBMM – Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração

CFAP – Corpo Flutuante de Absorção Pontual

CFD – *Computational Fluid Dynamics*

CFEM – Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais

CNM – Confederação Nacional dos Municípios.

EFV – Energia Fotovoltaica

EIA – *United States Energy Information Administration*

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

ET – Energia Térmica

FMM – Força magnetomotriz

FTT – Fluido de Transferência Térmica

GWEC – Global Wind Energy Council

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

IFFluminense – Instituto Federal Fluminense

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

INSD – Irradiação Solar Direta Normal

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

MARS – *Multivariate Adaptive Regression Splines (Splines de Regressão Adaptativa Multivariável)*

MBAC – *MBAC Fertilizer Corp.*

MG – Minas Gerais

MCEC – Motor Convencional de Enrolamento Concentrado

MCEPP – Motor Convencional de Enrolamento de Passo Pleno

MEF – Método dos Elementos Finitos

MVPP – Motor vernier com enrolamento de passo pleno

NCBI – United States National Center for Biotechnology Information

O.Nd – Óxido de neodímio

OCDE – Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico

OLI – *Operational Land Imager*

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

ONU – Organização das Nações Unidas

OTEC – *Ocean Thermal Energy Converter*, Conversor de Energia Térmica dos Oceanos

OTR – Óxidos de Terras-raras

P-3-HB – Poli(3-hidroxitirato)

PCL – Poli( $\epsilon$ -caprolactona)

PCH – Pequena Central Hidrelétrica

PEO – Poli(etileno-óxido)

PET – Politereftalato de etileno

PIB – Produto Interno Bruto

PID – Proporcional-Integral-Derivativo

PVC – Policloreto de vinila

RGB – *Red, Green, Blue*, sistema de cores

STEALS – *Solar ThermoElectricity via Advanced Latent Heat Storage* (Termoeletricidade Solar via Armazenamento Avançado em Calor Latente)

SIN – Sistema Interligado Nacional

SIRGAS – Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas

SWOT – *Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats* (Forças, Fraquezas, Oportunidades e Ameaças)

TFM – *Transverse Flux Machine*, Máquina de Fluxo Transversal

TR – Terras-Raras

Trim – Trimestre

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

USGS – *United States Geological Survey*

UTM – *Universal Transverse Mercator*

# MÁQUINAS LINEARES COM TOPOLOGIA VERNIER E ENERGIAS RENOVÁVEIS APLICADAS À GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

## RESUMO

Energia de baixo custo e de fonte renovável é um pilar para que o Brasil possa retomar um crescimento econômico consistente. Mesmo que 83,3% da matriz elétrica brasileira seja renovável, ainda temos fontes praticamente inexploradas, tais como a do calor solar concentrado e a ondomotriz. Aprofundar o estudo nestas fontes pode fomentar seu desenvolvimento e utilização. A exemplo do ocorrido com a energia eólica, geradores elétricos a ímãs permanentes em sua versão linear podem ser o elo para a geração distribuída das energias termosolar e ondomotriz. Tendo isto em tela, neste documento são apresentados quatro artigos: o artigo 1 traz o tratamento estatístico das energias eólica e fotovoltaica e a importância dos subsídios governamentais para a viabilização do seu uso em escala; o artigo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre a energia termosolar concentrada; o artigo 3, que apresenta uma proposta para buscar a garantia da produção de ímãs e, conseqüentemente, da produção de geradores; e, no artigo 4, nos aprofundamos na energia ondomotriz e na topologia de máquina síncrona mais indicada para operar em sistemas de absorção pontual, a vernier, apresentando os principais requisitos de projeto para implementação futura.

**Palavras-chave:** Energias Renováveis. Geradores lineares. Geração Distribuída.

***LINEAR VERNIER MACHINES AND RENEWABLE ENERGIES APPLIED TO  
DISTRIBUTED GENERATION***

***ABSTRACT***

*Low cost, renewable energy is a pillar for Brazil to resume consistent economic growth. Even though 83,3% of the Brazilian electricity matrix is renewable, we still have virtually untapped sources, such as concentrated solar power and waves. Deepening the study in these sources can foster development and utilization. As with wind energy, permanent magnet electric generators in its linear version may be the link for the distributed generation of solar thermal and wave energies. Taking this into consideration, this paper presents three articles: article 1, about wind and photovoltaic energies, article 2, a bibliographical review on concentrated solar power energy, and article 3, which presents a proposal to seek the guarantee of the production of magnets and hence the production of generators. In article 4, we delve deeper into the sea wave energy and the synchronous machine topology best suited to operate in point absorber systems, vernier, presenting the prime design requirements for future implementation.*

***Keywords:*** *Renewable Energy. Linear Generator. Distributed Generation.*



## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	viii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	viii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	xi
RESUMO.....	xiv
<i>ABSTRACT</i> .....	xv
APRESENTAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	1
<b>ARTIGO CIENTÍFICO 1: PARTICIPAÇÃO DA GERAÇÃO EÓLICA E FOTOVOLTAICA NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA.....</b>	<b>4</b>
1. INTRODUÇÃO.....	5
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	8
2.1. Material.....	8
2.2. Métodos.....	11
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	12
4. CONCLUSÃO.....	18
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	19
<b>ARTIGO CIENTÍFICO 2: ENERGIA TERMOSOLAR: UMA REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>24</b>
1. INTRODUÇÃO.....	25
2. MATERIAL E MÉTODO.....	27
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	27
3.1. Estudos de viabilidade e Modelagem Matemática.....	27
3.2. Análise de Falhas.....	29
3.3. FTT e Armazenamento.....	31
3.4. Revestimento.....	33
3.5. Riscos Ambientais.....	33
3.6. Aquecimentos de água.....	35
3.7. Outros Usos.....	35
4. CONCLUSÃO.....	36
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	37
<b>ARTIGO CIENTÍFICO 3: PRODUÇÃO DE ÍMÃS PERMANENTES E ENERGIA RENOVÁVEL: DESAFIOS TECNOLÓGICOS E PROPOSTA DE REGULAMENTAÇÃO</b>	<b>48</b>
1. INTRODUÇÃO.....	49
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	53

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	55
4. CONCLUSÃO.....	57
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	58
<b>ARTIGO CIENTÍFICO 4: INVESTIGAÇÃO DA APLICAÇÃO DE GERADORES LINEARES COM TOPOLOGIA VERNIER NA EXTRAÇÃO DE ENERGIA DAS ONDAS.....</b>	<b>63</b>
1. INTRODUÇÃO.....	64
2. ESTRUTURAS DE MÁQUINAS LINEARES.....	70
2.1 Desenvolvimento e Classificação de Máquinas Lineares.....	70
3. A TOPOLOGIA VERNIER.....	76
4. PRINCIPAIS PARÂMETROS DE PROJETO DO GERADOR VERNIER.....	81
5. CONCLUSÃO.....	85
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	86
CONSIDERAÇÕES FINAIS DA DISSERTAÇÃO.....	97

## APRESENTAÇÃO

Um dos principais pilares para que o Brasil possa retomar um crescimento econômico consistente, com respeito ao meio ambiente e à sociedade, é a disponibilização à população de energia de baixo custo e de fonte renovável, como preconizado no Objetivo nº 7 da Agenda 2030 da ONU.

Apesar de grande parte da capacidade instalada acrescentada a partir da década de 1990 ter sido baseada na implantação de usinas termoeletricas a gás, a matriz energética brasileira tem um percentual de utilização de energia renovável superior à média praticada nos países da OCDE, contando nesta vertente principalmente com usinas hidrelétricas, Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs), parques eólicos e solares fotovoltaicos. No entanto, ainda existem fontes renováveis praticamente inexploradas no país, tais como a termosolar concentrada de alta temperatura e a energia do mar em suas diversas modalidades.

A compreensão da matriz energética brasileira é de suma importância para o planejamento estratégico brasileiro, sobretudo no tocante às energias renováveis. A fonte hidrelétrica é a mais antiga e de maior exploração no Brasil, sendo, portanto, uma tecnologia já consolidada. Assim, às demais, cabe maior estudo quanto à utilização e desenvolvimento, visando a máxima complementaridade entre elas, de forma a ter uma matriz energética mais diversificada e segura quanto a variações sazonais decorrentes do clima, como níveis de chuva, por exemplo.

Dentre as fontes renováveis com maior crescimento, destacam-se a eólica, cujo custo de produção atualmente rivaliza com o da energia hidrelétrica, e a fotovoltaica. O sucesso da implantação em escala dessas duas tecnologias se assenta em dois pilares principais: um político, através de uma série de incentivos de ordem jurídica ou econômica, e um tecnológico, onde os desenvolvimentos mais recentes permitiram equipamentos mais robustos, de maior rendimento e de menor custo.

No artigo 1, é apresentado um levantamento estatístico da evolução da utilização das fontes fotovoltaica e eólica para geração de energia elétrica no Brasil com vistas à avaliação do impacto das políticas governamentais nessa área, num momento político onde se discutia sobre a manutenção ou não de subsídios para a disseminação deste tipo de tecnologia. Neste estudo, pode-se constatar que mesmo com o rápido crescimento da utilização destas fontes, o que se configura num *case* de sucesso, ainda há espaço para expansão, de forma que as ações têm sido eficazes, sendo interessante a continuidade da política.

Nesta esteira, nota-se que o apoio estatal no desenvolvimento de novas tecnologias é imprescindível quando, a despeito da viabilidade de retorno, o risco de investimento é alto. Considerando as possibilidades de atuação combinada entre as energias fotovoltaica e termosolar

concentrada na geração distribuída e de utilização da grande irradiação solar que ocorre na região sertaneja do país para instalação de usinas de geração termosolar, o Artigo 2 apresenta os principais locais onde ela é utilizada no mundo e o estado-da-arte das pesquisas sobre este tema a partir de revisão bibliográfica dos artigos publicados de 2015 a 2018. Sua utilização poderia proporcionar maior segurança energética a partir de uma fonte de relativamente pouca sazonalidade, abrindo possibilidade para maior desenvolvimento econômico em uma das partes menos favorecidas do país e reduzindo a pressão sobre o Rio São Francisco como fonte de energia para geração. A disponibilidade da energia solar é alta em todo o território nacional, no entanto, sua energia térmica é utilizada basicamente para aquecimento de água em sistemas de baixa temperatura, apontando um grande potencial de geração de energia elétrica “limpa” não aproveitado.

O pilar tecnológico que sustenta o crescimento da geração eólica, além de algumas melhorias aerodinâmicas, é o desenvolvimento de geradores mais robustos, mais eficientes e de menor custo. Apesar dos geradores de indução terem a maior fatia desse mercado, cresce a pesquisa e a utilização de geradores síncronos a ímãs permanentes de ligas de neodímio, sendo estes últimos um fator essencial para o desenvolvimento das energias renováveis, visto que sua grande densidade de fluxo magnético em relação ao volume permitiram a redução de custos de geradores eólicos, formam a base dos geradores elétricos mais adequados para a conversão da energia das ondas e podem ser utilizados também em sistemas de geração baseados em sistemas de combustão interna e externa acionados por biomassa e energia termosolar concentrada, por exemplo, como veremos a diante.

Assim, a produção de ímãs de neodímio é estratégica para a continuidade do processo de diversificação da matriz energética baseada em fontes renováveis. Entretanto, a despeito das grandes reservas de terras-raras que o país possui, como o Brasil não detém a tecnologia para produção desta classe de ímãs; a garantia da perenidade do desenvolvimento, produção e utilização deste tipo de conversor eletromecânico depende das relações diplomático-comerciais com outros países, sobretudo com a China, que detém a maior reserva de terras raras e é o maior produtor e exportador de ímãs do mundo.

O artigo 3 trata dessa questão, apresentando um comparativo entre as receitas esperadas com a venda do estoque potencial de óxido, de neodímio metálico e dos ímãs de neodímio considerando o conteúdo deste metal na monazita presente no Complexo do Barreiro, localizado em Araxá/MG, um método para a determinação do potencial de produção de energia a partir de uma máquina vernier híbrida e, a partir dos resultados obtidos, uma sugestão de regulamentação da produção deste minério e derivados no Brasil.

Dos artigos supracitados pode-se depreender que há grande potencial de incremento da utilização de energia renovável na matriz brasileira. Entretanto, grandes empreendimentos demandam

custos e geram impactos econômico-sócio-ambientais de grande magnitude para implantação, o que torna a geração de menor escala através da modalidade distribuída uma alternativa interessante para agregar capacidade instalada com menor demanda de grandes investidores. O desenvolvimento de topologias mais eficientes sob determinadas condições pode viabilizar sistemas de geração distribuída de pequena potência (até 75kW), o que pode contribuir com a redução de custos através da produção em escala, além de outros benefícios.

Geradores lineares a ímãs permanentes são vantajosos em relação aos rotativos nas situações em que a força motriz é também linear, como nos conversores de energia das ondas do mar do tipo absorvedor pontual (*point absorber*) e em máquinas de combustão externa, que podem ser acionadas pela energia da biomassa ou a termosolar concentrada, por exemplo, pois dispensam caixas de redução ou outros construtos mecânicos de acoplamento, o que melhora a eficiência global da máquina. Isto reduz custos de construção e de manutenção e simplifica o projeto, reduzindo a perda de energia mecânica no processo.

Geradores lineares síncronos da topologia vernier são particularmente adequados para aplicações que exigem eficiência e boa performance a baixa frequência, tais como em geradores ondomotrizados do tipo absorvedor pontual, como veremos a seguir. O artigo 4 trata inicialmente das diversas fontes de energia dos oceanos, concentrando-se na extração da energia das ondas do mar através de absorvedores pontuais.

A partir das características gerais das ondas, investiga quais, dentre as principais classes de máquinas elétricas, são adequadas à integração ao um conversor dessa natureza, donde se constata, através da análise de recorte bibliográfico sobre o tema, que a topologia vernier se mostra como candidata muito promissora a ser utilizada. Daí, são abordadas as principais características deste tipo de máquina de modo a sustentar teoricamente a parte final e principal objetivo do trabalho, que é apresentar os principais requisitos de projeto de forma a subsidiar uma implementação futura.

Os artigos desta dissertação compõem uma avaliação de cenários pouco ou mesmo não explorados no Brasil, abordando diferentes aspectos da produção de energia a partir de fontes renováveis de forma complementar, visando inicialmente apreender as boas práticas e tendências existentes (Artigo Científico 1), para, a partir daí, vislumbrar e conhecer novas oportunidades, sem descurar da esfera social, (Artigo Científico 2), propondo políticas que visem o retorno econômico e a soberania nacional (Artigo Científico 3) e que tratem dos aspectos tecnológicos ao fornecer um catálogo de opções para o projeto e desenvolvimento visando a implantação prática (Artigo 4). Ao estudar diferentes fontes de energia, notamos que sistemas híbridos são mais eficientes, reforçando que existe um caráter complementar, e não de competição, entre elas; isso pode ser uma amostra de que a diversidade e a cooperação aumentam a eficiência mesmo em sistemas complexos.

## ARTIGO CIENTÍFICO 1

### **PARTICIPAÇÃO DA GERAÇÃO EÓLICA E FOTOVOLTAICA NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA – 2013 A 2017**

#### *PARTICIPATION OF WIND AND PHOTOVOLTAIC GENERATION IN THE BRAZILIAN ENERGY MATRIX - 2013 TO 2017*

Fabiano Baldez da Costa Brito - IFFluminense/PPEA

Jairo Lúcio Gomes Siqueira - IFFluminense/PPEA

Mariana Bacelar Turra - IFFluminense/PPEA

Marcos Antônio Cruz Moreira- IFFluminense/PPEA

Flavia Ribeiro Villela - IFFluminense/PPEA

#### **RESUMO**

A diversificação de fontes de energia, notadamente daquelas classificadas como renováveis, é uma tendência mundial, sendo o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável da ONU nº 7, na chamada Agenda 2030 (ONU, 2015). O Brasil tem neste quesito grande destaque no cenário mundial, pois nos últimos anos tem utilizado em média mais de 40% do seu consumo oriundo de fontes renováveis de energia elétrica, muito superior à média mundial e dos países da OCDE (EPE, 2018). Atualmente, as energias eólica e fotovoltaica têm se destacado com forte crescimento em participação na matriz energética brasileira. Considerando que o subsídio para as energias renováveis é rateado entre todos os consumidores, entender os reflexos dos subsídios no desenvolvimento da utilização dessas fontes de energia é necessário para a avaliação dos resultados obtidos. Estudar as fontes eólica e fotovoltaica, que vêm se destacando no cenário mundial, é importante para a compreensão desse fenômeno. O objetivo do presente trabalho foi analisar a evolução da participação das fontes de energia eólica e fotovoltaica (EFV) na matriz energética brasileira de geração de energia elétrica no período de 2013 a 2017. Os dados utilizados foram extraídos da Agência Nacional de Energia Elétrica e tratados utilizando as aplicações computacionais Microsoft® Excel® 365 e R ver. 3.5.1. Para isso, foram utilizados métodos de Estatística Descritiva tanto gráficos quanto de resumos numéricos, assim como métodos de normalização e de correlação de Pearson. Constatou-se que o aumento da participação dessas fontes de energia na matriz energética brasileira é consistente, mesmo com as limitações climáticas ocorridas em determinadas partes do ano, indicando que os subsídios governamentais têm surtido efeito.

**Palavras-chave:** Energia Elétrica. Renováveis. Estatísticas Energéticas.

### **ABSTRACT**

*Diversification of energy sources, notably those classified as renewable, is a worldwide trend, with the UN Sustainable Development Goal No. 7, called Agenda 2030 (UN, 2015). In the last few years, Brazil has used more than 40% of its consumption from renewable sources of electricity, which is much higher than the world average and OECD countries (EPE, 2018). Currently, wind and photovoltaic energy have stood out with strong growth in participation in the Brazilian energy matrix. Considering that the subsidy for renewable energy is shared among all consumers, understanding the impact of subsidies on the development of the use of these energy sources is necessary for the evaluation of the results obtained. Studying the wind and photovoltaic sources, which have been highlighting in the world scenario, is important for the understanding of this phenomenon. The objective of this work was to analyze the evolution of the participation of wind and photovoltaic energy sources (EFV) in the Brazilian energy matrix of electricity generation in the period from 2013 to 2017. The data used were extracted from the National Electric Energy Agency using the Microsoft® Excel® 365 and R ver. 3.5.1. For this, both descriptive and numerical summary methods, as well as methods of normalization and Pearson's correlation, were used. It was found that the increase in the participation of these energy sources in the Brazilian energy matrix is consistent, even with the climatic limitations occurring in certain parts of the year, indicating that government subsidies have taken effect.*

**Keywords:** Electricity. Renewables. Energy Statistics.

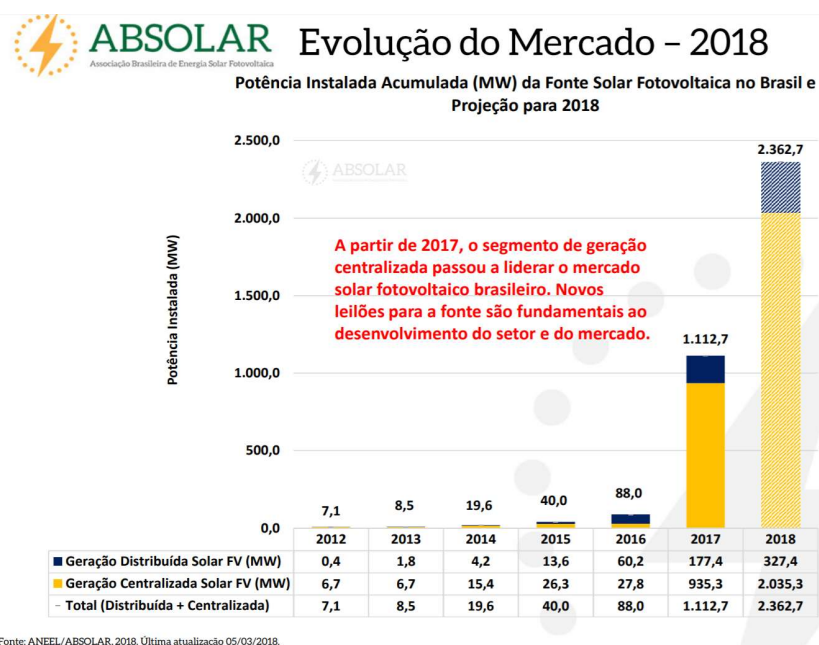
## **1. INTRODUÇÃO**

Para atendimento à crescente demanda por energia no planeta, a diversificação de fontes de energia se tornou um imperativo. O desenvolvimento de tecnologias referentes àquelas classificadas como renováveis é uma tendência mundial, sendo o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável da ONU nº 7, na chamada Agenda 2030 (ONU, 2015), na qual o Brasil é um dos países signatários. Neste quesito, o Brasil destaca-se positivamente, pois, nos últimos anos, tem utilizado em média mais de 40% do seu consumo oriundo de fontes renováveis de energia elétrica, muito superior à média mundial e dos países da OCDE (EPE, 2018).

Para produção de energia elétrica, o potencial de transformação das energias hidráulica, solar, dos ventos, dos oceanos e da biomassa as tornaram as mais utilizadas e/ ou pesquisadas dentre aquelas fontes chamadas de renováveis (TOLMASQUIM, 2016). Buscando maior equilíbrio entre fontes renováveis e não renováveis frente à demanda por energia, o governo brasileiro vem buscando aumentar a participação de energias renováveis na matriz energética através da promoção de leilões de energia.

As energias eólica e fotovoltaica (EFV) se configuram como fontes de crescente importância na matriz energética brasileira. No decênio 2017-2026, a previsão dos estudos governamentais é de investimentos da ordem de R\$ 1,4 trilhão, com os quais se pretende alcançar 48% da matriz energética brasileira com fontes renováveis de energia, chegando a 87% na produção de energia elétrica (EPE, 2017). Somente em dezembro de 2017, foram contratados pelo governo projetos eólicos da ordem de 1,4 GW de capacidade instalada, representando investimentos de US\$ 2,5 bilhões (GWEC, 2018). Os avanços tecnológicos e de produção em escala permitiram que atualmente no Brasil o custo da energia eólica seja inferior ao das grandes hidrelétricas, com valor médio de R\$ 98,62/MWh (GWEC, 2018). Também apresentando tendência de crescimento, de acordo com relatório emitido no primeiro trimestre de 2018, a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (Barros, 2018), previu um aumento superior a 100% na potência instalada acumulada baseada em fonte fotovoltaica para o corrente ano (Figura 1).

Figura 1. Evolução do mercado de energia fotovoltaica 2012 – 2018 (projeção)



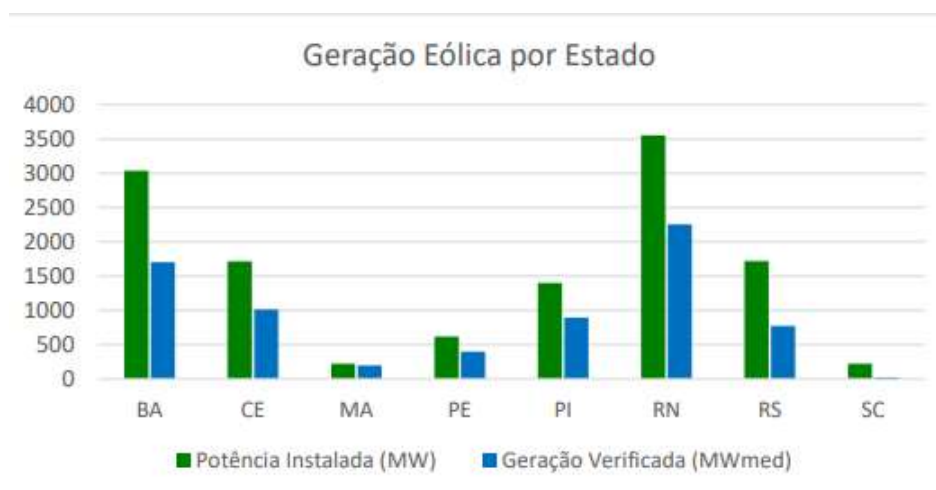
Fonte: ANEEL/ ABSOLAR (2018)



Convém realizar este estudo tomando o Brasil por base, e não uma região específica, devido às suas dimensões continentais e grande diversidade de fontes em sua matriz energética. Estas características se somam ao fato de que o sistema de transmissão de energia elétrica do país é interligado através do Sistema Interligado Nacional - SIN, à exceção de alguns sistemas isolados de grande porte na região norte do país (ANEEL, 2008). O Estado do Rio Grande do Norte lidera o ranking em quantidade de parques eólicos instalados no Brasil, seguido da Bahia, do Ceará, do Rio Grande do Sul, entre outros, totalizando 13,3 GW de capacidade instalada total, sendo 12,4 GW interligados ao SIN em agosto de 2018 (ONS, 2018).

Em 2017, o Brasil contou com potência instalada acumulada da fonte solar fotovoltaica de 1.112,7 MW (ANEEL/ABSOLAR, 2018). Na Figura 2, identifica-se que o Estado da Bahia possui maior potência instalada, seguido de Minas Gerais, Piauí, São Paulo e Rio Grande do Norte.

Figura 2. Geração solar fotovoltaica média no mês de agosto/2018 por Estado



Fonte: ONS, 2018

A utilização de ferramentas estatísticas para análise de dados e de séries temporais é de suma importância para a compreensão de fenômenos e apoio à tomada de decisão nas diversas esferas do tecido social, havendo correspondência direta na Engenharia Ambiental (GASPARIN, KESTRING, 2017). A maior disponibilidade de dados produzidos por universidades e instituições de pesquisa, organizações não governamentais e empresas públicas e privadas, assim como o desenvolvimento de novas ferramentas para tratamento de conjuntos Big Data fornecem um ambiente propício para otimização de recursos ambientais e reconhecimento da interação de variáveis com o meio ambiente e suas consequências.

Considerando que os subsídios com os quais as energias eólica e solar, dentre outras fontes renováveis, são custeados pela Conta de Desenvolvimento Energético (BRASIL, 1996) e rateados entre todos os consumidores, analisar o desenvolvimento temporal da geração de energia elétrica oriunda dessas fontes fornece subsídios importantes para o entendimento e determinação de políticas públicas que permitam o retorno do crescimento econômico priorizando suas dimensões social e ambiental.

O objetivo do presente estudo foi analisar a evolução da participação das fontes de energia EFV na matriz energética brasileira de geração de energia elétrica no período de 2013 a 2017.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Material

Os dados utilizados neste trabalho foram extraídos do site da Agência Nacional de Energia Elétrica, em sua seção Informações Gerenciais, na qual são disponibilizados trimestralmente os Boletins de Informações Gerenciais. Para o presente trabalho, foram considerados os boletins referentes aos anos de 2013 a 2017, exceto para análises referentes aos comparativos dos primeiros trimestres anuais, que incluem os dados de 2018.

A base de dados utilizada foi compilada a partir da Seção 1.3 (Geração por fonte) de cada um dos documentos supracitados. Nas Figuras 3 e 4 a seguir são apresentados os dados de geração de energia elétrica por fonte para os primeiros trimestres de 2013 e 2018, respectivamente o primeiro e último trimestres considerados nesta série histórica.

Figura 3. Geração de energia elétrica por fonte - 1º trimestre de 2013

1.3 Geração por Fonte				Março 2013				
	2011	2012	2013	2012	2012	2012	2012	2013
Energia Gerada em GWh	Jan-Dez	Jan-Dez	Jan-Mar	Jan-Mar	Abr-Jun	Jul-Set	Out-Dez	Jan-Mar
Despachada ao SIN	493.791	512.738	132.385	131.811	124.995	124.332	131.599	132.385
Fora do Sistema Interligado	12.106	11.844	1.072*	2.486	3.610	2.590	3158,39	1.072*
<b>Total de Geração</b>	<b>505.897</b>	<b>524.582</b>	<b>133.457</b>	<b>134.297</b>	<b>128.605</b>	<b>126.922</b>	<b>134.757</b>	<b>133.457</b>
<b>Participação por fonte **</b>								
<b>Renováveis</b>	<b>91,6%</b>	<b>86,8%</b>	<b>79,2%</b>	<b>92,7%</b>	<b>87,6%</b>	<b>88,7%</b>	<b>78,4%</b>	<b>79,2%</b>
disto: Hidráulica	91,2%	86,0%	78,4%	92,2%	87,0%	87,7%	77,4%	78,4%
Biomassa	0,1%	0,1%	0,1%	0,0%	0,1%	0,2%	0,3%	0,1%
Eólica	0,4%	0,6%	0,6%	0,5%	0,5%	0,8%	0,7%	0,6%
<b>Não renováveis</b>	<b>8,4%</b>	<b>13,2%</b>	<b>20,8%</b>	<b>7,3%</b>	<b>12,4%</b>	<b>11,3%</b>	<b>21,6%</b>	<b>20,8%</b>
disto: Gás Natural	2,7%	6,8%	12,2%	2,8%	6,7%	5,1%	12,3%	12,2%
Óleo Diesel/Combustível	0,7%	1,3%	3,6%	0,3%	0,4%	0,4%	3,8%	3,6%
Carvão	1,1%	1,5%	2,1%	1,2%	1,3%	1,8%	1,7%	2,1%
Nuclear	3,2%	3,1%	2,4%	2,3%	3,4%	3,5%	3,3%	2,4%
Outras	0,7%	0,5%	0,5%	0,6%	0,5%	0,6%	0,5%	0,5%

Participação de cada Fonte Geradora no total - Jan-Mar/2013

Evolução Trimestral

Fonte: ANEEL, 2013(a)

Figura 4. Geração de energia elétrica por fonte - 1º trimestre de 2018

1.3 Geração por fonte				Março 2018					
<b>Energia gerada em GWh</b>		<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2017</b>	<b>2017</b>	<b>2017</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>
		Jan-Dez	Jan-Dez	Jan-Mar	Jan-Mar	Abr-Jun	Jul-Set	Out-Dez	Jan-Mar
Despachada ao SIN		536.567	547.360	139.903	145.377	132.425	131.174	138.384	139.903
Fora do Sistema Interligado		2.703	2.011	706	612	673	726	769	706
<b>Total de Geração</b>		<b>539.270</b>	<b>549.370</b>	<b>140.609</b>	<b>145.989</b>	<b>133.097</b>	<b>131.899</b>	<b>139.153</b>	<b>140.609</b>
<b>Participação por fonte *</b>									
<b>Renováveis</b>		<b>82,8%</b>	<b>80,9%</b>	<b>86,0%</b>	<b>85,9%</b>	<b>82,5%</b>	<b>77,1%</b>	<b>77,6%</b>	<b>86,0%</b>
disto: Hidráulica		75,7%	72,0%	80,1%	80,8%	74,6%	64,8%	67,3%	80,1%
Biomassa		1,4%	1,6%	0,7%	0,7%	1,8%	2,5%	1,8%	0,7%
Eólica / Fotovoltaica		5,7%	7,2%	5,2%	4,5%	6,2%	9,8%	8,6%	5,2%
<b>Não renováveis</b>		<b>17,2%</b>	<b>19,1%</b>	<b>14,0%</b>	<b>14,1%</b>	<b>17,5%</b>	<b>22,9%</b>	<b>22,4%</b>	<b>14,0%</b>
disto: Gás natural		8,3%	9,9%	6,7%	6,7%	8,8%	12,4%	11,9%	6,7%
Óleo diesel/ Combustível		1,5%	1,7%	1,1%	0,9%	0,9%	2,7%	2,3%	1,1%
Carvão		2,9%	2,7%	2,3%	2,1%	2,6%	2,9%	3,3%	2,3%
Nuclear		2,9%	2,9%	2,1%	2,7%	3,1%	2,8%	2,9%	2,1%
Outras		1,6%	1,9%	1,8%	1,6%	2,0%	2,0%	2,0%	1,8%

Participação de cada Fonte Geradora no total - Jan-Mar/2018\*      Evolução Trimestral

Fonte: ANEEL, 2018(c)

A base de dados compilada a partir dos dados acima descritos utilizada para a elaboração deste estudo é apresentada na Tabela 1. Cabe notar que somente a partir do 1º trimestre de 2018 a geração fotovoltaica torna-se representativa o suficiente para ser apresentada junto à eólica.

Tabela 1. Índice de participação por fontes - Eólica/ Fotovoltaica

Período	Participação (%)	Geração Total (GWh)	Geração Eólica/ Fotovoltaica (GWh)
1º trim 2013	0,6	133457	800,742
2º trim 2013	0,5	127677	638,385
3º trim 2013	0,9	130889	1178,001
4º trim 2013	1,1	137572	1513,292
1º trim 2014	0,9	144751	1302,759
2º trim 2014	0,9	132236	1190,124
3º trim 2014	1,6	128765	2060,24
4º trim 2014	1,6	136485	2183,76
1º trim 2015	2,4	145074	3481,776
2º trim 2015	3	130404	3912,12
3º trim 2015	4,8	131757	6324,336
4º trim 2015	4,6	137293	6315,478

1º trim 2016	3,5	139635	4887,225
2º trim 2016	5,2	133392	6936,384
3º trim 2016	7,3	131056	9567,088
4º trim 2016	6,8	135218	9194,824
1º trim 2017	4,5	145998	6569,91
2º trim 2017	6,2	133025	8247,55
3º trim 2017	9,8	131786	12915,028
4º trim 2017	8,6	138954	11950,044
1º trim 2018	5,2	140609	7311,668

Fonte: Autores (2018)

Na Tabela 2, é apresentado um novo arranjo dos dados: a distribuição por semestre. Essa abordagem permitirá melhor estudo em relação à sazonalidade criada pelas condições meteorológicas características de cada estação do ano, assim como das condições econômicas (férias escolares e coletivas da indústria, feriados, períodos de picos de exportação de certos tipos de produto etc.), entre outros.

Tabela 2. Índice de participação por fontes - Eólica/ Fotovoltaica – Distribuição por semestre

Período	Participação (%)	Geração Total (GWh)	Geração Eólica/ Fotovoltaica (GWh)
1º trim 2013	0,6	133457	800,742
1º trim 2014	0,9	144751	1.302,759
1º trim 2015	2,4	145074	3.481,776
1º trim 2016	3,5	139635	4.887,225
1º trim 2017	4,5	145998	6569,91
1º trim 2018	5,2	140609	7.311,668
2º trim 2013	0,5	127677	638,385
2º trim 2014	0,9	132236	1.190,124
2º trim 2015	3	130404	3912,12

2º trim 2016	5,2	133392	6.936,384
2º trim 2017	6,2	133025	8247,55
3º trim 2013	0,9	130889	1.178,001
3º trim 2014	1,6	128765	2060,24
3º trim 2015	4,8	131757	6.324,336
3º trim 2016	7,3	131056	9.567,088
3º trim 2017	9,8	131786	12.915,028
4º trim 2013	1,1	137572	1.513,292
4º trim 2014	1,6	136485	2183,76
4º trim 2015	4,6	137293	6.315,478
4º trim 2016	6,8	135218	9.194,824
4º trim 2017	8,6	138954	11.950,044

Fonte: Autores (2018)

Para a realização da análise estatística, foram utilizadas as aplicações computacionais Microsoft® Excel 365® e R vers. 3.5.1.

## 2.2 Métodos

Foi utilizada a metodologia descritiva exploratória. As análises quantitativas foram realizadas através da Estatística Descritiva, utilizando métodos gráficos (de barras, de linhas, boxplot) e resumos numéricos (média, mediana, modas, quantis etc.).

Para o cálculo da produção de energia elétrica a partir das fontes fotovoltaica e eólica, foi considerada a participação percentual por trimestre aplicada à geração total em GWh.

Para a normalização dos dados, foi utilizada a seguinte equação:

Figura 5. Equação de Normalização

$$y = \frac{x - \min}{\max - \min}$$

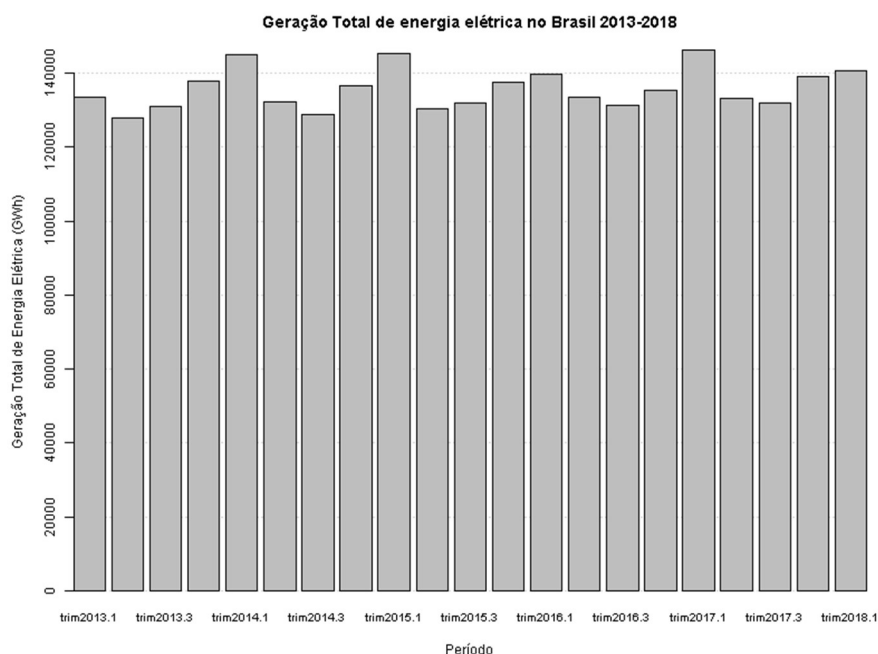
Fonte: Autores (2018)

Devido à restrição na quantidade de dados disponíveis, a relação entre variáveis foi estudada através da análise de correlação pelo método de Pearson.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 6 apresenta o gráfico de barras com a geração total de energia elétrica no Brasil, por trimestres, de 2013 ao 1º trimestre de 2018. Nele, podemos notar um padrão na variação da geração de energia elétrica ao longo dos trimestres, que será melhor detalhado adiante. O resumo numérico para essa série é apresentado na Tabela 3.

Figura 6. Geração total de energia no Brasil 2013-2018



Fonte: Autores (2018)

Tabela 3. Resumo Numérico da Geração Total de Energia Elétrica no Brasil - 2013-2018 (GWh)

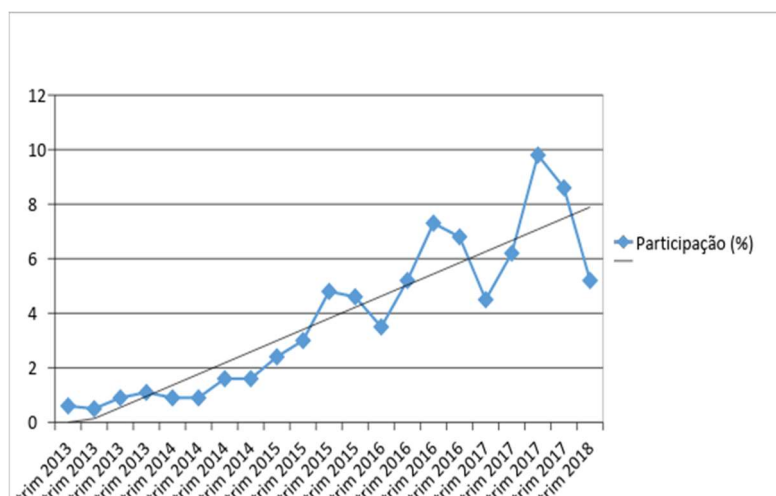
Mínimo	1º quartil	Mediana	Desvio padrão	Média	3º quartil	Máximo
127677	131757	133457	5375,244	135525	138954	145998

Fonte: Autores (2018)

Da Tabela 3, podemos extrair o Coeficiente de Variação (CV), que é a razão entre o desvio padrão e a média, dos valores de geração total para análise da homogeneidade do conjunto de dados. No caso em tela, temos que  $CV_{\text{geração}} = 0,0397$ , ou 3,97%, valor baixo o suficiente para o conjunto de dados ser considerado homogêneo.

Na Figura 7, é apresentado o gráfico da evolução da participação das fontes EFV na geração total de energia no Brasil de 2013 ao 1º trimestre de 2018.

Figura 7. Participação das energias EFV na geração total do Brasil 2013-2018

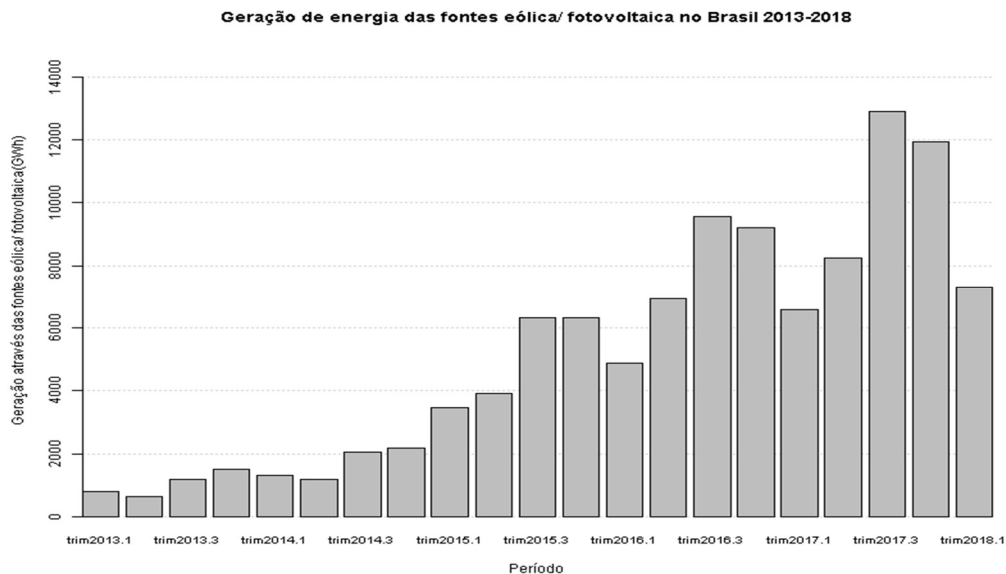


Fonte: Autores (2018)

Constata-se uma forte tendência de crescimento da geração dessas modalidades de energia, refletindo o avanço tecnológico e os incentivos governamentais para o desenvolvimento de energias renováveis na matriz energética brasileira. Na reta de regressão linear obtida pode-se verificar um coeficiente de determinação próximo a 1. Novamente, pode-se notar que o comportamento sazonal também se apresenta no percentual de participação.

Na Figura 8, é apresentada a contribuição em GWh das energias elétrica oriundas das fontes eólica e fotovoltaica no período de 2013 ao 1º trimestre de 2018.

Figura 8. Geração total de energia eólica/fotovoltaica no Brasil 2013-2018



Fonte: Autores (2018)

4. O sumário estatístico para os dados de geração baseada nas fontes EFV é apresentado na Tabela

Tabela 4. Resumo Numérico da Geração Total de Energia Elétrica EFV no Brasil - 2013-2018 (GWh)

Mínimo	1º quartil	Mediana	Desvio padrão	Média	3º quartil	Máximo
638,4	1513,3	4887,2	3782,214	5165,7	7311,7	12915,0

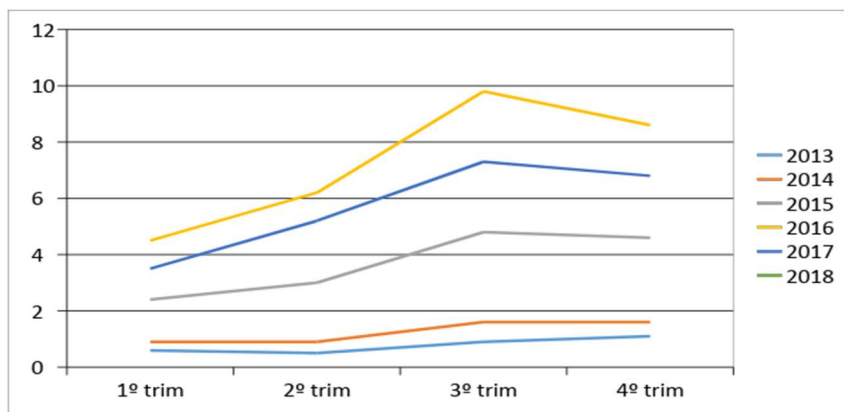
Fonte: Autores (2018)

Dos dados da Tabela 4, pode-se extrair que o coeficiente de variação  $CV_{EFV}=0,732$ , ou 73,2%, está muito acima do limite de 25% para considerar um conjunto de dados homogêneo, o que demonstra que de fato houve forte incremento na produção de energia EFV no Brasil nos últimos anos.

Para analisar a sazonalidade na produção de energia EFV, foi construído o gráfico apresentado na Figura 9. Nele, é feita a comparação entre a participação da energia EFV por trimestre ao longo dos anos de 2013 a 2018. No entanto, como 2018 só possui dados referentes ao 1º trimestre, não foi representativo no gráfico.



Figura 9. Comparação da participação (%) por trimestre 2013-2018

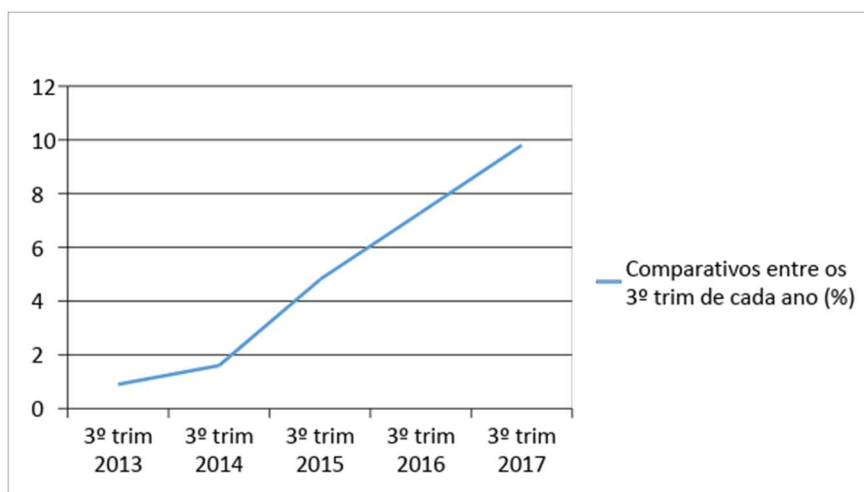


Fonte: Autores (2018)

Pode-se notar que o aumento da participação dessas fontes por trimestre é consistente ano a ano. Há padrão de comportamento entre os trimestres a partir de 2014 para a participação percentual dessas fontes de energia, com crescimento nos 1º - 2º e 2º - 3º trimestres e declínio nos 3º - 4º e 4º - 1º, podendo haver razões climáticas e/ ou ligadas à economia, cabendo um aprofundamento neste aspecto em pesquisas posteriores.

Na Figura 10, é apresentada a evolução da geração por fontes EFV dos terceiros trimestres de 2013 a 2017, pois este é o trimestre que historicamente apresenta o pico de geração de energia. Mais uma vez, o forte padrão de crescimento na geração se mostra verdadeiro.

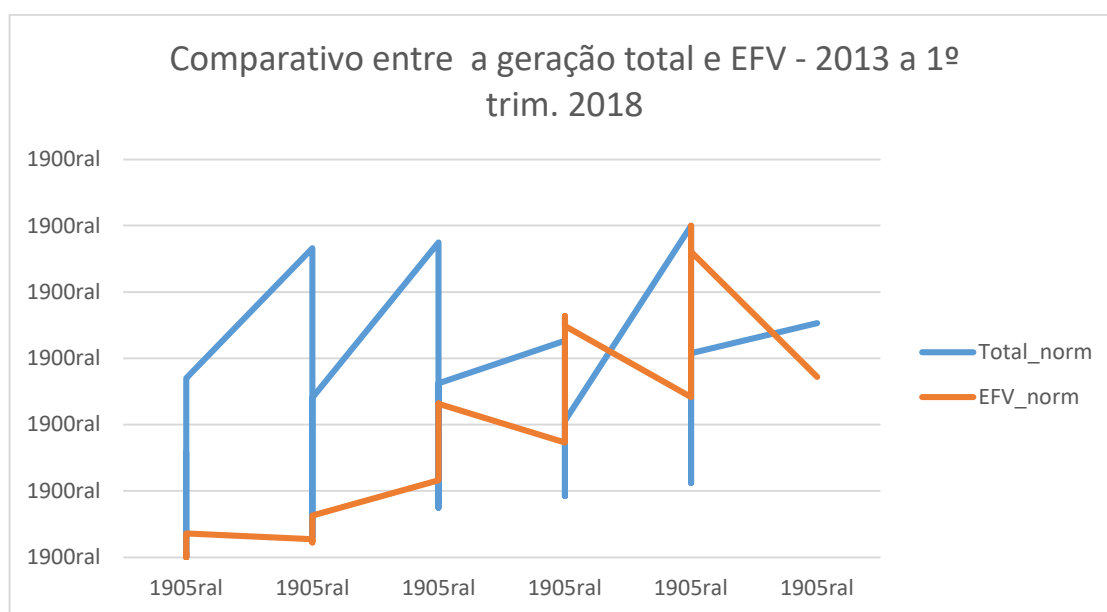
Figura 10. Comparativos geração de energia eólica/fotovoltaica entre os 3º trim. de cada ano (%) 2013-2017



Fonte: Autores (2018)

Para avaliar de forma preliminar a influência das condições climáticas sobre as econômico-sociais, cabe fazer um comparativo entre a geração total de energia elétrica e aquela oriunda das fontes EFV. Dada a grande diferença de amplitude entre esses valores em todos os trimestres, foi utilizado o recurso da normalização para compatibilizar os dados e permitir uma comparação mais eficiente. O Gráfico comparativo é apresentado na Figura 11.

Figura 11. Comparativo entre os valores normalizados de Geração Total e Geração EFV- 2013 ao 1º trimestre 2018



Fonte: Autores (2018)

Tomando por premissa que a geração total de energia elétrica atende integralmente a demanda socioeconômica e, dada a complementaridade e diversificação da matriz brasileira, que é capaz de fazê-lo independentemente das condições climáticas, é possível estudar se as variações na geração EFV são dependentes somente das condições climáticas ou se são afetadas também pelas condições socioeconômicas.

A Tabela 5 apresenta os valores normalizados calculados para os valores de geração total e EFV normalizados.

Tabela 5. Valores normalizados de Geração Total e Geração EFV

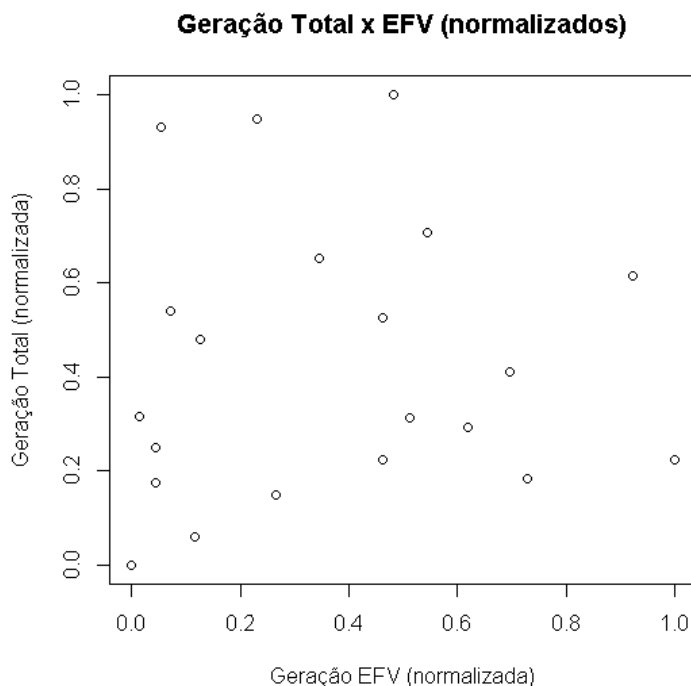
Ano	Geração Total (normalizado)	Geração EFV (normalizado)

2013.1	0.315484963	0.013224869
2013.2	0	0
2013.3	0.175317941	0.043954687
2013.4	0.540090606	0.07126598
2014.1	0.93193603	0.054078872
2014.2	0.248840129	0.044942172
2014.3	0.059385405	0.115817899
2014.4	0.480759784	0.125879281
2015.1	0.949566072	0.231609814
2015.2	0.148845587	0.266663696
2015.3	0.222695268	0.463151938
2015.4	0.52486218	0.462430405
2016.1	0.65269363	0.346091354
2016.2	0.311937121	0.513006609
2016.3	0.184433164	0.727291899
2016.4	0.41160417	0.696968952
2017.1	1	0.483147144
2017.2	0.291905464	0.619808281
2017.3	0.224278151	1
2017.4	0.61552317	0.921396753
2018.1	0.705856667	0.543575552

Fonte: Autores (2018)

Na Figura 12, é mostrado o gráfico de dispersão EFV normalizada x Total normalizado. Cabe ressaltar que visualmente não há padrão no arranjo que sugira uma tendência de relação entre as variáveis.

Figura 12. Gráfico de dispersão Geração total (normalizado) x Geração EFV (normalizado)



Fonte: Autores (2018)

O coeficiente de correlação encontrado foi  $r = 0.06273372$ ; assim, para o teste de significância, temos o valor de  $t = 0.273989623$ . Considerando que o  $t$  crítico considerando  $n-2 = 19$  graus de liberdade e um nível de confiança de 95% ( $\alpha = 0,05$ ) é 2,093, podemos dizer que o valor de  $r$  não é significativo, sendo a produção de energia EFV majoritariamente influenciada pelas condições climáticas, tendo pouca relação com as condições de demanda socioeconômicas do país.

#### 4. CONCLUSÃO

Ao quantificar a produção total de energia elétrica no Brasil, podemos notar que há variação ao longo dos trimestres no período estudado (2013 a 2017), acompanhando as demandas socioeconômicas de energia. Mesmo considerando a evidente dependência da luz do dia para a energia fotovoltaica, dado que ainda há grande diferença de capacidade instalada entre as energias eólica e fotovoltaica, vemos que a diferença entre a capacidade instalada e a efetiva geração baseada nas energias EFV sofre baixa influência da demanda, operando conforme a disponibilidade operacional e disponibilidade da fonte primária de energia.

Em estudos posteriores, a evolução do custo das energias EFV poderá ser estudado, assim como o detalhamento da influência das condições climáticas no aproveitamento da capacidade instalada das usinas de geração do país.

Por fim, apesar do forte crescimento em utilização e importância que as energias eólica e fotovoltaica vêm tendo na matriz energética brasileira, ainda há espaço para ampliação. Neste aspecto, os leilões de energia com estas fontes devem ser mantidos e ampliados, assim como a manutenção dos subsídios governamentais, de forma a reduzir a utilização de fontes emissoras de gases de efeito estufa ou maior demanda de construção de hidrelétricas.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL. **Boletim de Informações Gerenciais: março de 2018**. Agência Nacional de Energia Elétrica: Brasília, 2018c. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656877/14854008/Boletim+de+Informa%C3%A7%C3%B5es+Gerenciais+-+1%C2%BA+trimestre+2018/01298785-3069-c0e7-d9c8-a2cca07cddd9>. Acesso em: 11 set. 2018.

ANEEL. **Boletim de Informações Gerenciais: dezembro de 2017**. Agência Nacional de Energia Elétrica: Brasília, 2018b. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656877/14854008/Boletim+de+Informa%C3%A7%C3%B5es+Gerenciais+-+4%C2%BA+trimestre+2017/44ee3035-27e5-0398-e7e3-c612ec4dc994>. Acesso em: 11 set. 2018.

ANEEL. **Boletim de Informações Gerenciais: setembro de 2017**. Agência Nacional de Energia Elétrica: Brasília, 2018a. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656877/14854008/Boletim+de+Informa%C3%A7%C3%B5es+Gerenciais+-+3%C2%BA+trimestre+2017/b609461f-e490-79e8-89bb-ba0f02d0fba9>. Acesso em: 11 set. 2018.

ANEEL. **Boletim de Informações Gerenciais: junho de 2017**. Agência Nacional de Energia Elétrica: Brasília, 2017d. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656877/14854008/Boletim+de+Informa%C3%A7%C3%B5es+Gerenciais+2%C2%BA+trimestre+de+2017/6f1fac17-8146-4a17-508a-567419d35fae>. Acesso em: 11 set. 2018.

ANEEL. **Boletim de Informações Gerenciais: março de 2017.** Agência Nacional de Energia Elétrica: Brasília, 2017c. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656877/14854008/Boletim+de+Informa%C3%A7%C3%B5es+Gerenciais+1%C2%BA+trimestre+de+2017/798691d2-990b-3b36-1833-c3e8c9861c21>. Acesso em: 11 set. 2018.

ANEEL. **Boletim de Informações Gerenciais: dezembro de 2016.** Agência Nacional de Energia Elétrica: Brasília, 2017b. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656877/14854008/Boletim+de+Informa%C3%A7%C3%B5es+Gerenciais+4%C2%BA+trimestre+de+2016/2cc14375-3e1c-9dfe-f6a6-a5a1fd69f021>. Acesso em: 11 set. 2018.

ANEEL. **Boletim de Informações Gerenciais: setembro de 2016.** Agência Nacional de Energia Elétrica: Brasília, 2017a. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656877/14854008/Boletim+de+Informa%C3%A7%C3%B5es+Gerenciais+-+3%C2%B0+trimestre+de+2016/a4192798-adf3-4902-b2ae-098033e69f5c>. Acesso em: 11 set. 2018.

ANEEL. **Boletim de Informações Gerenciais: junho de 2016.** Agência Nacional de Energia Elétrica: Brasília, 2016d. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656877/14854008/Boletim+de+Informa%C3%A7%C3%B5es+Gerenciais+-+2%C2%BA+trimestre+de+2016/fab4a185-c546-42e7-ba0c-a1fdc23aafde>. Acesso em: 11 set. 2018.

ANEEL. **Boletim de Informações Gerenciais: março de 2016.** Agência Nacional de Energia Elétrica: Brasília, 2016c. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656877/14854008/Boletim+de+Informa%C3%A7%C3%B5es+Gerenciais+-+1%C2%BA+trimestre+de+2016/b25a0697-2f30-4946-b8d5-9bac5931ce10>. Acesso em: 11 set. 2018.

ANEEL. **Boletim de Informações Gerenciais: dezembro de 2015.** Agência Nacional de Energia Elétrica: Brasília, 2016b. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656877/14854008/Boletim+de+Informa%C3%A7%C3%B5es+Gerenciais+-+Dezembro+2015/74ec6b73-0a7d-459b-b9ca-bb47ddb14e88>. Acesso em: 11 set. 2018.

ANEEL. **Boletim de Informações Gerenciais: setembro de 2015.** Agência Nacional de Energia Elétrica: Brasília, 2016a. Disponível em: [http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Z\\_IG\\_Set2015\\_v3.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Z_IG_Set2015_v3.pdf). Acesso em: 11 set. 2018.

ANEEL. **Boletim de Informações Gerenciais: junho de 2015.** Agência Nacional de Energia Elétrica: Brasília, 2015d. Disponível em: [http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Z\\_IG\\_Jun2015.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Z_IG_Jun2015.pdf). Acesso em: 11 de set. de 2018.

ANEEL. **Boletim de Informações Gerenciais: março de 2015.** Agência Nacional de Energia Elétrica: Brasília, 2015c. Disponível em: [http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Z\\_IG\\_Mar\\_2015-170615.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Z_IG_Mar_2015-170615.pdf). Acesso em: 11 set. 2018.

ANEEL. **Boletim de Informações Gerenciais: dezembro de 2014.** Agência Nacional de Energia Elétrica: Brasília, 2015b. Disponível em: [http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Z\\_IG\\_Dez\\_2014\\_v3.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Z_IG_Dez_2014_v3.pdf). Acesso em: 11 set. 2018.

ANEEL. **Boletim de Informações Gerenciais: setembro de 2014.** Agência Nacional de Energia Elétrica: Brasília, 2015a. Disponível em: [http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Z\\_IG\\_Set\\_14v4.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Z_IG_Set_14v4.pdf). Acesso em: 11 set. 2018.

ANEEL. **Boletim de Informações Gerenciais: junho de 2014.** Agência Nacional de Energia Elétrica: Brasília, 2014d. Disponível em: [http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Z\\_IG\\_Jun14.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Z_IG_Jun14.pdf). Acesso em: 11 set. 2018.

ANEEL. **Boletim de Informações Gerenciais: março de 2014.** Agência Nacional de Energia Elétrica: Brasília, 2014c. Disponível em: [http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/IG\\_Mar\\_14.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/IG_Mar_14.pdf). Acesso em: 11 set. 2018.

ANEEL. **Boletim de Informações Gerenciais: dezembro de 2013.** Agência Nacional de Energia Elétrica: Brasília, 2014b. Disponível em: [http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/Z\\_IG\\_dez13.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/Z_IG_dez13.pdf). Acesso em: 11 set. 2018.

ANEEL. **Boletim de Informações Gerenciais: setembro de 2013.** Agência Nacional de Energia Elétrica: Brasília, 2014a. Disponível em: [http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Z\\_IG\\_Set\\_2013\\_v5.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Z_IG_Set_2013_v5.pdf). Acesso em: 11 set. 2018.

ANEEL. **Boletim de Informações Gerenciais: junho de 2013**. Agência Nacional de Energia Elétrica: Brasília, 2013b. Disponível em: [http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Z\\_IG\\_Jun\\_2013.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Z_IG_Jun_2013.pdf). Acesso em: 11 set. 2018.

ANEEL. **Boletim de Informações Gerenciais: março de 2013**. Agência Nacional de Energia Elétrica: Brasília, 2013a. Disponível em: [http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Z\\_IG\\_Mar\\_2013.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Z_IG_Mar_2013.pdf). Acesso em: 11 set. 2018.

ANEEL. **Atlas da Energia Elétrica no Brasil**. Agência Nacional de Energia Elétrica: 3. ed. – Brasília, 2008. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas3ed.pdf>. Acesso em: 11 dez. 2018.

BARROS, R. **Geração Centralizada Solar Fotovoltaica no Brasil**. Seminário Implantação e Integração de Novos Empreendimentos de Transmissão e Geração de Energia. Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. Brasília, 2018. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/1138781/66357670/2018.03.15+ABSOLAR+-+Energia+Solar+Fotovoltaica+-+Ricardo+Barros+-+Vers%C3%A3o+Final.pdf/77b569b6-1941-4af0-867e-38d9ddf12e01?version=1.0>. Acesso em: 14 set. 2018

BRASIL. LEI Nº 9.427, DE 26 DE DEZEMBRO DE 1996. **Institui a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, disciplina o regime das concessões de serviços públicos de energia elétrica e dá outras providências**. Brasília, dez. 1996. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/LEIS/L9427cons.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9427cons.htm). Acesso em: 12 dez. 2018.

EPE. **Balanco Energético Nacional 2018: Relatório Síntese – Ano Base 2017**. Empresa Brasileira de Pesquisa Energética: Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-397/Relat%C3%B3rio%20S%C3%ADntese%202018-ab%202017vff.pdf>. Acesso em: 10 set. 2018

EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2026**. Empresa Brasileira de Pesquisa Energética: Brasília, 2017. Disponível em: <http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-40/PDE2026.pdf>. Acesso em: 07 dez. 2018

GASPARIN, P.; KESTRING, F. **Aplicação da estatística no curso de engenharia ambiental: análise de dados de situações problemas**. Encontro Paranaense de Educação Matemática. Unioeste, Cascavel, 2017. Disponível em: [http://www.sbemparana.com.br/eventos/index.php/EPREM/XIV\\_EPREM/paper/viewFile/300/39](http://www.sbemparana.com.br/eventos/index.php/EPREM/XIV_EPREM/paper/viewFile/300/39). Acesso em: 11 dez. 2018.



GWEC. **Global Wind Report: Annual Market Update 2017**. Disponível em: <http://files.gwec.net/files/GWR2017.pdf>. Global Wind Energy Council: Bruxelas, 2018. Acesso em: 28 nov. 2018

ONS. **Boletim Mensal de Geração Eólica: Setembro de 2018**. Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2018. Disponível em: <http://ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/Boletim%20Mensal%20de%20Gera%C3%A7%C3%A3o%20E%C3%B3lica%202018-09.pdf>. Acesso em: 22 dez. 2018.

ONU. **Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Organização das Nações Unidas, 2015. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/wp-content/uploads/2015/10/agenda2030-pt-br.pdf>. Acesso em: 10 set. 2018

QUANTO Custa A Energia Solar Fotovoltaica. Portal Solar, 2015. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/quanto-custa-a-energia-solar-fotovoltaica.html>. Acesso em: 6 dez. 2018.

TOLMASQUIM, M. Energia Renovável: hidráulica, biomassa, eólica, solar, oceânica. Empresa de Pesquisa Energética: Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-172/Energia%20Renov%C3%A1vel%20-%20Online%2016maio2016.pdf>. Acesso em: 7 dez. 2018.

## ARTIGO CIENTÍFICO 2

### ENERGIA TERMOSOLAR: UMA REVISÃO DE LITERATURA

#### *THERMOSOLAR ENERGY: A LITERATURE REVIEW*

Fabiano Baldez da Costa Brito - IFFluminense/PPEA

Marcos Antonio Cruz Moreira - IFFluminense/PPEA

Augusto Eduardo Miranda Pinto - IFFluminense/PPEA

Severino Joaquim Correia Neto - IFFluminense

Eurico Huziwara - UNESA

#### RESUMO

O sol é a principal fonte de energia do nosso planeta e sua utilização contribui para o equilíbrio da matriz energética. A energia do calor solar concentrado é um campo de pesquisa em expansão, carecendo de melhorias em todos os sistemas das plantas termosolares para aumento da eficiência. O presente trabalho apresenta uma breve introdução ao assunto e uma revisão bibliográfica de trabalhos publicados entre 2015 e o primeiro trimestre de 2019, mostrando as principais tendências de pesquisa neste tema, classificadas em: estudos de viabilidade e modelagem matemática. análise de falhas; armazenamento de energia térmica; revestimentos para coletores solares; riscos ambientais; e, outros usos relevantes. O desenvolvimento de plantas CSP, seja de grande capacidade instalada ou para geração distribuída, além de diversificar as fontes de energia aumentando a confiabilidade do sistema de geração nacional, pode fomentar a geração de emprego e renda no sertão brasileiro, área de grande vulnerabilidade social.

**Palavras-chave:** Termosolar. Energias Renováveis. CSP.

#### ABSTRACT

*The sun is the main source of energy on our planet and its use contributes to the balance of the energy matrix. Concentrated solar heat energy is an expanding research field, requiring improvements in all systems of thermosolar plants to increase efficiency. This paper presents a brief introduction to the subject and a bibliographic review of works published between 2015 and the first quarter of 2019, showing the main research trends in this theme, classified into feasibility studies and mathematical modeling. failure analysis; thermal energy storage; coatings for solar collectors; environmental risks;*

*and other relevant uses. The development of CSP plants, whether with large installed capacity or for distributed generation, in addition to diversifying energy sources, increasing the reliability of the national generation system, can foster the generation of employment and income in the Brazilian hinterland, an area of great social vulnerability.*

**Keywords:** *Thermosolar. Renewable Energy. CSP.*

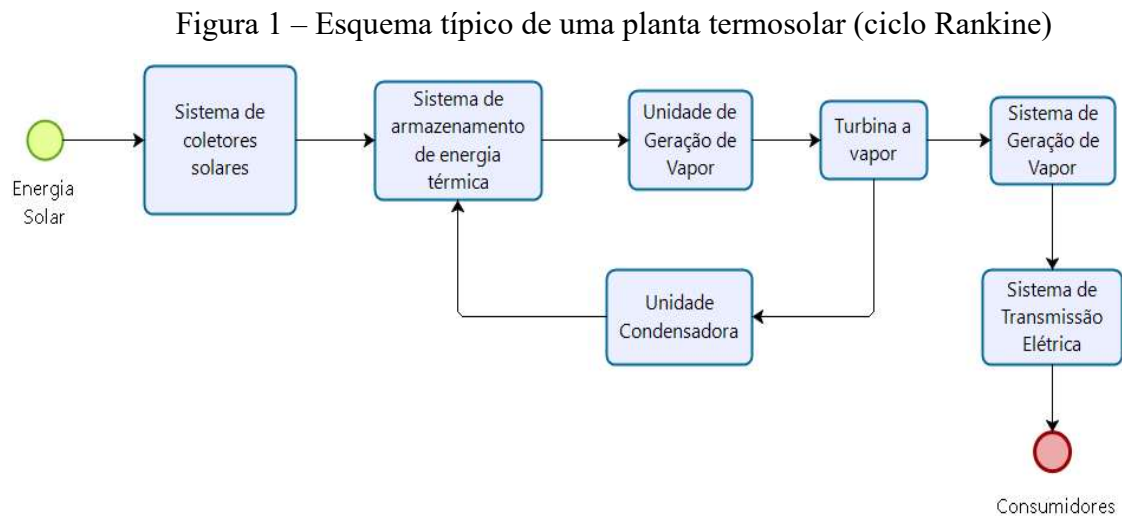
## 1. INTRODUÇÃO

Segundo Bachiller (2009), a radiação solar é a principal fonte de energia da Terra, sendo a maior responsável pelos principais processos bioquímicos e meteocenográficos, assim como fonte primária da energia armazenada nos combustíveis fósseis. Sua utilização como fonte de energia elétrica é de grande interesse, dada a sua disponibilidade em diferentes intensidades por todo o globo terrestre. No entanto, trata-se de uma fonte primária sazonal para uma dada região geográfica pelo evidente fato que só pode ser aproveitada diretamente durante o dia, o que suscita a necessidade de pesquisas para a máxima utilização.

Atualmente, temos dois modos básicos de aproveitamento da radiação solar para fins de geração elétrica: células fotovoltaicas, onde os fótons incidentes excitam elétrons da banda de valência para a banda de condução do material semiconductor constituinte da célula, tipicamente silício cristalino, performando uma corrente elétrica, segundo ZEMAN (2016), e a termosolar, onde a radiação é aproveitada na forma de calor para ser convertida em eletricidade.

A energia termosolar se divide em duas categorias básicas: baixa temperatura, com temperaturas de aquecimento até 100°C, forma mais difundida sobretudo para sistemas de aquecimento de água para utilização direta que, conforme REN21 (2019), possui capacidade instalada mundialmente de 480GWth, e de alta temperatura, onde a radiação é concentrada através de coletores específicos em uma pequena região de forma a aquecê-la a altas temperaturas, tipicamente entre 350°C e 600°C, de acordo com o tipo de fluido de transferência térmica com que operam, entre outras condições. A partir daí, o calor concentrado pode ser utilizado de diversas maneiras – a principal é a geração de vapor para movimentação de turbinas conforme o processo Rankine, que é o método mais utilizado nas plantas industriais em operação, sobretudo na Espanha, que, segundo REN21 (2019), é o país com maior capacidade instalada no mundo nesta modalidade. O presente trabalho se concentrará nesta última categoria de aproveitamento da energia termosolar concentrada.

Um esquema típico simplificado de uma planta termosolar baseada em turbina a vapor (ciclo Rankine) é descrito na Figura 1:



Fonte: Autores (2019)

As principais componentes deste diagrama são:

a) Banco de coletores solares (heliostatos), superfícies refletoras de energia solar responsáveis pela transmissão da radiação ao fluido de transferência térmica (FTT). Podem ser do tipo lineares (coletores parabólicos ou tipo Fresnel), com torre concentradora ou em disco parabólico;

b) Sistema de armazenamento de energia térmica (ET), compostos de unidade de armazenamento de ET, normalmente em dois tanques, um para o sal frio e outro para o sal quente, permutadores de calor, material para armazenamento de ET e FTT, notadamente sais fundidos (LI; WU, 2015);

c) Unidade de geração de vapor, onde a água do circuito de geração se transforma em vapor para acionamento da turbina de geração após troca térmica com o FTT;

d) Unidade condensadora, responsável pela condensação mediante resfriamento por troca térmica do vapor arrefecido oriundo da turbina geradora com água, preparando o sistema para um próximo ciclo;

e) Turbina a vapor, força motriz responsável pela geração de energia elétrica propriamente dita;

f) Sistema de geração, transformação e transmissão de energia.

A despeito da grande Irradiação Solar Direta Normal (INSD) disponível em praticamente todo o território brasileiro, conforme ANEEL (2019), o aproveitamento da energia termosolar concentrada é praticamente inexistente. Assim, justifica-se o aprofundamento do estudo desta modalidade de

geração de energia renovável no Brasil dado seu alto potencial e utilização praticamente nula. Este artigo tem por objetivo apresentar as pesquisas publicadas de 2015 a 2019 referentes os seguintes aspectos da energia termosolar: estudos de viabilidade, análise de falhas, revestimentos reflexivos, FTT, impactos ambientais, armazenamento e regulamentação comercial, além de um breve comentário sobre aquecimento de água.

## **2. MATERIAL E MÉTODO**

Foi realizada uma revisão de bibliografia de cunho exploratório utilizando a palavra-chave *thermosolar* na base internacional de indexação *Scopus*.

Como critério de seleção, definiu-se a aceitação de artigos revisados por pares publicados a partir de 2015 que tivessem relação direta com o assunto, não sendo computados para o número total as versões duplicadas registradas em outras bases.

## **3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Após a aplicação do critério de seleção, foram destacados 76 artigos, sendo classificados em subcategorias para facilitar o entendimento: Estudos de viabilidade e modelagem matemática, Análise de falhas, FTT e Armazenamento, Revestimento dos coletores solares, Riscos Ambientais, Aquecimento de água e outros usos relevantes, que podem ser utilizados em paralelo com a planta para melhor aproveitamento do calor.

### **3.1 Estudos de viabilidade e Modelagem Matemática**

Dentre as etapas iniciais de um projeto complexo de engenharia como uma usina termosolar estão os estudos de viabilidade, sejam estes referentes às dimensões técnica, econômico-financeira, social, ambiental ou outras. Nesta etapa, são utilizados ferramentas e modelos matemáticos para estudar etapas e sistemas, avaliar impactos da alteração intencional ou não de variáveis durante a operação e otimizar processos sem a necessidade prévia de implementação física do objeto de estudo.

A análise de otimização multiobjetivo e multicritério baseada em modelo analítico termodinâmico para uma planta termosolar multiestágios recuperativa com ciclo Brayton visando subsidiar projetos mais eficientes é apresentada por Sánchez-Orgaz et al. (2015). Merchán et al. (2017, 2018) apresentaram um modelo termodinâmico considerando os dados reais de instalação de Sevilha, Espanha, incluindo a avaliação anual de performance, consumo de combustível e emissões de gases.

Visando fornecer subsídios à implantação de plantas de energia termosolar na Arábia Saudita, Kassem et al. (2017) conduziram uma análise técnico-econômica multicenário baseada na matriz SWOT (*strengths, weaknesses, opportunities, and threats* – forças, fraquezas, oportunidades e ameaças) para definição das tecnologias de coleta, receptores termosolares, FTTs e de armazenamento de energia. Estudo com a mesma finalidade foi conduzido por Olmedo-Torre et al. (2018) para Burkina Faso.

Ambientes urbanos requerem pequenas aplicações que utilizem heliostatos menores, que permitam menores distâncias de deslocamento para os raios refletidos e aceitem maior margem de erro em operação. Com este fim, Torres-Roldán et al. (2015) propõem um novo sistema de heliostatos polares, os quais redirecionam os raios solares paralelamente ao eixo da Terra, podendo ainda alcançar um ponto desejado (como uma torre central) por meio de um espelho secundário fixo. Sua arquitetura permite o posicionamento em elevação e azimute através de ação única, podendo um único equipamento controlar diversos heliostatos associados.

A redução do tamanho físico e das possibilidades de falhas também permite a implantação de usinas termosolares mais seguras, confiáveis e de menor porte, o que pode estimular a entrada no mercado por investidores com menor capacidade de investimento. O trabalho de Olsen et al. (2016) apresenta uma nova configuração em desenvolvimento, a Termoeletricidade Solar via Armazenamento Avançado em Calor Latente (*Solar ThermoElectricity via Advanced Latent Heat Storage - STEALS*) que substitui a conversão eletromecânica da ET de alta temperatura gerada a partir do fluxo solar concentrado através de turbinas a vapor por uma que utiliza geradores termoelétricos de estado sólido, que convertem o calor diretamente em eletricidade. A ET é armazenada em um material de mudança de fase, que permite a continuidade da geração até certo grau mesmo mediante à variação da INSD da fonte.

Uma alternativa para a estabilidade da geração mesmo em condições de variação da INSD é a instalação de sistemas híbridos para manter vapor superaquecido. Olivenza-León et al. (2015) fizeram a modelagem termodinâmica para um sistema híbrido com o gás natural. Sahoo et al. (2016) e Durante et al. (2017) propuseram a utilização da biomassa, o primeiro em estudo de viabilidade termodinâmica (energética e exergética) para um ciclo de combustão externa e o segundo um modelo termodinâmica considerando a combustão externa. Bonilla; Roca (2018) e Colmenar-Santos et al. (2015) trataram do biogás em substituição ao armazenamento em sal como fonte primária renovável complementar.

Diversas plantas termosolares têm para sua partida permutadores gás queimado x FTT. Peterseim et al. (2016) defenderam a utilização de sistemas de partida multicomcombustível de forma a reduzir a demanda por gás natural (por exemplo, biomassa) e a utilização de permutadores de maior

capacidade, em detrimento de unidades de menor capacidade de troca térmica, de forma a aumentar a confiabilidade do sistema e reduzir custos.

Também para este fim, Aguilar-Jiménez et al. (2018) propuseram e estudaram a viabilidade técnica e econômica de uma planta híbrida fotovoltaica – termosolar concentrada como fonte de energia para microrredes isoladas. As células fotovoltaicas ficariam responsáveis pela geração durante o dia com o complemento da termosolar concentrada em momentos de baixa ou nula INSD através da recuperação da energia armazenada na forma de calor sensível.

A cogeração a partir de turbinas a gás foi estudada por Dabwan; Mokheimer (2017), visando reduzir a demanda por armazenamento de ET nos períodos de variação da INSD. De forma contrária, Rech et al. (2018) propõem a utilização da energia termosolar como forma de economia de combustível em usina termoelétrica a carvão, reduzindo assim a emissão de gases de efeito estufa na atmosfera.

Ventas et al. (2017) apresentam o estudo de um processo complexo de duplo efeito, que permite a geração de eletricidade e resfriamento utilizando amônia/ nitrato de lítio. Ele é particularmente útil para sistemas de geração distribuída urbanos podendo contribuir diretamente para o Objetivo 11 da Agenda 2030, onde a planta responsável por este processo supriria parte da eletricidade demandada e, por outro lado, auxiliaria na redução do consumo de energia para condicionamento do ar.

É possível em determinadas situações aumentar a eficiência global de um determinado sistema através do aumento da eficiência de uma parte em particular, a que se justifica a utilização da modelagem matemática. Piña-Ortiz et al. (2019) apresentaram um protótipo de receptor aletado de uma torre termosolar para a planta piloto da Universidade de Sonora, México, com o qual compararam o modelo termodinâmico gerado a partir de software CFD (*Computational Fluid Dynamics*) com os dados medidos.

No complexo mercado de energia elétrica, a sazonalidade da energia solar pode trazer incertezas, sobretudo no mercado futuro. Além disso, por conta da integração na malha de geração de diversas fontes distintas, a previsão da disponibilidade de energia solar pode ser crucial para a programação de paradas de manutenções ou de entrada de pacotes de geração de forma a mitigar o risco de interrupção do fornecimento de energia aos consumidores. Nesta linha, Fernández-León et al. (2016) apresentaram o STEP4GRID, sistema utilizado na planta termosolar de Solúcar, localizada em Sanlúcar la Mayor, Sevilha, Espanha, como ferramenta para previsão da INSD e da produção bruta.

### **3.2 Análise de Falhas**

Analisar falhas ocorridas no processo permite tratar suas causas e, através da implementação abrangente de ações de correção, mitigar ou mitigar problemas futuros em instalações correlatas.

Materiais para armazenamento de ET, notadamente sais fundidos (sais solares), são vitais para a operação em plantas termosolares convencionais. No entanto, a corrosão é um problema sério devido à reatividade natural do sal e as altas temperaturas a que o sistema está submetido. Prieto et al. (2016) desenvolveram e utilizaram uma nova metodologia, a Análise Gravimétrica Dinâmica, para avaliar a corrosão gerada pelos sais solares, e qual a influência do teor de cloreto neles contidos, em amostras de aço carbono ASTM A516 Gr70, como proposta de substituição ao método usual previsto na norma ASTM G1-03.

Como alternativa de prevenção à corrosão, Audigié et al. (2018) apresentaram alternativas de revestimento com ligas de alumínio e níquel-alumínio aplicadas por eletrodeposição e jateamento em uma liga P91 - 9% Cr em peso e testado com este a 580 °C e em contato com sal solar, mostrando-se ambos mais efetivos que a o não revestimento.

A seleção de materiais adequados às solicitações mecânicas, térmicas e de resistência à corrosão é também um imperativo de projeto para os permutadores de calor entre os materiais de mudança de fase e o vapor. Ruiz-Cabañas et al. (2017), ao avaliar o ASTM A516 Gr70, o aço inoxidável A316L e a liga base níquel Inconel 625. Os dois últimos mostraram boa resistência à corrosão, sendo então o A316L considerado como melhor escolha devido ao critério técnico-econômico.

Um sistema crítico para a usina de energia termosolar “La Asturiana”, localizada no sul da Espanha, é o de coleta, transporte e armazenamento de águas pluviais para o sistema de geração de vapor. Em ordem de estabelecer as causas de patologias identificadas no duto enterrado de concreto para transporte de águas pluviais da instalação, González-Nicieza et al. (2017) apresentaram novas técnicas de ensaios *in situ* para levantamento de dados posteriormente utilizados em modelo matemático para avaliar a relevância das hipóteses levantadas. Foi constatado que houve a penetração de partículas mais finas no enchimento utilizado para a união das seções, fato que *per si* não explica as trincas encontradas. No entanto, houve o acréscimo de carga devido ao aterramento imprevisto de 5m sobre o caminho do duto, que explicava as trincas na geratriz superior e, combinado com o enfraquecimento das juntas devido ao empobrecimento do material do enchimento, explicava também as trincas na geratriz inferior.

Ordiales Martinez et al. (2018) estudaram outra falha ocorrida na planta “La Asturiana” onde, durante o comissionamento para operação de uma instalação de tratamento de efluentes, foi constatada uma situação de recalque diferencial acima dos limites estabelecidos em norma, o que levou a uma parada não programada da unidade. Após diversas análises de campo e modelagem computacional, foi constatado que os caminhos naturais de drenagem do solo sob a instalação foram bloqueados com a escavação e posterior preenchimento; com as primeiras chuvas, a água ficou retida na área. Durante o



preenchimento com concreto, areia e argila formaram uma mistura impermeabilizante na qual a água arrastou os componentes mais finos e nela ficou retida. Durante o carregamento das fundações, houve aumento da pressão do solo e deslocamento da água nele retida, produzindo o recalque mencionado.

### 3.3 FTT e Armazenamento

O FTT é um componente crítico da usina termosolar. Seu aprimoramento e evolução dos métodos de transferência de ET aumentam a eficiência global da planta. Li; Wu (2015), utilizando simulação numérica, analisaram diversas configurações de permutadores casco e tubos, materiais de mudança de fase, incluindo  $\text{NaNO}_3$  puro e um composto  $\text{NaNO}_3$ / grafite expandida e os FTT óleo sintético e sais fundidos, demonstrando que permutadores aletados, o FTT composto e sais fundidos aumentam a eficiência do sistema.

Coco-Enríquez et al. (2017a, 2017b) propuseram um ciclo duplo contando com os FTT *Downtherm A* (óleo) e sal solar (60% $\text{NaNO}_3$  e 40% $\text{KNO}_3$ ) em coletores solares parabólicos ou lineares Fresnel acoplados a um ciclo Brayton supercrítico de  $\text{CO}_2$ , que visa aproveitar as vantagens dos dois FFT - o primeiro, menor ação corrosiva sobre as tubulações e disponibilidade de equipamentos; o segundo maior temperatura de operação, chegando a 550°C e mitigar as desvantagens – o primeiro alcança apenas 400°C e o segundo solidifica em apenas 220°C, requerendo aquecimento em tubos e equipamentos para mantê-lo fundido, assim como etano, Xe,  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2$  como alternativas ao  $\text{CO}_2$  como fluido supercrítico, sendo o último confirmado como único capaz de oferecer aumento de eficiência quando considerado o aumento da pressão de entrada na turbina.

Em ordem de buscar alternativas que atinjam maiores temperaturas de operação, de 600°C a pelo menos 1000°C e, por consequência, maior eficiência nos processos de conversão de energia, Wang et al. (2017), apresentaram uma avaliação experimental de um receptor de quartzo com partículas sólidas da energia térmica solar concentrada.

Um método numérico baseada em uma abordagem euleriana foi desenvolvido por Kristiawan et al. (2018) para estudar a influência de nanopartículas e do número de Reynolds na transferência de calor de um nanofluido baseado em dióxido de titânio e água durante o escoamento em um trecho horizontal, donde foi verificado que o aumento da carga de nanopartículas aumenta a eficiência da transferência de ET, com destaque para o aumento da eficiência com escoamento turbulento com a carga de 1,28%, caso que diverge dos demais casos, onde o escoamento laminar favorece a transferência de ET.

Considerando que o FTT baseado nanopartículas é mais eficiente que os fluidos tradicionais como corroboram dados experimentais, Visconti et al. (2016) projetaram um sistema de medição e controle de uma planta termosolar de forma a maximizar sua eficiência e economizar energia.

Ao comparar dois métodos de controle (proporcional-integral-derivativo – PID e splines de regressão adaptativa multivariável - MARS) para a temperatura do FTT de uma planta termosolar que opera segundo o ciclo Rankine, Rogada et al. (2018), mostraram que a técnica de mineração de dados aliada ao MARS pode ser um método adequado de controle.

Araújo; Medina T. (2018) apresentaram um modelo matemático simples, flexível e de baixo custo computacional, validado por dados publicados de duas usinas termosolares, para avaliar a perda de calor para o ambiente em tanques de armazenamento de calor sensível em sal solar de uma planta termosolar de calor concentrado devido a INSD, temperatura ambiente e velocidade do vento.

A utilização de tanques termoclinos de armazenamento simultâneo de calor sensível e latente é mais barato que a alternativa clássica de dois tanques, mas sua implantação enfrenta dificuldades com sua integridade estrutural. González et al. (2016) desenvolveram uma plataforma de simulação numérica capaz de avaliar os impactos térmicos e mecânicos sobre a operação normal da planta.

O hidreto de magnésio é uma alternativa para armazenamento de energia em plantas termosolares devido à alta entalpia das reações de hidrogenação e desidrogenação. Perejón et al. (2016) desenvolveram um método de análise cinética combinada para previsão do comportamento de desidrogenação sob diferentes condições de pressão e temperatura.

Echániz et al. (2016) obtiveram o espectro de emissividade térmica na faixa do infravermelho para uma faixa de temperaturas entre 225 e 320°C para uma liga eutética Mg-51%Zn, com vistas a sua avaliação como candidato à armazenagem térmica.

Sun et al. (2018) empregaram os rejeitos normalmente não aproveitáveis da produção de sílica-gel como base para a síntese em escala industrial de polietilenoglicol estabilizado/ silício hidroxila.

De forma a reduzir custos de armazenagem em plantas termosolares, visando a aplicação com as condições solares do Atacama, no Chile, Parrado et al. (2016) propuseram um substituto para o sal solar composto por 48%Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>+7%NaNO<sub>3</sub>+45%KNO<sub>3</sub>. Fernández et al. (2017) avaliaram as características físico-químicas do Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> e LiNO<sub>3</sub> como aditivos ao sal solar, mostrando que estes melhoram a estabilidade do sal em altas temperaturas, mas aumentam o custo final ao substituir o NaNO<sub>3</sub>, que aumenta a viscosidade da mistura.

De forma a mitigar eventuais impactos ambientais negativos sem prejuízos à eficiência da planta termosolar, Silva et al. (2019) propuseram um novo nanocompósito baseado nos poliésteres biodegradáveis Poli(e-caprolactona) (PCL), Poli(3-hidroxi-butarato) (P-3-HB) ou suas combinações com Poli(etileno-óxido) (PEO) embutidos em nanoporos de grafite natural termicamente expandida

como material de mudança de fase sólido-líquido. As avaliações realizadas através da análise espectroscópica infravermelha por Transformada de Fourier, análise termogravimétrica e calorimetria por varredura diferencial, mostrando que há estabilidade térmica e na capacidade de armazenamento de calor latente, tornando-o adequado para sistemas de armazenagem de baixa e média temperaturas, como sistemas de aquecimento de ar, de água, estufas etc.

### 3.4 Revestimento

López-Herraiz et al. (2017) apresentaram um estudo abrangente das propriedades óticas (absorvidade e emissividade) de diferentes revestimentos solar-seletivos e não-seletivos e os comparou com o revestimento comercial normalmente utilizados.

A síntese de pigmentos à base de argila pilarizada a partir da síntese de sais metálicos como componentes da formulação de revestimentos para absorção solar são propostos por Micó-Vicent; López-Herraiz; et al. (2017) em substituição ao revestimento comercial tradicional.

A utilização por Micó-Vicent; López; et al. (2017) nanocompósitos sintetizados a partir de açúcar, encontrando resultados promissores quando intercalado e calcinado em uma estrutura laminar de montmorillonita, um tipo de argila esmectita. Os pigmentos foram testados em forma de tinta em cupons metálicos a diferentes temperaturas, obtendo uma absorvidade acima de 96% de absorbância depois de 24h a 700°C.

Escobar-Galindo et al. (2018) e Heras et al. (2018) propuseram e estudaram revestimentos solar-seletivos para alta temperatura baseados em oxinitritos de alumínio e titânio, incluindo a caracterização com respeito à composição, morfologia, fase e microestrutura e, após simulação da operação, encontraram em duas alternativas testadas o potencial para operação até 600°C.

### 3.5 Riscos Ambientais

Apesar do impacto ambiental positivo pela utilização da energia termosolar ao reduzir a emissão de gases de efeito estufa, no entanto, esta não está isenta de gerar impactos ambientais. Segundo Rudman et al. (2016), para usufruir os impactos sócio-econômicos da eventual instalação de uma usina termosolar na África do Sul, a saber, a geração de empregos, a disponibilidade de energia elétrica de menor pegada ecológica, é necessário analisar os impactos ambientais ao solo, à biodiversidade, ao ar e à águas da região.

Através de revisão bibliográfica, Otieno; Loosen (2016) identificaram dezessete riscos sócio-ambientais na instalação de plantas termosolares, destacando os cinco mais representativos de acordo

com a classificação de seis especialistas – interrupção do fornecimento dos recursos hídricos locais, integridade física de espécies de aves, segurança e saúde dos trabalhadores, visual e comprometimento dos recursos recreacionais.

Ho (2016) elaborou uma revisão de estudos de casos de mortalidade de aves em instalações de usinas termosolares em cinco instalações localizadas nos Estados Unidos da América (três), Israel (uma) e Espanha (uma). As principais causas encontradas são as colisões com os heliostatos e queimaduras devido ao fluxo solar concentrado. Os resultados indicam que a taxa de mortalidade de aves em usinas termosolares é menor que as plantas movidas a combustíveis fósseis, mas maiores que as das plantas eólica e nuclear e são propostas medidas mitigatórias de dissuasão das aves através de meios acústicos, visuais, táteis e químicos e estratégias de mira do heliostatos que reduzam o fluxo solar enquanto estejam no modo de espera.

O último objetivo do estudo anterior encontrou desenvolvimento em Ho et al. (2017), onde, para avaliar os riscos à integridade física de aves migratórias na área das usinas termosolares, os autores desenvolveram um modelo de transferência de ET do fluxo de calor para as penas das aves ao longo da trajetória de voo sobre o espaço aéreo da usina com o objetivo de, ao combiná-lo com o modelo de performance da planta, identificar estratégias que conciliem a operação da planta de geração com a minimização dos riscos às aves.

Blanco-Moreno et al. (2017) apresentaram um método de biorremediação para um eventual vazamento para o solo do FTT constituído por uma mistura eutética de éter difenil e bifenil através da degradação por diferentes tipos de bactérias, obtendo uma opção bem efetiva para tal ocorrência.

### **3.6 Aquecimento de água**

Subsídios governamentais podem ter importante papel na disseminação de tecnologias referentes a energias renováveis. Giglio; Lamberts (2016) fizeram uma análise sobre o impacto dos subsídios para famílias de baixa renda brasileiras para instalação de sistemas solares de aquecimento residencial de água. Lenz et al. (2017) avaliaram garrafas PET, forro de PVC e latas de alumínio, mostrando as últimas o melhor resultado.

Como método de redução da utilização de combustível para sistema de aquecimento residencial de água na República da Eslováquia, Jobbágy et al. (2017) fizeram um estudo de retorno financeiro do custo da instalação, encontrando vinte e três anos, mesmo com subsídios governamentais.

Para aplicações de baixa temperatura (abaixo de 100°C), Strauss et al. (2015) apresentaram um conceito de coletor polimérico termosolar para operação em climas subtropicais o ano inteiro, alcançando absorvância de 90% do espectro solar com um revestimento de carbono preto em uma

placa de polimetacrilato de metila e baixa emissividade de corpo negro através de uma cobertura de poliéster. A característica hidrofóbica e autolimpante foi obtida através adição de uma película de nanopartículas de SiO<sub>2</sub>.

Diego-Ayala; Carrillo (2016) apresentaram uma análise térmica de uma placa solar plana para aquecimento de água, avaliada em condições reais, instalada em um sistema de termosifão com uso de bomba submersível sob condições de fluxo forçado, cuja utilização se mostrou interessante para aumento da eficiência e controle de temperatura.

Álvarez et al. (2016) apresentaram um algoritmo de controle híbrido (solar e gás natural) preditivo para sistemas de baixa temperatura para aplicações industriais.

### 3.7 Outros Usos

Além da geração de energia e aquecimento de água, há outras aplicações relevantes para a energia solar.

A pirólise solar mostra-se uma alternativa vantajosa à pirólise convencional no que tange à redução da emissão de CO<sub>2</sub> e produtos com maior poder calorífico, conforme Zeng et al. (2017), permitindo uma armazenagem de energia mais eficiente oriunda da biomassa, por exemplo. Serrano et al. (2019) compararam a pirólise de uma espécie de alcachofra feita em um reator que utiliza o calor excedente do sal solar e em um reator convencional de leito fixo, encontrando uma reação exotérmica na primeira e endotérmica na segunda.

Para aproveitar o calor que excede à capacidade da torre solar de uma usina termosolar, Marugán-Cruz et al. (2015) estudaram a possibilidade de direcioná-lo para uma segunda torre de absorção de um *chiller*, para produção de água gelada para sistema de resfriamento da população, gerando assim economia que pode chegar a 75% com este gasto em suas contas de energia elétrica.

López-Zavala et al. (2019) apresentaram uma planta de dessalinização e de resfriamento à absorção de LiBr/H<sub>2</sub>O de água, ativada por energia solar, permitindo fornecimento de água potável e gelada à população com baixo impacto ao meio ambiente.

Uma revisão bibliográfica de Beltrán; Rey (2017) demonstra os principais aspectos de um processo de oxidação, a ozonização fotocatalítica solar, para purificação de água para consumo.

Sistemas de aquecimento de ar podem ser implementados a partir da energia solar. Cuzminschi et al. (2018) apresentaram o projeto e a simulação em CFD de um aquecedor de ar solar que pode ser utilizado em ambientes fechados, estufas e manutenção da temperatura em edifícios, por exemplo.

Visando reduzir a emissão de gases de efeito estufa oriundo da queima de combustíveis fósseis em processos de calcinação de minerais, Haneklaus et al. (2017) desenvolveram um sistema helicoidal tubo-a-tubo que utiliza o FTT de plantas termosolares.

#### 4. CONCLUSÃO

A energia do calor solar concentrado encerra um campo de pesquisa em franco desenvolvimento. A utilização desta fonte de energia ainda está muito aquém do seu potencial, tendo menor utilização que a energia fotovoltaica e de calor para aquecimento de água (REN21, 2019).

Cabem ainda melhorias em todos os sistemas das plantas termosolares, de maneira que possam se tornar mais eficientes. A utilização de modelos matemáticos termodinâmicos para realização de análise de viabilidade sócio-econômica-ambiental pode nortear políticas públicas e contribuir para melhorar a eficiência de plantas de geração.

A utilização de sistemas híbridos de geração, seja para redução do consumo de combustíveis fósseis ou para manutenção da operação da planta de geração em momentos de variação negativa ou falta de INSD pela combinação com outras energias renováveis também se mostra como forte tendência. O desenvolvimento de plantas que operem a temperaturas mais altas, da ordem de 1000°C, aumenta a eficiência da conversão eletromecânica da planta, aumentando a produção de energia elétrica.

A análise de falhas é útil para melhoria dos procedimentos de fabricação, construção & montagem e especificação de materiais, mas notam-se poucos trabalhos nessa área. Uma possível explicação para a baixa publicidade é a classificação deste tipo de ocorrência como assunto sigiloso. Cuidados com a fundação das instalações e com a corrosão mostram-se como as principais preocupações.

A absorção, transferência e armazenamento da energia térmica, seja em tanques ou no FTT, são etapas críticas em uma planta de geração termosolar. Desenvolver fluidos estáveis a altas temperaturas e de menor custo são imperativos para maior disseminação desta energia.

Revestimentos solar seletivos e não-seletivos mais eficientes, com pigmentos estáveis a altas temperaturas e com propriedades de emissividade e absorvidade adequadas, podem contribuir decisivamente para melhoria do processo de transferência de energia entre os coletores e o FTT.

O fato de a energia solar ser renovável não significa a ausência de impactos ambientais negativos. Impactos a pessoas, flora e fauna, sobretudo aves, deve ser levado em consideração. O

vazamento de FTT e efluentes e consequente contaminação do solo e águas subterrâneas devem ser levados em consideração, sendo necessária a implementação de medidas mitigatórias.

Apesar de não ser o foco principal deste trabalho, foram destacados os artigos relativos ao aquecimento de água, dada a sua importância e escala de uso no mundo, de cerca de 480GW<sub>th</sub> de capacidade instalada no mundo (REN, 2019). Sistemas mais eficientes ou de menores custos, devido à escala, geram grandes resultados absolutos.

Outros usos da energia solar excedente, tais como a dessalinização de água, que pode ser muito útil no sertão nordestino brasileiro, por exemplo, ou o resfriamento de água e o aquecimento de ar, por exemplo, pode aumentar a qualidade de vida da população a um menor custo e ainda reduzir a demanda de energia elétrica. A pirólise de biomassa, por exemplo, pode levar a um maior aproveitamento da energia deste, contribuindo mesmo para um sistema termosolar híbrido. A redução de consumo de energia e emissão de CO<sub>2</sub> em processos de calcinação é outro ganho esperado com a utilização da energia solar.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUILAR-JIMÉNEZ, J. A.; VELÁZQUEZ, N.; ACUÑA, A.; et al. Techno-economic analysis of a hybrid PV-CSP system with thermal energy storage applied to isolated microgrids. **Solar Energy**, v. 174, p. 55–65, 2018. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X18308478>>. Acesso em: 25/7/2019.

ÁLVAREZ, J. D.; PASAMONTES, M.; GUZMÁN, J. L.; CAMACHO, E. F. A practical hybrid predictive control algorithm for a low-temperature thermosolar plant. **Optimal Control Applications and Methods**, v. 37, n. 3, p. 508–520, 2016. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/oca.2139>>. Acesso em: 25/7/2019.

ANEEL. Capacidade de Geração do Brasil. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 3/8/2019.

ARAÚJO, A. K. A.; MEDINA T., G. I. Analysis of the effects of climatic conditions, loading level and operating temperature on the heat losses of two-tank thermal storage systems in CSP. **Solar Energy**, v. 176, p. 358–369, 2018. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X18310004>>. Acesso em: 25/7/2019.

AUDIGIÉ, P.; ENCINAS-SÁNCHEZ, V.; JUEZ-LORENZO, M.; et al. High temperature molten salt corrosion behavior of aluminide and nickel-aluminide coatings for heat storage in concentrated solar power plants. **Surface and Coatings Technology**, v. 349, p. 1148–1157, 2018. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897218306522>>. Acesso em: 25/7/2019.

BACHILLER, R. EL SOL: NUESTRA ESTRELLA, NUESTRA ENERGÍA. , p. 12, 2009. Disponível em: <<http://astronomia.ign.es/rknowsys-theme/images/webAstro/paginas/documentos/Anuario/elsolnuestraestrella.pdf>>. .

BELTRÁN, F. J.; REY, A. Solar or UVA-Visible Photocatalytic Ozonation of Water Contaminants. **Molecules**, v. 22, n. 7, p. 1177, 2017. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1420-3049/22/7/1177>>. Acesso em: 25/7/2019.

BLANCO-MORENO, R.; SÁEZ, L. P.; LUQUE-ALMAGRO, V. M.; ROLDÁN, M. D.; MORENO-VIVIÁN, C. Isolation of bacterial strains able to degrade biphenyl, diphenyl ether and the heat transfer fluid used in thermo-solar plants. **New Biotechnology**, v. 35, p. 35–41, 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1871678416325730>>. Acesso em: 25/7/2019.

BONILLA, J.; ROCA, L. Model validation and control strategy of a heat recovery system integrated in a renewable hybrid power plant demonstrator. **Solar Energy**, v. 176, p. 698–708, 2018. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X18310557>>. Acesso em: 25/7/2019.

COCO-ENRÍQUEZ, L.; MUÑOZ-ANTÓN, J.; MARTÍNEZ-VAL, J. M. New text comparison between CO<sub>2</sub> and other supercritical working fluids (ethane, Xe, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>) in line- focusing solar power plants coupled to supercritical Brayton power cycles. **International Journal of Hydrogen Energy**, Special Issue on The 4th European Conference on Renewable Energy Systems (ECRES 2016), 28-31 August 2016, Istanbul, Turkey., v. 42, n. 28, p. 17611–17631, 2017a. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319917305463>>. Acesso em: 25/7/2019.

COCO-ENRÍQUEZ, L.; MUÑOZ-ANTÓN, J.; MARTÍNEZ-VAL, J. M. Dual Loop line-focusing solar power plants with supercritical Brayton power cycles. **International Journal of Hydrogen Energy**, Special Issue on The 4th European Conference on Renewable Energy Systems (ECRES



2016), 28-31 August 2016, Istanbul, Turkey., v. 42, n. 28, p. 17664–17680, 2017b. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319916336758>>. Acesso em: 25/7/2019.

COLMENAR-SANTOS, A.; BONILLA-GÓMEZ, J.-L.; BORGE-DIEZ, D.; CASTRO-GIL, M. Hybridization of concentrated solar power plants with biogas production systems as an alternative to premiums: The case of Spain. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 47, p. 186–197, 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115002142>>. Acesso em: 25/7/2019.

CUZMINSCHI, M.; GHERASIM, R.; GIRLEANU, V.; ZUBAREV, A.; STAMATIN, I. Innovative thermo-solar air heater. **Energy and Buildings**, v. 158, p. 964–970, 2018. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778816318497>>. Acesso em: 25/7/2019.

DABWAN, Y. N.; MOKHEIMER, E. M. A. Optimal integration of linear Fresnel reflector with gas turbine cogeneration power plant. **Energy Conversion and Management**, v. 148, p. 830–843, 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890417306052>>. Acesso em: 25/7/2019.

DIEGO-AYALA, U.; CARRILLO, J. G. Evaluation of temperature and efficiency in relation to mass flow on a solar flat plate collector in Mexico. **Renewable Energy**, v. 96, p. 756–764, 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148116304384>>. Acesso em: 25/7/2019.

DURANTE, A.; PENA-VERGARA, G.; CURTO-RISSO, P. L.; MEDINA, A.; CALVO HERNÁNDEZ, A. Thermodynamic simulation of a multi-step externally fired gas turbine powered by biomass. **Energy Conversion and Management**, v. 140, p. 182–191, 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890417301553>>. Acesso em: 25/7/2019.

ECHÁNIZ, T.; PÉREZ-SÁEZ, R. B.; RISUEÑO, E.; et al. Thermal emissivity spectra and structural phase transitions of the eutectic Mg-51%Zn alloy: A candidate for thermal energy storage. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 684, p. 62–67, 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838816314827>>. Acesso em: 25/7/2019.

ESCOBAR-GALINDO, R.; GUILLÉN, E.; HERAS, I.; et al. Design of high-temperature solar-selective coatings based on aluminium titanium oxynitrides  $\text{Al}_y\text{Ti}_{1-y}(\text{O}_x\text{N}_{1-x})$ . Part 2: Experimental validation and durability tests at high temperature. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 185, p. 183–191, 2018. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024818302034>>. Acesso em: 25/7/2019.

FERNÁNDEZ, Á. G.; VELIZ, S.; FUENTEALBA, E.; GALLEGUILLOS, H. Thermal characterization of solar salts from north of Chile and variations of their properties over time at high temperature. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 128, n. 3, p. 1241–1249, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10973-016-6037-y>>. Acesso em: 25/7/2019.

FERNÁNDEZ-LEÓN, M.; PACHECO, G.; BOLINAGA, B.; et al. Solar thermal energy predictability for the grid (STEP4Grid). **AIP Conference Proceedings**, v. 1734, n. 1, p. 080001, 2016. Disponível em: <<https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4949181>>. Acesso em: 25/7/2019.

GIGLIO, T.; LAMBERTS, R. Savings related to solar water heating system: A case study of low-income families in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 130, p. 434–442, 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778816307836>>. Acesso em: 25/7/2019.

GONZÁLEZ, I.; PÉREZ-SEGARRA, C. D.; LEHMKUHL, O.; TORRAS, S.; OLIVA, A. Thermo-mechanical parametric analysis of packed-bed thermocline energy storage tanks. **Applied Energy**, v. 179, p. 1106–1122, 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261916308996>>. Acesso em: 25/7/2019.

GONZÁLEZ-NICIEZA, C.; ORDIALES-MARTÍNEZ, V.; LAÍN-HUERTA, R.; LAÍN-HUERTA, C.; ÁLVAREZ-FERNÁNDEZ, M. I. Failure analysis of a cracked concrete pipe in a 50MW thermosolar power plant. **Engineering Failure Analysis**, v. 79, p. 656–671, 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350630716306343>>. Acesso em: 25/7/2019.

HANEKLAUS, N.; ZHENG, Y.; ALLELEIN, H.-J. Stop Smoking—Tube-In-Tube Helical System for Flameless Calcination of Minerals. **Processes**, v. 5, n. 4, p. 67, 2017. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2227-9717/5/4/67>>. Acesso em: 25/7/2019.

HERAS, I.; GUILLÉN, E.; LUNGWITZ, F.; et al. Design of high-temperature solar-selective coatings based on aluminium titanium oxynitrides  $\text{Al}_y\text{Ti}_{1-y}(\text{OxN}_{1-x})$ . Part 1: Advanced microstructural characterization and optical simulation. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 176, p. 81–92, 2018. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024817305858>>. Acesso em: 25/7/2019.

HO, C. K. Review of avian mortality studies at concentrating solar power plants. **AIP Conference Proceedings**, v. 1734, n. 1, p. 070017, 2016. Disponível em: <<https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4949164>>. Acesso em: 25/7/2019.

HO, C. K.; WENDELIN, T.; HORSTMAN, L.; YELLOWHAIR, J. A method to assess flux hazards at CSP plants to reduce avian mortality. **AIP Conference Proceedings**, v. 1850, n. 1, p. 030026, 2017. Disponível em: <<https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4984369>>. Acesso em: 26/7/2019.

JOBBÁGY, J.; KRIŠTOF, K.; FINDURA, P.; URBANOVIČOVÁ, O.; KRIŽAN, M. The Utilisation of Solar System in Combined Heating System of Water. **Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis**, v. 65, n. 1, p. 41–50, 2017. Disponível em: <<https://acta.mendelu.cz/65/1/41/>>. Acesso em: 25/7/2019.

KASSEM, A.; AL-HADDAD, K.; KOMLJENOVIC, D. Concentrated solar thermal power in Saudi Arabia: Definition and simulation of alternative scenarios. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 80, p. 75–91, 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211730802X>>. Acesso em: 25/7/2019.

KRISTIAWAN, B.; SANTOSO, B.; WIJAYANTA, A. T.; AZIZ, M.; MIYAZAKI, T. Heat Transfer Enhancement of  $\text{TiO}_2$ /Water Nanofluid at Laminar and Turbulent Flows: A Numerical Approach for Evaluating the Effect of Nanoparticle Loadings. **Energies**, v. 11, n. 6, p. 1584, 2018. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/11/6/1584>>. Acesso em: 25/7/2019.

LENZ, A. M.; COLLE, G.; DE SOUZA, S. N. M.; et al. Evaluation of three systems of solar thermal panel using low cost material, tested in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 167, p. 201–207, 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617318784>>. Acesso em: 25/7/2019.

LI, Z.; WU, Z.-G. Analysis of HTFs, PCMs and fins effects on the thermal performance of shell–tube thermal energy storage units. **Solar Energy**, v. 122, p. 382–395, 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X15005034>>. Acesso em: 25/7/2019.

LÓPEZ-HERRAIZ, M.; FERNÁNDEZ, A. B.; MARTINEZ, N.; GALLAS, M. Effect of the optical properties of the coating of a concentrated solar power central receiver on its thermal efficiency. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 159, p. 66–72, 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024816303221>>. Acesso em: 25/7/2019.

LÓPEZ-ZAVALA, R.; VELÁZQUEZ-LIMÓN, N.; GONZÁLEZ-URIBE, L. A.; et al. A novel LiBr/H<sub>2</sub>O absorption cooling and desalination system with three pressure levels. **International Journal of Refrigeration**, v. 99, p. 469–478, 2019. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140700719300039>>. Acesso em: 25/7/2019.

MARUGÁN-CRUZ, C.; SÁNCHEZ-DELGADO, S.; RODRÍGUEZ-SÁNCHEZ, M. R.; VENEGAS, M.; SANTANA, D. District cooling network connected to a solar power tower. **Applied Thermal Engineering**, v. 79, p. 174–183, 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135943111500037X>>. Acesso em: 25/7/2019.

MERCHÁN, R. P.; SANTOS, M. J.; MEDINA, A.; CALVO HERNÁNDEZ, A. Thermodynamic model of a hybrid Brayton thermosolar plant. **Renewable Energy**, Exergy analysis of renewable energy systems., v. 128, p. 473–483, 2018. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148117304755>>. Acesso em: 25/7/2019.

MERCHÁN, R. P.; SANTOS, M. J.; REYES-RAMÍREZ, I.; MEDINA, A.; CALVO HERNÁNDEZ, A. Modeling hybrid solar gas-turbine power plants: Thermodynamic projection of annual performance and emissions. **Energy Conversion and Management**, v. 134, p. 314–326, 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890416311372>>. Acesso em: 25/7/2019.

MICÓ-VICENT, B.; LÓPEZ, M.; BELLO, A.; MARTÍNEZ, N.; MARTÍNEZ-VERDÚ, F. Optimum Multilayer-Graphene-Montmorillonite Composites From Sugar for Thermosolar Coatings Formulations. **Journal of Solar Energy Engineering**, v. 139, n. 3, p. 031005-031005–7, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1115/1.4035757>>. Acesso em: 25/7/2019.

MICÓ-VICENT, B.; LÓPEZ-HERRAIZ, M.; BELLO, A.; MARTÍNEZ, N.; MARTÍNEZ-VERDÚ, F. M. Synthesis of pillared clays from metallic salts as pigments for thermosolar absorptive coatings. **Solar Energy**, v. 155, p. 314–322, 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X1730539X>>. Acesso em: 25/7/2019.

OLIVENZA-LEÓN, D.; MEDINA, A.; CALVO HERNÁNDEZ, A. Thermodynamic modeling of a hybrid solar gas-turbine power plant. **Energy Conversion and Management**, v. 93, p. 435–447, 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S019689041500031X>>. Acesso em: 25/7/2019.

OLMEDO-TORRE, N.; CANALS CASALS, L.; AMANTE GARCÍA, B. Sustainable design of a thermosolar electricity generation power plant in Burkina Faso. **Journal of Environmental Management**, v. 226, p. 428–436, 2018. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479718309149>>. Acesso em: 25/7/2019.

OLSEN, M. L.; REA, J.; GLATZMAIER, G. C.; et al. Solar thermoelectricity via advanced latent heat storage. **AIP Conference Proceedings**, v. 1734, n. 1, p. 050035, 2016. Disponível em: <<https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4949133>>. Acesso em: 25/7/2019.

ORDIALES MARTINEZ, V.; ALVAREZ FERNÁNDEZ, M. I.; GONZÁLEZ NICIEZA, C. Failure analysis of subsidence in an effluent treatment plant in a thermosolar power plant. **Engineering Failure Analysis**, v. 91, p. 419–432, 2018. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135063071731378X>>. Acesso em: 25/7/2019.

OTIENO, G. A.; LOOSEN, A. E. An analysis of key environmental and social risks in the development of concentrated solar power projects. **AIP Conference Proceedings**, v. 1734, n. 1, p. 160012, 2016. Disponível em: <<https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4949253>>. Acesso em: 25/7/2019.

PARRADO, C.; MARZO, A.; FUENTEALBA, E.; FERNÁNDEZ, A. G. 2050 LCOE improvement using new molten salts for thermal energy storage in CSP plants. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 57, p. 505–514, 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115015312>>. Acesso em: 25/7/2019.

PEREJÓN, A.; SÁNCHEZ-JIMÉNEZ, P. E.; CRIADO, J. M.; PÉREZ-MAQUEDA, L. A. Magnesium hydride for energy storage applications: The kinetics of dehydrogenation under different working conditions. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 681, p. 571–579, 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838816310519>>. Acesso em: 25/7/2019.

PETERSEIM, J. H.; VISCUSO, L.; HELLWIG, U.; MCINTYRE, P. Large capacity, multi-fuel, and high temperature working fluid heaters to optimize CSP plant cost, complexity and annual generation. **AIP Conference Proceedings**, v. 1734, n. 1, p. 060003, 2016. Disponível em: <<https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4949145>>. Acesso em: 25/7/2019.

PIÑA-ORTIZ, A.; HINOJOSA, J. F.; PÉREZ-ENCISO, R. A.; et al. Thermal analysis of a finned receiver for a central tower solar system. **Renewable Energy**, v. 131, p. 1002–1012, 2019. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148118309200>>. Acesso em: 25/7/2019.

PRIETO, C.; GALLARDO-GONZÁLEZ, J.; RUIZ-CABAÑAS, F. J.; et al. Study of corrosion by Dynamic Gravimetric Analysis (DGA) methodology. Influence of chloride content in solar salt. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 157, p. 526–532, 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024816302628>>. Acesso em: 25/7/2019.

RECH, S.; LAZZARETTO, A.; GRIGOLON, E. Optimum integration of concentrating solar technologies in a real coal-fired power plant for fuel saving. **Energy Conversion and Management**, v. 178, p. 299–310, 2018. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890418311257>>. Acesso em: 25/7/2019.

REN21. Renewables Energy: Global Status Report. , 2019. Disponível em: <<https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/28496/REN2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 21/7/2019.

ROGADA, J. R.; BARCIA, L. A.; MARTINEZ, J. A.; MENENDEZ, M.; DE COS JUEZ, F. J. Comparative Modeling of a Parabolic Trough Collectors Solar Power Plant with MARS Models. **Energies**, v. 11, n. 1, p. 37, 2018. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/11/1/37>>. Acesso em: 25/7/2019.

RUDMAN, J.; GAUCHÉ, P.; ESLER, K. J. Initial review and analysis of the direct environmental impacts of CSP in the northern Cape, South Africa. **AIP Conference Proceedings**, v. 1734, n. 1, p. 160015, 2016. Disponível em: <<https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4949256>>. Acesso em: 26/7/2019.

RUIZ-CABAÑAS, F. J.; JOVÉ, A.; PRIETO, C.; et al. Materials selection of steam-phase change material (PCM) heat exchanger for thermal energy storage systems in direct steam generation facilities. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 159, p. 526–535, 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024816304202>>. Acesso em: 25/7/2019.

SAHOO, U.; KUMAR, R.; PANT, P. C.; CHAUDHARY, R. Resource assessment for hybrid solar-biomass power plant and its thermodynamic evaluation in India. **Solar Energy**, v. 139, p. 47–57, 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X16304315>>. Acesso em: 25/7/2019.

SÁNCHEZ-ORGAZ, S.; PEDEMONTE, M.; EZZATTI, P.; et al. Multi-objective optimization of a multi-step solar-driven Brayton plant. **Energy Conversion and Management**, v. 99, p. 346–358, 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890415004410>>. Acesso em: 25/7/2019.

SERRANO, D.; HORVAT, A.; SOBRINO, C.; SÁNCHEZ-DELGADO, S. Thermochemical conversion of *C. cardunculus* L. in nitrate molten salts. **Applied Thermal Engineering**, v. 148, p. 136–146, 2019. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431118347069>>. Acesso em: 25/7/2019.

SILVA, V. O.; LIMA, T. B. S.; AQUINO, K. A. S.; et al. Improving Thermosolar Energy Storage with Biodegradable Polyester Nanocomposite Phase Change Materials. **Macromolecular Symposia**, v. 383, n. 1, p. 1800047, 2019. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/masy.201800047>>. Acesso em: 25/7/2019.

STRAUSS, J. A.; SOAVE, P. A.; RIBEIRO, R. S.; HOROWITZ, F. Absorber and self-cleaning surfaces on modified polymer plates for solar harvesting in the humid (sub)tropics. **Solar Energy**, v.

122, p. 579–586, 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X15005046>>. Acesso em: 25/7/2019.

SUN, K.; KOU, Y.; ZHENG, H.; et al. Using silicagel industrial wastes to synthesize polyethylene glycol/silica-hydroxyl form-stable phase change materials for thermal energy storage applications. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 178, p. 139–145, 2018. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024818300163>>. Acesso em: 25/7/2019.

TORRES-ROLDÁN, M.; LÓPEZ-LUQUE, R.; VARO-MARTÍNEZ, M. Design of an innovative and simplified polar heliostat for integration in buildings and urban environments. **Solar Energy**, v. 119, p. 159–168, 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X15003497>>. Acesso em: 25/7/2019.

VENTAS, R.; LECUONA, A.; VEREDA, C.; RODRIGUEZ-HIDALGO, M. C. Performance analysis of an absorption double-effect cycle for power and cold generation using ammonia/lithium nitrate. **Applied Thermal Engineering**, v. 115, p. 256–266, 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431116343460>>. Acesso em: 25/7/2019.

VISCONTI, P.; PRIMICERI, P.; CONSTANTINI, P. C.; COLANGELO, G.; CAVALERA, G. Measurement and control system for thermosolar plant and performance comparison between traditional and nanofluid solar thermal collectors. **INTERNATIONAL JOURNAL ON SMART SENSING AND INTELLIGENT SYSTEMS**, v. 9, n. 3, p. 1220–1242, 2016. Disponível em: <<https://s2is.org/Issues/v9/n3/papers/paper3.pdf>>.

WANG, T.; BAI, F.; CHU, S.; ZHANG, X.; WANG, Z. Experiment study of a quartz tube falling particle receiver. **Frontiers in Energy**, v. 11, n. 4, p. 472–479, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11708-017-0502-6>>. Acesso em: 25/7/2019.

ZEMAN, M. SEMICONDUCTOR MATERIALS FOR SOLAR CELLS. **SOLAR CELLS**. p.3.1-3.27, 2016. Delft University of Technology. Disponível em: <[https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/Solar-Cells-R3-CH3\\_Solar\\_cell\\_materials.pdf](https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/Solar-Cells-R3-CH3_Solar_cell_materials.pdf)>. Acesso em: 21/7/2019.



ZENG, K.; GAUTHIER, D.; SORIA, J.; MAZZA, G.; FLAMANT, G. Solar pyrolysis of carbonaceous feedstocks: A review. **Solar Energy**, Advances in Solar Thermochemistry., v. 156, p. 73–92, 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X17304103>>. Acesso em: 25/7/2019.

### ARTIGO CIENTÍFICO 3

## ÍMÃS DE TERRAS RARAS E ENERGIAS RENOVÁVEIS: DESAFIOS TECNOLÓGICOS E PROPOSTA DE REGULAÇÃO

### *RARE EARTH MAGNETS AND RENEWABLE ENERGY: TECHNOLOGICAL CHALLENGES AND PROPOSAL FOR A REGULATION*

Fabiano Baldez da Costa Brito - IFFluminense/PPEA

Marcos Antonio Cruz Moreira - IFFluminense/PPEA

Augusto Eduardo Miranda Pinto - IFFluminense/PPEA

Severino Joaquim Correia Neto - IFFluminense

Eurico Huziwara - UNESA

### RESUMO

A aderência de uma nação à Agenda 2030 da ONU implica na busca da utilização de energias renováveis em sua matriz energética. Excetuando-se a energia hidrelétrica, as energias eólica (EE) e fotovoltaica têm dominado o mercado brasileiro. Um fator determinante para o salto tecnológico que permitiu à EE rivalizar em custo com a energia hidrelétrica foram os superímãs (SI) de terras-raras (TR). No entanto, a despeito de possuir a 2ª maior reserva mundial de TR, o Brasil possui produção inexpressiva e não detém tecnologia para produção de SI. Este trabalho visa apresentar a avaliação do potencial de geração de energia através do aproveitamento do Nd para fabricação de SI, considerando os dados disponíveis para as reservas de Araxá/MG e a extrapolação de dados de uma máquina vernier. A análise indica o potencial de produção de 2,8Mton de Nd, equivalente a um potencial de geração da ordem de  $2,168 \times 10^3$ GW, mostrando-se viável a utilização das reservas de TR para esse fim. Sugere-se a adoção de políticas públicas no país para restringir a exportação de minério *in natura* e priorizar a produção de SI para geração de energia, através da criação de um fundo público-privado com prazo determinado, através de percentual da Cfem a determinar.

**Palavras-chave:** Superímãs. Terras-raras. Regulação.

### ABSTRACT

*The adherence of a nation to the UN Agenda 2030 implies the search for the use of renewable energies in its energy matrix. Except for hydropower, wind and photovoltaics have dominated the Brazilian*

market. A determining factor for the technological leap that allowed the wind to compete in cost with hydroelectric power was the rare earth (RE) super magnets (SM). However, despite having the 2nd largest world RE reserve, Brazil has inexpensive production and does not have the technology for the SM production. This work aims to present the evaluation of the potential of energy generation using SM based machines, considering the data available for the reserves of Araxá/ MG and the extrapolation of data from a vernier machine. The analysis indicates the production potential of 2.8Mton of Nd, equivalent to a generation potential of the order of  $2,168 \times 10^3 \text{GW}$ , proofing viable the use of TR reserves for this purpose. It is suggested to adopt federal public policies to restrict the export of fresh ore and prioritize the SM production for energy generation, through the creation of a public-private fund with a fixed term, through a percentage of Cfem to be determined.

**Keywords:** Super magnets. Rare earths. Regulation.

## 1. INTRODUÇÃO

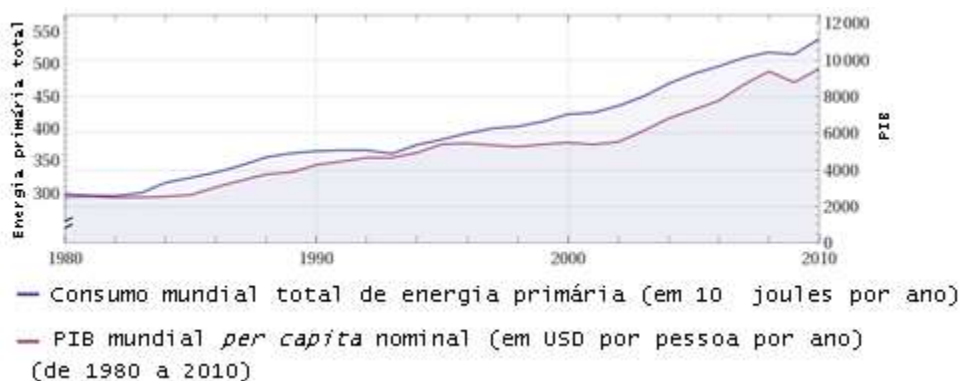
O crescimento do PIB – Produto Interno Bruto – *per capita* mundial a partir da crise econômica de 2008 aponta uma forte tendência de aumento da demanda por energia no mundo, conforme pode ser visto na Figura 1, o que traz sérias preocupações sobre o impacto ao meio ambiente. A Figura 2 apresenta o gráfico comparativo entre o consumo total de energia e o PIB *per capita* no período de 1980 a 2010, o que corrobora a relação entre estas duas variáveis.

Figura 1 – Produto Interno Bruto *per capita* mundial – 2007 - 2017



Fonte: Banco Mundial, calculado pelo Wolfram Alpha, adaptado pelos Autores (2019)

Figura 2 – Consumo de energia e PIB *per capita* nominal mundiais - 1980 a 2010



Fonte: Banco Mundial, calculado pelo Wolfram Alpha, adaptado pelos Autores (2019)

Para fazer jus à essa previsão de aumento da demanda, maior participação de fontes de energia renováveis na matriz energética mundial se torna um imperativo para que se busque um crescimento econômico ambientalmente sustentável. No Brasil, as fontes de energia renováveis correspondem a um total de 83,3% da matriz elétrica nacional (EPE, 2019). Ainda que o percentual apresentado seja superior à média de 22,8% dos países da OCDE (EIA, 2017), dada a assinatura da declaração de apoio ao Acordo de Paris pelo Brasil em 2018, será necessário aumentar significativamente o investimento neste setor nos próximos anos de forma a reduzir as emissões atmosféricas de gases de efeito estufa.

A conversão eletromecânica de energia através de máquinas dotadas de ímãs permanentes para produção em escala industrial se tornou possível após o desenvolvimento dos chamados superímãs de TR. A partir dos anos 1980, com o trabalho de Sagawa et al.(1984a,1984b), após intensas pesquisas em diversas instituições que visavam substituir os ímãs de Samário-Cobalto (SmCo), foram desenvolvidos os superímãs de neodímio (Nd), notadamente aqueles da família neodímio-ferro-boro (NdFeB). A utilização destes ímãs tornou competitiva, por exemplo, a produção de energia elétrica através de fontes eólicas, cujo custo de geração atual no Brasil é comparável à da energia hidrelétrica (GWEC, 2018), assim como a produção de veículos elétricos com alta eficiência e autonomia, como aqueles produzidos pela companhia automotiva Tesla, que recentemente liberou suas patentes, inclusive as dos motores elétricos a ímãs permanentes (AGRELA, 2019), entre outras aplicações.

A Lei de Lenz decorre da aplicação da Lei de Faraday-Maxwell para sistemas de geração, e enuncia que a força eletromotriz induzida em uma bobina é proporcional à derivada temporal do fluxo magnético. Na classe de máquinas elétricas a ímãs permanentes, esse fluxo é obtido através da variação da posição (rotação ou translação) ao longo do tempo de ímãs permanentes em relação a posição das bobinas coletoras, independentemente da configuração que cada máquina apresente. Esta movimentação pode advir de fontes motrizes diversas, renováveis (*e.g.* ventos, ondas, marés, biomassa, calor solar) ou não (combustão de derivados do petróleo, gás natural, carvão etc.), desde

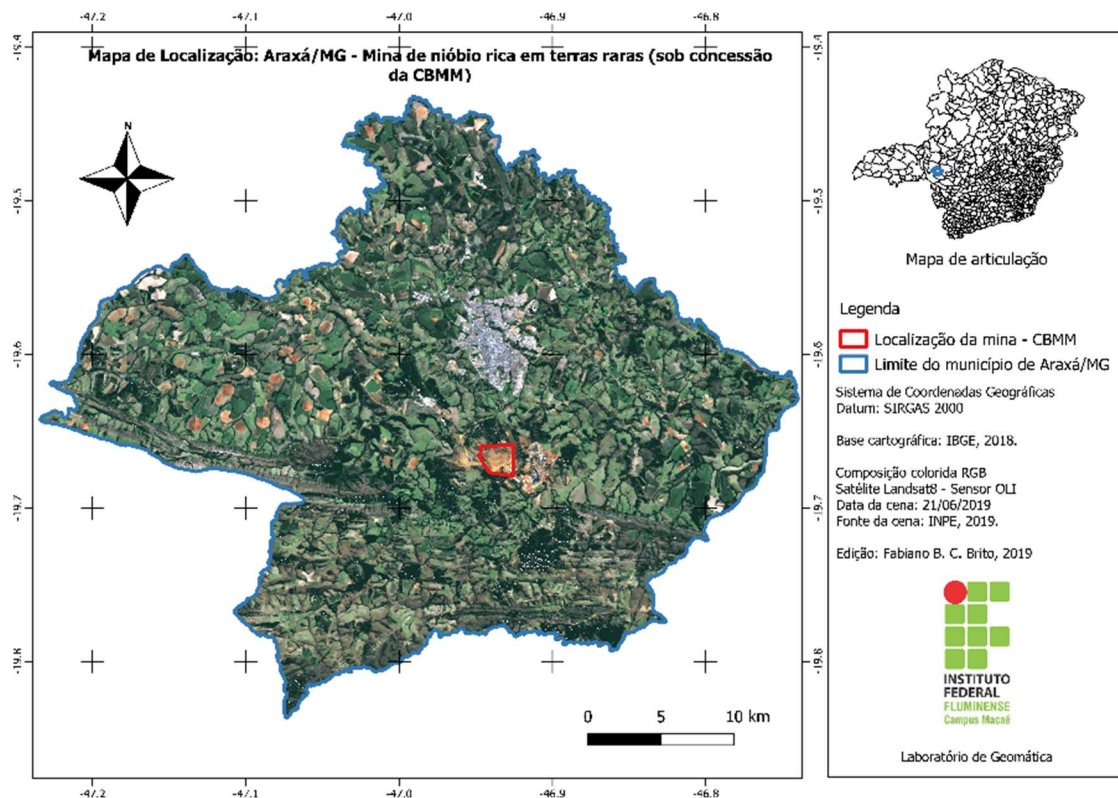
que compatíveis com as características elétrica e mecânica do gerador. Cabe destacar que o potencial de conversão de energia do gerador é limitado não somente por suas próprias características eletromecânicas, mas também pela disponibilidade e características da fonte primária.

Além disso, o avanço tecnológico e a implantação de marcos legais (BRASIL, 2004; ANEEL, 2012) permitiram a produção descentralizada de energia elétrica, inclusive em imóveis de pessoas físicas, seja na forma *offgrid*, sistemas de geração isolados da rede, podendo ou não possuir sistema local de armazenamento de energia em baterias, ou *ongrid* – aquela integrada ao SIN – Sistema Interligado Nacional, com forte destaque para a utilização de células fotovoltaicas (ANEEL, 2017). A popularização da geração nesta modalidade distribuída através de fontes renováveis diversas da fotovoltaica, tais como a eólica, a termosolar, aquelas oriundas do aproveitamento da energia ondomotriz - das ondas do mar - em diversas modalidades, entre outras, passa necessariamente pelo desenvolvimento tecnológico de máquinas elétricas a ímãs permanentes mais robustas e eficientes que permitam a produção de energia em escala industrial.

Dentre os diversos componentes deste tipo de máquina, o que possui menor disponibilidade em termos de quantidade e disseminação tecnológica no Brasil são os ímãs de Nd, sobretudo os da liga NdFeB. Trata-se de um componente crítico ao desenvolvimento e aplicação de toda a classe de máquinas elétricas rotativas e lineares a ímãs permanentes, tanto para fornecimento de força motriz de alta eficiência quanto para a conversão eletromecânica de energia, assim como para discos rígidos e alto-falantes de alto desempenho, por exemplo.

O Brasil possui a 2ª maior reserva de TR do mundo, junto com o Vietnã, ficando atrás apenas da China (USGS, 2019). O projeto em andamento com maior avanço no Brasil é o da CBMM – Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração, em mina localizada na cidade de Araxá, no estado de Minas Gerais (Figura 3), integrante do Complexo Carbonatítico do Barreiro, (PORTAL DA MINERAÇÃO, 2016). Há acumulações economicamente viáveis no Complexo Carbonatítico de Catalão I, localizado no estado de Goiás, sob concessão chinesa (PADILLA, GHALAYINI, PAPP, 2019), entre outras.

Figura 3 – Mapa de Localização: Araxá/MG – Mina de Nb rica em TR (sob concessão da CBMM)



Fonte: Autores (2019)

O processo geológico de enriquecimento de minerais de elementos de TR em formações de carbonatitos, como a da referida mina, são categorizadas como mineralização supergênica, que envolve o intemperismo profundo em ambientes tropicais. Nela, as intrusões de carbonita são importantes fontes de Nióbio, abrigado primariamente no pirocloro  $[(Na,Ca)_2Nb_2O_6(OH,F)]$  (PADILHA, 2019). Mais de 90% das reservas mundiais de nióbio vem dos depósitos de laterita de muitas centenas de metros de espessura do complexo de Barreiro (POHL, 2011).

As reservas provadas de óxidos de TR (OTR) do depósito de Araxá apontam 6,34 milhões de toneladas medidas (5,01% de OTR) e 21,94 milhões de toneladas estimadas (3,99% de OTR) (MBAC, 2012), podendo em alguns casos ser superior a 12% (MBAC, 2012). O principal minério para este fim é a monazita, de fórmula  $[OTR, Th]PO_4$ , que representa 15% do total. O conteúdo de óxidos de didímio (Nd e Pr - praseodímio) é de 18,06% (MBAC, 2011).

Atualmente, a produção de TR no Brasil é praticamente inexpressiva em relação às suas reservas e com baixo impacto comercial, ocorrendo como rejeito sobretudo da produção de nióbio, em Araxá/MG (SOUSA, GUIMARÃES, BOTELHO, 2013; SENADO FEDERAL, 2013) (Figura 3). Esta posição contrasta com a chinesa, que possui a maior reserva provada de TR e foi responsável por 80% da produção mundial de TR (GAMBOGI, 2018). A China já havia anunciado que restringiria a exportação de TR em favor da exportação de ímãs (QI, QINGFEN, 2010), priorizando o produto de maior valor agregado. Recentemente, diante da chamada “Guerra Comercial” com os EUA, que

envolve a discussão sobre barreiras alfandegárias para o comércio entre os dois países, o governo chinês anunciou que proibiria a venda de TR aos países que impusessem restrição à importação de seus produtos (AGÊNCIA O GLOBO, 2019), o que virtualmente poderia paralisar a indústria dos países afetados. Estas incertezas políticas e comerciais fortalecem a tendência de aumento dos preços do minério, o que impacta diretamente em todas as linhas industriais dependentes deste insumo. Assim, a adoção de uma política de extração estratégica de TR e a obtenção da tecnologia de produção de superímãs pode se tornar um pilar para o desenvolvimento sustentável e para a soberania do país.

Diante desse cenário, este trabalho apresenta um estudo econômico referente à produção brasileira de TR, incluindo uma comparação entre as receitas potenciais do comércio do óxido de Nd (O.Nd), de fórmula  $Nd_2O_3$ , do Nd metálico e dos ímãs NdFeB virtualmente manufaturados, um método de avaliação do potencial de armazenamento de energia magnética destas reservas, caso seu uso fosse destinado exclusivamente à produção de ímãs para uso em máquinas elétricas, e, a partir dos resultados obtidos, uma proposta de marco legal para exploração deste tipo de recurso no país.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

A produção teórica total de ímãs de NdFeB ( $Q_{ímã}$ ) foi estimada a partir do conteúdo explotável da reserva de OTR do Complexo do Barreiro de Araxá/MG sob concessão da MBAC Fertilizer Corp., devido a maior quantidade de dados disponíveis (MBAC, 2012) e pela proximidade geográfica com projeto de desenvolvimento que está em andamento em conjunto entre CBMM e IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas (NETO et al., 2017). O cálculo foi efetuado através das Equações 1, 2, 3 e 4, e os dados consolidados são apresentados na Tabela 1.

$$\chi_{Nd} = \frac{2.M_{Nd}}{2.M_{Nd}+3.M_O} \text{ Equação 1,}$$

Onde  $M_{Nd}$  é a massa molecular do Nd e  $M_O$  é a massa molecular do Oxigênio (NCBI, 2004). Os índices foram extraídos diretamente da fórmula do O.Nd.

$$Q_{O.Nd} = Q_{OTR} \times \chi_{O.Nd} [\text{g}] \text{ Equação 2}$$

$$Q_{Nd} = Q_{O.Nd} \times \chi_{Nd_{O.Nd}} [\text{g}] \text{ Equação 3}$$

$$Q_{ímã} = Q_{Nd} / \chi_{Nd_{ímã}} [\text{g}] \text{ Equação 4}$$

Tabela 1 – Dados consolidados de produção potencial

Símbolo	Valores	Descrição	Fonte do dado
---------	---------	-----------	---------------

$Q_{OTR}$	$21,94 \times 10^{12}g$	Quantidade de OTR	MBAC (2012)
$Q_{O.Nd}$	$3,36 \times 10^{12}g$	Quantidade explotável de O.Nd	Autores (2019)
$\chi_{O.Nd}$	0,153	Taxa de O.Nd em $Q_{OTR}$	Sousa, Guimarães, Botelho (2013)
$Q_{Nd}$	$2,80 \times 10^{12}g$	Quantidade de Nd metálico	Autores (2019)
$\chi_{Nd_{O.Nd}}$	0,833	Fração mássica de Nd no O.Nd	Autores (2019)
$\chi_{Nd_{ímã}}$	0,3	Fração mássica de Nd no ímã	Gomes, Bardano, Nascimento (2015)
$Q_{ímã}$	$9,33 \times 10^{12}g$	Quantidade de ímãs produzíveis	Autores (2019)

Fonte: Autores (2019)

O potencial comercial da reserva supracitada foi estimado utilizando a Equação 5 e os dados das receitas obteníveis  $\mathfrak{R}_i$  com preço  $\wp_i$  de venda direta do estoque completo dos produtos, onde  $i$  representa O.Nd, Nd metálico ou os ímãs NdFeB N35 virtualmente fabricados, assim como o preço do carbonatito concentrado, apenas para fins de informação, visto que não foi possível obter o volume total, todos apresentados na Tabela 2. Não foram considerados os custos para a extração no caso em tela devido ao fato de que o Nd nestas reservas seria produzido a partir do rejeito da produção de nióbio, o que virtualmente o torna negativo para o caso em questão (PORTAL DA MINERAÇÃO, 2016) e para agregação de valor, pois, dado que a tecnologia não está plenamente desenvolvida (IPT, 2018), estes valores ainda não estão disponíveis. O preço dos ímãs foi calculado através da média aritmética simples segundo os dados (ALIEXPRESS, 2019a a 2019j) apresentados respectivamente na Tabela 2. Os dados foram selecionados de forma a contemplar lotes que garantissem a mínima distorção decorrente de vendas a varejo.

$$\mathfrak{R}_i = \wp_i \times Q_i \text{ [US\$]} \text{ Equação 5}$$

Tabela 2 – Tabela de cálculo de preço médio dos ímãs

Quantidade	Diâmetro	Altura	Preço (R\$)	Peso (kg)	US\$/kg
100	0.005	0.001	7.92	0.014726216	135.13
500	0.01	0.001	106.58	0.294524311	90.92
1000	0.003	0.003	65.19	0.159043128	102.99
100	0.022	0.002	112.59	0.570199067	49.61
100	0.01	0.01	304.3	0.589048623	129.80
50	0.02	0.002	130.42	0.235619449	139.08
50	0.01	0.01	95.04	0.294524311	81.08
50	0.015	0.003	90.31	0.19880391	114.14
50	0.015	0.003	87.12	0.19880391	110.11
10000	0.003	0.003	537.48	1.590431281	84.91



Média	103.78
-------	--------

Fonte: Autores (2019)

Tabela 3 – Preços dos produtos: Carbonatito concentrado, O.Nd, Nd, ímã

Símbolo	Valores (US\$/g)	Descrição	Fonte
$\rho_{Carbonatito}$	$4,22525 \times 10^{-3}$	Preço médio do carbonatito concentrado	SMM (2019)
$\rho_{O.Nd}$	$4,436512 \times 10^{-2}$	Preço médio do O.Nd	SMM (2019)
$\rho_{Nd}$	$5,864355 \times 10^{-2}$	Preço médio do Nd	SMM (2019)
$\rho_{ímã}$	0,103	Preço do ímã NdFeB N35	Autores (2019)

Fonte: Autores (2019)

Para a estimativa da faixa de potencial de geração de energia de máquinas dotadas de ímãs permanentes, foram utilizados dois critérios, ambos voltados para a energia eólica: os dados do protótipo AFVHM – máquina vernier híbrida de fluxo axial – topologia mais eficiente, com acionamento a 130RPM (rotações por minuto), descrita em Roding (2001), extrapolado para o estoque teórico completo de ímãs  $Q_{ímã}$ , e a relação de 2700kg de ímãs necessários para uma turbina de 3MW, segundo Campos et al. (2015).

Para isso, foi calculado o Índice de Potência/ Massa magnética  $I_{P/Mm}$  segundo a equação abaixo:

$$I_{P/Mm} = \frac{P_{máquina}}{m_{ímã}} \text{ [W/g]} \text{ Equação 6,}$$

Onde  $P_{máquina}$  é a potência elétrica gerada pela máquina estudada e  $m_{ímã}$  é a massa total dos ímãs utilizados no gerador, calculada para o protótipo através da equação a seguir:

$$m_{ímã} = \rho_{ímã} \times V_{ímã} \text{ [g]} \text{ Equação 7,}$$

Onde  $\rho_{ímã}$  é a massa específica de  $7,5 \cdot 10^6$  g/m<sup>3</sup> (ECLIPSE MAGNETICS, 2018) e  $V_{ímã}$  é o volume total dos 36 ímãs N30 tipo bloco (forma de paralelepípedo) utilizados no protótipo, com medidas 50mm x 30mm x 6mm (RODING, 2001).

Assim, o potencial energético estimado da reserva supracitada foi calculado para cada um dos índices obtidos através da equação abaixo:

$$P = I_{P/Mm} \times Q_{ímã} \text{ [W]} \text{ Equação 8}$$

Todos os cálculos foram realizados utilizando o Microsoft Excel®.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerando somente as receitas potenciais de comercialização do O.Nd, do Nd e dos ímãs N35 apresentados na Tabela 4, resta claro que quanto maior for o grau de beneficiamento (aumento do valor agregado), maior será a receita esperada. Considerando os extremos estudados (ímã manufaturado x óxido de neodímio), encontra-se uma variação superior a 644%. Este prisma já indica a vantagem em restringir a exportação de minério e incentivar a manufatura de ímãs com essa matéria-prima, seja para industrialização interna ou para exportação, visto que permitirá maior geração de empregos, incentivará a instalação de uma indústria de microeletrônica mais avançada e aumentará a arrecadação de impostos.

Cabe ressaltar que as bases de preço deste estudo foram tomadas a partir de recorte pontual, mas a relação entre eles ao longo do tempo exibe um comportamento semelhante ao apresentado.

Tabela 4 – Receitas potenciais com o comércio de O.Nd, Nd e ímãs N35

Símbolo	Valores (x 10 <sup>11</sup> US\$)	Descrição
$\mathfrak{R}_{O.Nd}$	1,490668032	Receita obtenível com O.Nd
$\mathfrak{R}_{Nd}$	1, 6420194	Receita obtenível com Nd metal.
$\mathfrak{R}_{ímã}$	9,61	Receita obtenível com ímãs N35

Fonte: Autor (2019)

A Tabela 5 mostra os valores calculados para os  $I_{P/Mm}$  e seus respectivos potenciais de geração de potência P segundo os dados descritos na seção 2.

Tabela 5 -Comparação  $I_{P/Mm}$  x Potencial de Geração P

Referência	$I_{P/Mm}$ (W/g)	Potencial de Geração P (TW)
Roding (2001)	0,232	2,168
Campos et al. (2015)	1,111	10,360

Fonte: Autor (2019)

Frente às diversas limitações construtivas do protótipo considerado, pode-se notar que frente a uma máquina de um gerador de porte industrial, ele teve um bom desempenho. Mesmo quando considerado o potencial de geração de energia decorrente do  $I_{P/Mm}$  do protótipo Roding (2001), este é superior a 13 vezes a capacidade instalada atual de 165,85GW do Brasil (ANEEL, 2019).

Valores dessa ordem de grandeza indicam que a reserva de neodímio de apenas uma das reservas brasileiras é o suficiente para garantir a autossuficiência deste metal para fins de geração independentemente da modalidade adotada para o fornecimento da energia primária, desde que adotados sistemas híbridos e/ ou complementares baseados em fontes renováveis. Cabe ressaltar que

ímãs de neodímio aumentam a eficiência de motores elétricos e autofalantes, entre outros, reduzindo também a demanda por energia elétrica e/ ou por combustíveis fósseis, quando se considera a substituição gradual por veículos híbridos e/ ou puramente elétricos. O neodímio ainda é utilizado na produção de baterias, e outras TR são parte de diversos eletroeletrônicos.

A exemplo da política comercial proposta pela China (BUYS, 2012), o Brasil deveria tratar TR como recurso estratégico, e não *commodities*; assim, recomenda-se regular a produção e, quando o processo de extração estiver plenamente desenvolvido, restringir ao máximo a exportação de minério *in natura* ou óxido para priorizar a manufatura de ímãs permanentes, seja para geração de energia, para aumento de eficiência de motores elétricos, fabricação de componentes eletroeletrônicos, exportação ou outros fins. Para isso, sugere-se a criação de um fundo por tempo determinado com a aplicação de um percentual da CFEM - Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais (CNM, 2012) em cooperação com a iniciativa privada para aceleração do processo de Pesquisa & Desenvolvimento na área de produção e aplicação de ímãs permanentes.

#### 4. CONCLUSÃO

A viabilidade da adoção de uma tecnologia envolve as esferas técnica, econômica e de disponibilidade. À despeito das simplificações adotadas neste estudo, fica patente o grande potencial de utilização das reservas de terras-raras disponíveis no Brasil para fins de geração de energia.

No entanto, para garantia da disponibilidade do item mais crítico da máquina elétrica, cuja configuração pode ser adaptada para conversão eletromecânica de diversas fontes renováveis de energia, tais como a eólica, a termosolar e a das ondas do mar, só para citar as de maior disponibilidade no Brasil, é recomendável a adoção de um marco legal que vise ao controle de produção de neodímio e ao domínio da tecnologia de manufatura de superímãs. Para desenvolver essa tecnologia, sugere-se, entre outras fontes, a criação de um fundo por tempo determinado formado a partir de um percentual a definir da receita da CFEM - Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais – destinada à União em parceria com a iniciativa privada.

Como consequência, são esperadas a independência em relação aos preços e tensões políticas internacionais relativas ao neodímio, a contribuição positiva para a balança comercial brasileira, a apropriação de tecnologias de ponta no desenvolvimento de equipamentos magnéticos, a redução de preços e consequente aumento geração distribuída de energia, reduzindo também a demanda de implantação de projetos de geração de energia de grande escala, o que sempre traz maiores impactos ao meio ambiente.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA O GLOBO. **China avisa que não venderá terras raras a países que boicotam o desenvolvimento.** Brasil Econômico. Disponível em <https://economia.ig.com.br/2019-05-30/china-avisa-que-nao-vendera-terras-raras-a-paises-que-boicotam-o-desenvolvimento.htm>. Acesso em 01 jun. 2019.

AGRELA, L. **Elon Musk libera patentes da Tesla para ajudar a salvar o planeta.** *Revista Exame*. São Paulo: Editora Abril, 2019. Disponível em: <https://exame.abril.com.br/tecnologia/elon-musk-libera-patentes-da-tesla-para-ajudar-a-salvar-o-planeta/>. Acesso em 21 jul. 2019

ALIEXPRESS. 100pcs 5mm x 1mm Craft Model Disc Rare Earth Neodymium Super Strong Magnets N35. AliExpress, 2019a. Disponível em [https://www.aliexpress.com/item/2014057786.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.52f8224a6r2V9a&algo\\_pvid=28e77f76-4296-44f8-bac6-7dfaa0957d03&algo\\_expid...](https://www.aliexpress.com/item/2014057786.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.52f8224a6r2V9a&algo_pvid=28e77f76-4296-44f8-bac6-7dfaa0957d03&algo_expid...). Acesso em 21 jul. 2019

ALIEXPRESS. 10\*1 500pcs 10 mm X 1 mm disc powerful magnet craft magnet neodymium magnets rare earth neodymium permanent strong magnet N35. AliExpress, 2019b. Disponível em [https://www.aliexpress.com/item/2014057786.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.52f8224a6r2V9a&algo\\_pvid=28e77f76-4296-44f8-bac6-7dfaa0957d03&algo\\_expid...](https://www.aliexpress.com/item/2014057786.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.52f8224a6r2V9a&algo_pvid=28e77f76-4296-44f8-bac6-7dfaa0957d03&algo_expid...). Acesso em 21 jul. 2019

ALIEXPRESS. Retail Wholesale 1000pcs 3mm x 3mm Disc Rare Earth Neodymium Super Strong Magnets N35 Craft Model magnet 3x3mm. AliExpress, 2019c. Disponível em [https://www.aliexpress.com/item/32795106116.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.52f8224a6r2V9a&algo\\_pvid=28e77f76-4296-44f8-bac6-7dfaa0957d03&algo\\_expid...](https://www.aliexpress.com/item/32795106116.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.52f8224a6r2V9a&algo_pvid=28e77f76-4296-44f8-bac6-7dfaa0957d03&algo_expid...). Acesso em 21 jul. 2019

ALIEXPRESS. Zion 100pcs Dia 22x2mm super strong magnet N35 rare earth small round powerful neodymium magnet 22\*2mm permanent magnetic. AliExpress, 2019d. Disponível em [https://www.aliexpress.com/item/32884127539.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.52f8224a6r2V9a&algo\\_pvid=28e77f76-4296-44f8-bac6-7dfaa0957d03&algo\\_expid...](https://www.aliexpress.com/item/32884127539.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.52f8224a6r2V9a&algo_pvid=28e77f76-4296-44f8-bac6-7dfaa0957d03&algo_expid...). Acesso em 21 jul. 2019

ALIEXPRESS. Powerful Neodymium Magnets Disc 10mm x 10mm NdFeB Rare Earth 100pcs 10x10 N35 Imanes Magnetic Strong Small Cylinder Magnet. AliExpress, 2019e. Disponível em [https://www.aliexpress.com/item/32957468502.html?spm=a2g1y.12024536.productList\\_13461441.pic\\_1&algo\\_pvid=28e77f76-4296-44f8-bac6-7dfaa0957d03&algo\\_expid...](https://www.aliexpress.com/item/32957468502.html?spm=a2g1y.12024536.productList_13461441.pic_1&algo_pvid=28e77f76-4296-44f8-bac6-7dfaa0957d03&algo_expid...). Acesso em 21 jul. 2019

ALIEXPRESS. 50 Pcs Lot 20mm X 2mm Disc Rare Earth Neodymium Super Strong Magnets N35. AliExpress, 2019f. Disponível em [https://www.aliexpress.com/item/32884127539.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.52f8224a6r2V9a&algo\\_pvid=28e77f76-4296-44f8-bac6-7dfaa0957d03&algo\\_expid...](https://www.aliexpress.com/item/32884127539.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.52f8224a6r2V9a&algo_pvid=28e77f76-4296-44f8-bac6-7dfaa0957d03&algo_expid...). Acesso em 21 jul. 2019

ALIEXPRESS. 50pcs D10X10mm Neodymium Magnet Strong Magnet N35 NdFeB Rare Earth Disc Magnet Free Shipping. AliExpress, 2019g. Disponível em <https://www.aliexpress.com/item/32973216203.html?spm=a2g0o.detail.1000060.3.5541642dskkIeu&gps-id=pcDetailBottomMoreThisSeller&scm=1007.13339.139...> Acesso em 21 jul. 2019

ALIEXPRESS. Strong Magnets Sheet 50pcs Disc 15mm x 3mm N35 NdFeB 15x3 Rare Earth Powerful Magnetic Round Neodymium Magnets Sheets. AliExpress, 2019h. Disponível em [https://www.aliexpress.com/item/32884127539.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.52f8224a6r2V9a&algo\\_pvid=28e77f76-4296-44f8-bac6-7dfaa0957d03&algo\\_expid...](https://www.aliexpress.com/item/32884127539.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.52f8224a6r2V9a&algo_pvid=28e77f76-4296-44f8-bac6-7dfaa0957d03&algo_expid...) Acesso em 21 jul. 2019

ALIEXPRESS. 50pcs x Strong Magnet N35 Round Slice Disc 15 X 3 mm Rare Earth Neodymium Wholesale Free Shipping!ndfeb Neodymium magnets. AliExpress, 2019i. Disponível em [https://www.aliexpress.com/item/32482679581.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.52f8224a6r2V9a&algo\\_pvid=28e77f76-4296-44f8-bac6-7dfaa0957d03&algo\\_expid...](https://www.aliexpress.com/item/32482679581.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.52f8224a6r2V9a&algo_pvid=28e77f76-4296-44f8-bac6-7dfaa0957d03&algo_expid...) Acesso em 21 jul. 2019

ALIEXPRESS. Retail Wholesale 10000pcs 3mm x 3mm Disc Rare Earth Neodymium Super Strong Magnets N35 Craft Model magnet 3x3mm. AliExpress, 2019j. Disponível em [https://www.aliexpress.com/item/32797311737.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.52f8224a6r2V9a&algo\\_pvid=28e77f76-4296-44f8-bac6-7dfaa0957d03&algo\\_expid...](https://www.aliexpress.com/item/32797311737.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.52f8224a6r2V9a&algo_pvid=28e77f76-4296-44f8-bac6-7dfaa0957d03&algo_expid...) Acesso em 21 jul. 2019

ANEEL. **Resolução normativa nº 482, de 17 de abril de 2012.** Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília: 2012. Disponível em <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em 21 jul. 2019

ANEEL. **Nota Técnica nº 0056/2017-SRD/ANEEL:** Atualização das projeções de consumidores residenciais e comerciais com microgeração solar fotovoltaicos no horizonte 2017-2024. Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília: 2017. Disponível em [http://www.aneel.gov.br/documents/656827/15234696/Nota+Técnica\\_0056\\_PROJEÇÕES+GD+2017/38cad9ae-71f6-8788-0429-d097409a0ba9](http://www.aneel.gov.br/documents/656827/15234696/Nota+Técnica_0056_PROJEÇÕES+GD+2017/38cad9ae-71f6-8788-0429-d097409a0ba9). Acesso em 21 jul. 2019

ANEEL. Capacidade de Geração do Brasil. In: **BIG - Banco de Informações de Geração.** Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília: 2019. Disponível em <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. Acesso em 01 ago. 2019

BRASIL. Decreto nº 5.163 de 30 de julho de 2004. Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, seção I, Edição Extra, retificado em 04/08/2004. Disponível em [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2004-2006/2004/Decreto/D5163.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2004-2006/2004/Decreto/D5163.htm). Acesso em 21 jul. 2019

BUYS, B. Terras-raras: uma oportunidade imperdível? **Ciência e Cultura**, v. 64, n. 1, p. 8–9, 2012. Disponível em: [http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S0009-67252012000100004&lng=en&nrm=iso&tlng=en](http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0009-67252012000100004&lng=en&nrm=iso&tlng=en). Acesso em 2 ago. 2019

CNM. Entenda a Cfem (Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais). **Série Estudos Técnicos - julho de 2012**, Volume 5, N. 14, p. 179-188 Confederação Nacional de Municípios – CNM. Brasília, 2012. Disponível em <https://www.cnm.org.br/cms/biblioteca/ET%20Vol%205%20-%202014.%20Entenda%20a%20CFEM.pdf>. Acesso em 21 jul. 2019

ECLIPSE MAGNETICS. NdFeB Magnets/ Neodymium Iron Boron Magnets Datasheet. Eclipse Magnetics. Sheffield (GB), 2018. Disponível em [https://www.eclipsemagnetics.com/media/wysiwyg/datasheets/magnet\\_materials\\_and\\_assemblies/ndfeb\\_neodymium\\_iron\\_boron-standard\\_ndfeb\\_range\\_datasheet\\_rev1.pdf](https://www.eclipsemagnetics.com/media/wysiwyg/datasheets/magnet_materials_and_assemblies/ndfeb_neodymium_iron_boron-standard_ndfeb_range_datasheet_rev1.pdf). Acesso em 21 jul. 2019

EIA. **International Energy Outlook 2017**. U.S. Energy Information Administration. Washington, 2017. Disponível em [https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2017\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2017).pdf). Acesso em 21 jul 2019.

EPE. **Balanco Energético Nacional 2019: Relatório Síntese/ Ano Base 2018**. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro, 2019. Disponível em <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-470/Relatório%20Síntese%20BEN%202019%20Ano%20Base%202018.pdf>. Acesso em 21 jul. 2019

GAMBOGI, J. Rare Earths [advance release]. In: **2015 Minerals Yearbook**. U.S. Geological Survey. Washington, DC: 2018, p. 60.1-60.18. Disponível em <https://s3-us-west-2.amazonaws.com/prd-wret/assets/palladium/production/mineral-pubs/rare-earth/myb1-2015-raree.pdf>. Acesso em 01 jun. 2019.

GOMES, R.C, BARDANO, B.M.M., NASCIMENTO, M. **Potencial de aproveitamento de fontes secundárias para terras-raras: ímãs permanentes**. In: XXVI ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 2015, Poços de Caldas/MG. Poços de Caldas: CETEM, 2015. Disponível em <https://www.cetem.gov.br/images/congressos/2015/CAC00100015.pdf>. Acesso em 01 jun. 2019.

GWEC. **Global Wind Report: Annual Market Update 2017**. Global Wind Energy Council: Bruxelas, 2018. Disponível em: <http://files.gwec.net/files/GWR2017.pdf>. Acesso em: 28 nov. 2018

IPT. **Novo passo para superímãs**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. São Paulo, 2018. Disponível em [https://www.ipt.br/noticia/1399-novo\\_passo\\_para\\_superimas.htm](https://www.ipt.br/noticia/1399-novo_passo_para_superimas.htm). Acesso em 20 jul. 2019

MBAC. Projeto CBMM Terras Raras. In: I Seminário Brasileiro de Terras-Raras, Rio de Janeiro (RJ), Brasil, 07 de dezembro 2011. MBAC Fertilizer Corp., 2011. Disponível em

[www.cetem.gov.br/images/palestras/2011/isbtr/MBAC-carlos-braga-antenor.pptx](http://www.cetem.gov.br/images/palestras/2011/isbtr/MBAC-carlos-braga-antenor.pptx). Acesso em 01 jun. 2019.

MBAC. **Mineral Resource Estimate - Araxá Rare Earth Oxide-Phosphate-Niobium Project, Minas Gerais State, Brazil: NI 43-101 Technical Report - 01 jun. 2012**. MBAC Fertilizer Corp., 2012. Disponível em [www.sedar.com](http://www.sedar.com). Acesso em 21 jul. 2019

NETO J. B. F. et al. **Obtenção de didímio metálico a partir dos óxidos de terras raras produzidos em Araxá, Brasil**. In: 72º Congresso Anual da ABM – Internacional & 17º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, parte integrante da ABM Week, realizada de 02 a 06 de outubro de 2017, São Paulo, SP, Brasil. Disponível em <https://abmproceedings.com.br/ptbr/article/download-pdf/obtencao-de-didimio-metalico-a-partir-dos-oxidos-de-terras-raras-produzidos-em-araxa-brasil>. Acesso em 21 jul. 2019

PADILLA A.J., GHALAYINI Z.T., PAPP J.F. Niobium [advance release]. In: **2016 Minerals Yearbook**. U.S. Geological Survey. Washington, DC: 2019, p. 52.1-52.8. Disponível em <https://prd-wret.s3-us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/myb1-2016-niobi.pdf>. Acesso em 01 jun. 2019.

PADILLA A.J. Niobium (Columbium). In: **Mineral Commodity Summaries 2019**. U.S. Geological Survey. Washington, DC: 2019, p. 114-115. Disponível em [http://prd-wret.s3-us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/mcs2019\\_all.pdf](http://prd-wret.s3-us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/mcs2019_all.pdf). Acesso em 01 jun. 2019.

NCBI. Periodic Table of Elements. In: **PubChem**. U.S. National Center for Biotechnology Information. Bethesda (MD), 2004. Disponível em: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/periodic-table/>. Acesso em 21 jul 2019.

POHL, W. L. **Economic Geology, Principles and Practice: Metals, Minerals, Coal and Hydrocarbons - Introduction to Formation and Sustainable Exploitation of Mineral Deposits**. Wiley-Blackwell, 2011.

PORTAL DA MINERAÇÃO. **Primeiro superímã com terras-raras do país nasceu em Minas**. Belo Horizonte, 2016. Disponível em <https://portaldamineracao.com.br/en/primeiro-superima-com-terras-raras-do-pais-nasceu-em-minas/>. Acesso em 21 jul. 2019.

Qi, Z., Qingfen, D. China to reduce rare earth export quotas. China Daily. Beijing, 2010. Disponível em [http://www.chinadaily.com.cn/business/2010-10/19/content\\_11427356.htm](http://www.chinadaily.com.cn/business/2010-10/19/content_11427356.htm). Acesso em 21 jul. 2019.

RODING, W. E. **Vernier Hybrid Wind Turbine Generators**. 2001. 89p. Electrical Power and Control School of Engineering, University of Durham, Durham, 2001. Disponível em [http://theses.dur.ac.uk/3802/1/3802\\_1363.pdf?UkUDh:CyT](http://theses.dur.ac.uk/3802/1/3802_1363.pdf?UkUDh:CyT). Acesso em 01 jun. 2019.

SAGAWA, M. et al. New material for permanent magnets on a base of Nd and Fe (invited). **Journal of Applied Physics**, v. 55, n. 6: p.2083–2087, 1984. [doi:10.1063/1.333572](https://doi.org/10.1063/1.333572).

Disponível em <https://aip-scitation-org.ez135.periodicos.capes.gov.br/doi/abs/10.1063/1.333572>. Acesso em 01 jun. 2019.

SAGAWA, M. et al. Permanent magnet materials based on the rare earth-iron-boron tetragonal compounds. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 20, n.5: p. 1584–1589, 1984. [CiteSeerX 10.1.1.533.8984](https://doi.org/10.1109/TMAG.1984.1063214). doi [10.1109/TMAG.1984.1063214](https://doi.org/10.1109/TMAG.1984.1063214). Disponível em <https://ieeexplore-ieee.org.ez135.periodicos.capes.gov.br/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1063214>. Acesso em 01 jun. 2019.

SENADO FEDERAL. Nióbio brasileiro domina mercado. In: **Terras Raras – Estratégias para o futuro**. Revista Em Discussão! Ano 4, Nº 17, setembro de 2013. Senado Federal. Brasília (DF), 2013. Disponível em [http://www.senado.gov.br/noticias/jornal/emdiscussao/Upload/201304%20-%20setembro/pdf/em%20discussão!\\_setembro\\_2013\\_internet.pdf](http://www.senado.gov.br/noticias/jornal/emdiscussao/Upload/201304%20-%20setembro/pdf/em%20discussão!_setembro_2013_internet.pdf). Acesso em 25 jun. 2019

SMM. Rare Earth Price Chart, China Rare Earth Price Today Market. Shanghai Metals Market – SMM. Shanghai, 2019. Disponível em <https://price.metal.com/Rare-Earth>. Acesso em 21 jul 2019.

SOUSA, C.A.F. et al. Projeto CBMM Terras Raras. In: EXPOSIBRAM – Expo & Congresso Brasileiro de Mineração, Belo Horizonte (MG), Brasil, 18 a 21 de setembro 2017. Instituto Brasileiro de Mineração IBRAM, Belo Horizonte, 2017. Disponível em <https://portaldamineracao.com.br/wp-content/uploads/2018/05/cmb-2017-painel-6-clovis-antonio-de-faria-sousa.pdf>. Acesso em 01 jun. 2019.

SOUSA, C.A.F., GUIMARÃES R.C., BOTELHO, M.H.M. Desenvolvimento de processo e produtos de terras-raras na CBMM. In: II Seminário Brasileiro de Terras-Raras, Rio de Janeiro (RJ), Brasil, 29 de novembro de 2013. Centro de Tecnologia Mineral – CETEM/MCTIC, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em <https://www.cetem.gov.br/images/palestras/2013/iisbtr/15-clovis-antonio.pdf>. Acesso em 01 jun. 2019.

USGS. Mineral commodity summaries 2019. Washington, DC: U.S. Geological Survey, 2019, 200 p. Disponível em <https://doi.org/10.3133/70202434>. [https://prd-wret.s3-us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/mcs2019\\_all.pdf](https://prd-wret.s3-us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/mcs2019_all.pdf). Acesso em 01 jun. 2019.

VAN GOSEN, B.S., et al. Rare-earth elements. In: Schulz, K.J., et al., eds. **Critical mineral resources of the United States—Economic and environmental geology and prospects for future supply**: Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, 2017. p. O1–O31. Disponível em <https://doi.org/10.3133/pp1802O>. Acesso em 25 jun. 2019



## ARTIGO CIENTÍFICO 4

### INVESTIGAÇÃO DA APLICAÇÃO DE GERADORES LINEARES COM TOPOLOGIA VERNIER NA EXTRAÇÃO DE ENERGIAS DAS ONDAS

#### INVESTIGATION OF THE APPLICATION OF LINEAR GENERATORS WITH VERNIER TOPOLOGY IN WAVES ENERGY EXTRACTION

Fabiano Baldez da Costa Brito - IFFluminense/PPEA

Marcos Antonio Cruz Moreira - IFFluminense/PPEA

#### RESUMO

Métodos alternativos de geração de energia através de fontes renováveis e de baixo carbono são uma necessidade premente para mitigação dos efeitos das mudanças climáticas observados atualmente. Dentre as diversas fontes renováveis ainda pouco exploradas mundialmente, a energia contida nas ondas do mar apresenta um alto potencial, sobretudo para países com uma vasta costa e experiência *offshore* como o Brasil. Para este fim, sistemas do tipo Corpo Flutuante de Absorção Pontual se destacam pelo aproveitamento das oscilações verticais, de forma que máquinas lineares se tornam particularmente adequadas devido à maior eficiência de transferência da energia mecânica até o acionamento do gerador elétrico decorrente da dispensa dos acoplamentos mecânicos para conversão do movimento rotativo para o translacional das máquinas convencionais. Inicialmente, a partir de um recorte bibliográfico, é apresentado um breve resumo sobre a estrutura de máquinas lineares, abordando as principais características que as diferenciam entre si. A seguir, a topologia vernier é abordada, para o desenvolvimento do gerador com base na maior eficiência alcançada quando em comparação com outras topologias em condição de operação a baixas frequências de oscilação como as condições oceânicas da costa brasileira, sendo detalhadas suas principais características de funcionamento. Apoiando-se no referencial teórico até então apresentado, este trabalho teve por objetivo apresentar os principais parâmetros e requisitos de projeto para um gerador destinado a um sistema de conversão de energia de ondas do tipo Absorção Pontual a serem considerados para uma implementação futura.

**Palavras-chave:** Absorvedor pontual. Gerador Linear. Topologia vernier.

#### SUMMARY

*The use of renewable and low carbon sources of energy currently is mandatory to mitigate the effects of climate change observed today. Among the various few explored worldwide renewable sources, the energy of the sea waves has a high potential, mainly in countries with an extensive coastline and offshore experience, such as Brazil. For this purpose, point-absorbing floating body systems stand out for taking advantage of vertical oscillations, so that linear machines become particularly suitable due to the greater efficiency of the transfer of mechanical energy until the activation of the electric generator due to the dispensing of mechanical couplings for converting the rotational movement of conventional machines to the translational. Initially, is briefly presented the structure of linear electrical machines, addressing the main characteristics that differentiate them. Next, an approach to the vernier topology is done for the development of the generator based on the greater efficiency achieved when compared to other topologies in the condition of low oscillation frequencies such as the oceanic conditions of the Brazilian coast, with its main operating characteristics detailed. Finally, we've parameters and design requirements for a point absorber wave energy converter for future implementation.*

**Keywords:** *Point Absorber. Linear Generator. Vernier topology.*

## 1. INTRODUÇÃO

Diversos estudos apontam os efeitos deletérios das mudanças climáticas ao meio ambiente, às pessoas, à fauna e a flora, tais como mudanças abruptas de temperatura, ciclos de chuvas muito intensas e secas prolongadas etc. (ASSIS; ARAÚJO; SERRÃO, 2018; FRANCHINI; MANNUCCI, 2015; MCNUTT, 2013; SOLOMON *et al.*, 2010). A principal causa apontada é o aumento da taxa de gases de “efeito estufa”, notavelmente o CO<sub>2</sub>. Grande parte desses gases são provenientes da queima de combustíveis fósseis para geração de energia.

Assim, a busca de novas fontes de energia com menor geração de carbono em ciclo de produção é um imperativo para mitigar esses efeitos e permitir uma mudança gradual da matriz energética mundial para um perfil de destaque para energias de fontes renováveis aliada a uma recuperação econômica nacional (MAGALHÃES; DOMINGUES, 2016).

A despeito do grande potencial, estimado globalmente em cerca de 32PWh/ano, uma fonte de energia ainda pouco explorada é aquela oriunda das ondas do mar, sendo responsável por uma geração inferior a 2GW, equivalente a menos que 0,02% do total mundial produzido em 2013 utilizando fontes renováveis (WORLD ENERGY COUNCIL, 2016). Os oceanos podem contribuir para a geração de

energia através da variação das marés, das correntes oceânicas e das marés, do gradiente de temperatura, do gradiente de salinidade e das ondas. Os primeiros quatro serão abordados a seguir de forma sucinta e o último, por se tratar diretamente relacionado ao objeto-fim desta pesquisa, mais detalhadamente.

A oscilação do nível médio do mar ocorre pelas interações gravitacionais dos oceanos com o Sol e, com maior intensidade, com a Lua, de forma que se alternam preia-mar, com maior nível, e baixa-mar, com menor nível, das águas. A energia cinética decorrente do movimento da água no sentido da correnteza e a potencial decorrente da variação de nível podem ser convertidas em energia elétrica quando uma turbina é instalada em um reservatório submarino, de forma que a primeira se movimenta em um sentido quando do enchimento que ocorre na preia-mar e no outro quando do esvaziamento do reservatório na baixa-mar (SILVA, E. F. D. E *et al.*, 2014).

As correntes marítimas e oceânicas decorrem de diversos fatores, tais como gradientes de temperatura e salinidade da água, vento, efeito Coriolis e outros. São de relativamente baixa velocidade e unidirecionais, com variações sazonais (SHADMAN *et al.*, 2019). Tais fluxos podem ser aproveitados através da instalação de turbinas submarinas que aproveitem a passagem da água (SILVA, E. F. D. E *et al.*, 2014). São adequados a regiões em mar aberto, a distância da costa, o que dificulta a transmissão de energia até o sistema da concessionária (CRUZ; SARMENTO, 2004).

Conversores da energia térmica dos oceanos (OTEC - *Ocean Thermal Energy Conversion*, no original em inglês) visam o aproveitamento do gradiente de temperatura (mínimo viável em torno de 15 a 20°C) obtível em colunas de aproximadamente 1000m de profundidade nas regiões tropicais (águas mais profundas são mais frias), para resfriamento, aquecimento ou geração de energia elétrica (SILVA, E. F. D. E *et al.*, 2014). Podem operar em circuito fechado, aberto ou híbrido. No circuito fechado, um fluido de baixo ponto de ebulição (amônia, por exemplo) é vaporizado para movimentação de uma turbina para geração de energia elétrica, sendo depois condensado por resfriamento na baixa temperatura e rebombeado para cima, para repetição do ciclo. Em circuito aberto, a água mais superficial, e, portanto, de maior temperatura, é introduzida em um vaso à pressão negativa, o que provoca sua evaporação. Nesse processo, o vapor movimenta a turbina para geração de eletricidade e se torna dessalinizada, podendo ser utilizada para outros fins, inclusive, após o devido tratamento, para abastecimento da população. O ciclo híbrido, como o nome diz, combina os ciclos aberto e fechado, funcionando similarmente ao ciclo aberto, mas, nele, o vapor d'água é utilizada para vaporizar o fluido intermediário (amônia) para geração de eletricidade (SHADMAN *et al.*, 2019).

O gradiente de salinidade entre dois fluidos com diferentes concentrações de sais implica em energia potencial que pode ser aproveitada para a geração de energia, quando separadas por uma membrana. Na região da foz de um rio em uma região com água salgada (baía, mar ou oceano) tal

gradiente de salinidade ocorre. Há dois métodos básicos para o aproveitamento dessa energia: osmose por retardo de pressão e eletrodialise reversa. No primeiro, é instalada uma membrana semipermeável que permite apenas a passagem de água, mas não do eletrólito. Neste caso, quando a diferença de pressão entre os fluidos é inferior à pressão osmótica, a água na face menos concentrada (do rio) flui em direção à mais concentrada (mar), de forma a equilibrar a concentração em ambos os lados. Esse fluxo de água pode ser aproveitado para movimentar uma turbina (SHADMAN et al., 2019). O último se baseia na passagem de dois fluidos com concentrações iônicas diferentes por sucessivas membranas de troca iônica. A cada passagem de íons pelas membranas é gerado um potencial elétrico chamado potencial de membrana, que pode ser aproveitado para geração. O subproduto é a água salobra resultante, que pode ser descartada para o mar (STEIN, 1986).

Por fim, é apresentada a classe de dispositivos de conversão das ondas do mar de maior relevância para este trabalho. A oscilação vertical das ondas do mar pode ser aproveitada através do uso de Corpos Flutuantes de Absorção Pontual (CFAP), ou *Point Absorber*. A energia oscilatória pode ser extraída a partir de uma das três configurações a seguir: o absorvedor pontual de corpo simples, composto por uma boia e um referencial fixo; absorvedor pontual de corpo duplo, composto de uma boia e um corpo oscilante submerso; ou, um corpo submerso ligado ao leito marinho. A Figura 1 apresenta um esquema básico para um absorvedor pontual (AL SHAMI; ZHANG, R.; WANG, Xu, 2019).

Figura 1 – Esquema básico de um absorvedor pontual



Fonte: Autores (2021)

A coleta da energia ocorre com a ativação do corpo flutuante pela onda tipicamente em um único grau de liberdade, o que reduz o esforço sobre o sistema e simplifica o projeto mecânico para suportar os esforços decorrentes de cargas adicionais por variações ocasionais do mar. Conforme varia a altura da onda, o flutuador, solidário ao eixo, o movimenta, de tal forma que o campo magnético decorrente dos ímãs permanentes varia e induz uma corrente elétrica na armadura do estator, gerando assim a energia elétrica. No entanto, existem sistemas como o Fred Olsens Lifesaver, atualmente no Hawaii – EUA, que operam com mais de um grau de liberdade (Figura 2).

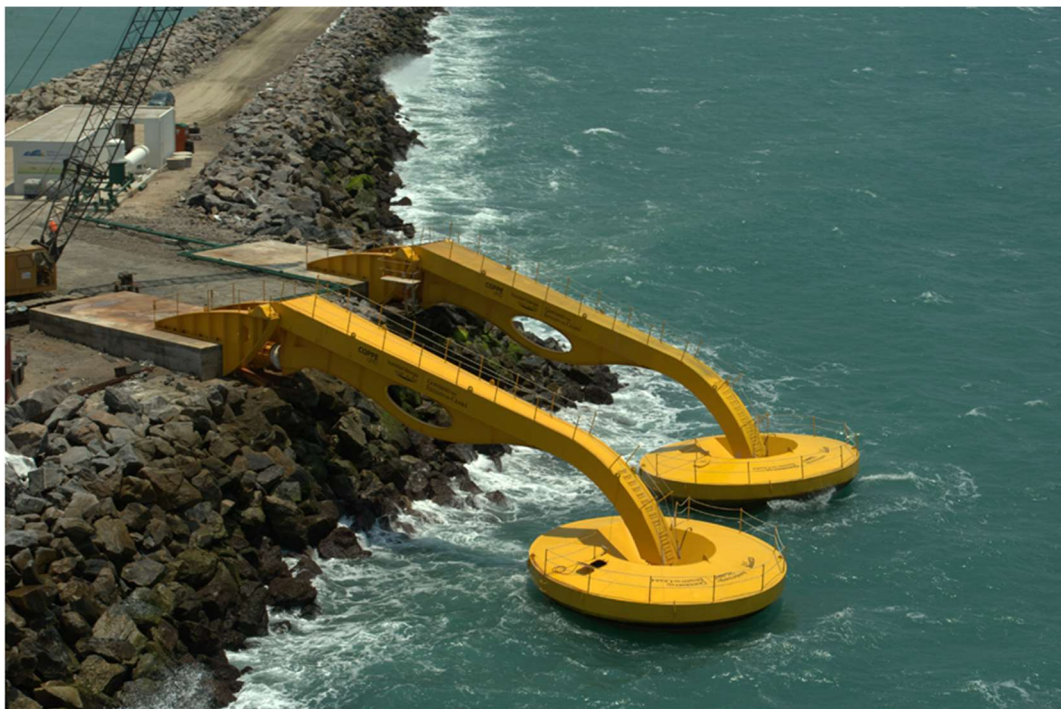
Figura 2 - Fred Olsens Lifesaver, instalada no Hawaii, EUA



Fonte: (“BOLT Lifesaver runs over 50 days at 100% uptime”, 2018)

Assim como outros tipos de conversores de energia das ondas, os absorvedores pontuais também admitem a escalabilidade em tamanho, ou seja, o aumento da capacidade instalada através da instalação em paralelo de novos módulos, com o objetivo de reduzir o custo nivelado da eletricidade (PECHER; KOFOED, 2017). Tal característica pode ser encontrada no projeto piloto brasileiro, onde foi instalada uma usina de teste (atualmente fora de operação) para conversão de ondas no Porto de Pecém, no litoral cearense, localizada a 60km da capital Fortaleza, com capacidade instalada de 50kW (QUEIROZ, 2014) (Figura 3).

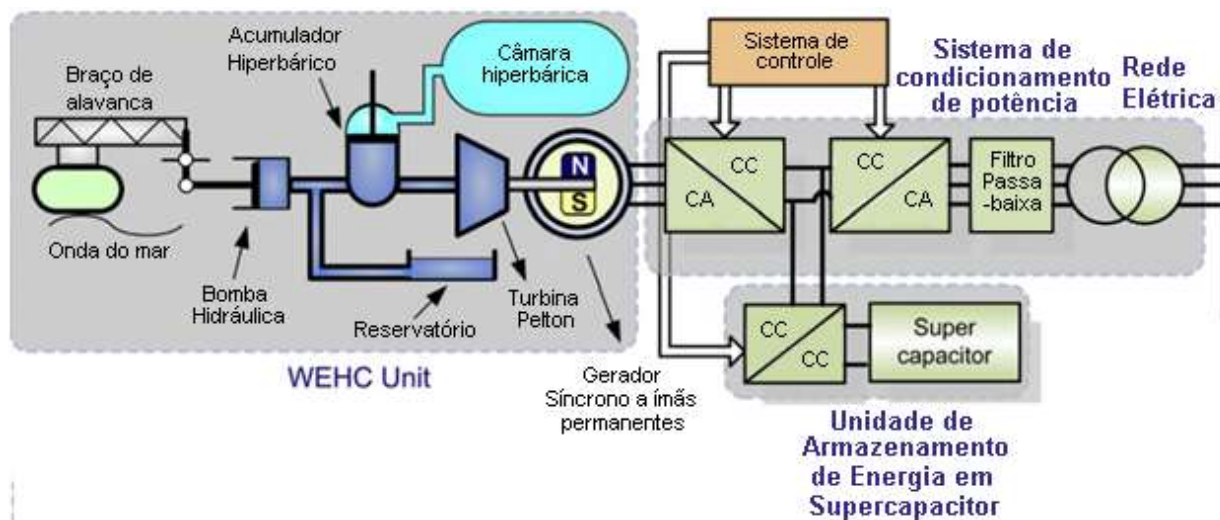
Figura 3 – Usina de Ondas do Pecém



Fonte: (“A ENERGIA QUE VEM DO MAR”, [s.d.]

O movimento da variação de altura das ondas capturado pelos flutuadores é transmitido via braços mecânicos a pistões que pressurizam água doce de um reservatório atmosférico e a armazenam em vasos pressurizados com ar comprimido a aproximadamente  $4 \times 10^6 \text{ Pa}$ , donde é utilizada para acionar uma turbina Pelton solidária a um gerador síncrono a ímãs permanentes. A energia gerada é então condicionada para integração segura ao sistema elétrico nacional (geração distribuída) (MARTÍNEZ *et al.*, 2012). O fluxograma esquemático é apresentado na Figura 4. O potencial de energia das ondas do litoral cearense é de cerca de 4,41GW (BESERRA, 2007).

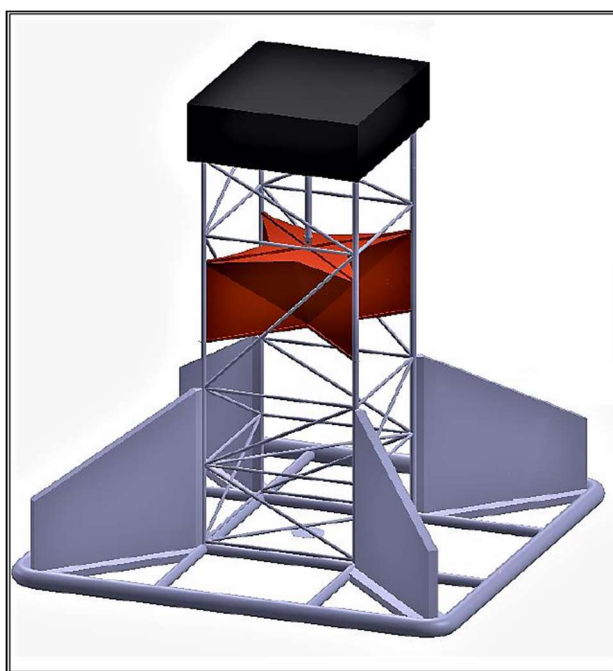
Figura 4 – Diagrama Esquemático do Conversor Hiperbárico de Energia das Ondas



Fonte: MARTÍNEZ *et al.* (2012), adaptado pelos Autores(2021)

De forma a aproveitar as facilidades de transmissão de energia para a rede pela maior proximidade, na COPPE/ UFRJ está em desenvolvimento um novo conceito de absorvedor pontual (Figura 5) com geometria capaz de operar *near shore* (próximo à costa, antes da zona de *surf*), aproveitando as energias cinética, decorrente da característica de transporte de massa das ondas em regiões de menor lâmina d'água, e potencial (RICARTE, 2017).

Figura 5 – Vista espacial do modelo em desenvolvimento pela COPPE/UFRJ



Fonte: (d'EGMONT, 2017)

O acoplamento entre o dispositivo de conversão mecânica e o gerador é uma parte sensível do projeto. Normalmente, é necessária a utilização de uma tomada de força para compatibilizar tipo (rotativo para translacional ou vice-versa) e frequência (baixa para alta ou vice-versa) da fonte mecânica com a necessidade do gerador. Além disso, podem absorver transientes e sobrecargas até determinado grau, garantindo a transferência suave da energia e ajudam a proteger o sistema em caso de falhas ou perdas de controle. Tal princípio também se aplica aos conversores de energia das ondas, de tal forma que deve ser considerada quando da execução do projeto.

Além dos custos de fabricação e manutenção, durante o projeto de um sistema de geração deve-se considerar a eficiência desse equipamento. Em comparação com um sistema pneumático típico, o uso de uma tomada de força mecânica eleva a eficiência desta etapa do processo de 55% para 90%. Considerando um sistema acionado diretamente, essa eficiência alcança 95% (PECHER; KOFOED, 2017). Daí a vantagem da utilização de máquinas lineares para a conversão eletromecânica da energia oriunda de absorvedores pontuais, sobretudo se estes contarem com apenas um grau de liberdade – a maior eficiência global do sistema. Este será o tópico abordado na próxima seção.

## 2. ESTRUTURAS DE MÁQUINAS LINEARES

Com aplicações práticas até então basicamente limitadas à utilização em sistemas de transporte, com o advento dos ímãs de terras raras, ou também chamados superímãs, as máquinas lineares tiveram um aumento de popularidade no meio acadêmico devido ao horizonte maior de utilização industrial, que inclui seu uso, entre outros, em materiais bélicos, de automação e robotização e, claro, na geração de energia elétrica.

Fontes de energia mecânica com variação linear, tais como a variação da altura das ondas do mar (VICENTE; FALCÃO; JUSTINO, 2013), os motores de combustão interna de pistão livre (HU *et al.*, 2020) e os motores de combustão externa ou Stirling (MAJIDNIYA *et al.*, 2021), são particularmente adequadas ao uso de máquinas lineares para a conversão eletromecânica de energia, dado que, diferente das máquinas rotativas convencionais, dispensam a necessidade de acoplamentos mecânicos para adequação do tipo de movimento, aumentando a eficiência da transferência da energia e simplificando o conjunto como um todo (CHEVAILLER, 2006).

Assim, visando maior eficácia na definição da adequação de cada tipo de máquina conforme a aplicação a que se destina, cabe o estudo das suas classificações e principais características, o que será melhor explorado a seguir.

### 2.1. Desenvolvimento e Classificação de Máquinas Lineares

Para efeitos deste trabalho, define-se uma máquina linear como um aparato capaz de realizar a conversão eletromecânica de energia oriunda de (gerador) ou em (motor) um movimento translacional, dispensando o auxílio de elementos para modificação do tipo de movimento. Por vezes, para aplicações que exigem alto torque para revolucionar conjuntos de grandes diâmetros, são utilizados motores lineares. Como estas aplicações não se enquadram no escopo deste estudo, não serão aqui abordados.

O primeiro conceito patentado de motor linear, mesmo que inviável do ponto de vista prático devido à baixa eficiência, foi obtido por Charles Wheatstone, em 1841 (BOWERS; WILSON, M., 2001). Um novo conceito para tração elétrica foi proposto em 1902 na Alemanha, o que gerou uma nova patente (ZEHDEN, 1905). Uma demonstração pública deste conceito foi feita em 1914, pelo engenheiro naturalizado americano Emile Bachelet, baseada em uma patente sua de 1912 (BACHELET, 1912; LAITHWAITE, E., 1973). A partir daí, diversos novos conceitos foram apresentados até o desenvolvimento do trem de levitação magnética (DIPLING, 1937a, 1937b; WILLIAMS; LAITHWAITE, Eric Roberts, 1956; LAITHWAITE, Eric Roberts, 1961;



LAITHWAITE, Eric R., 1987). O conceito de rio magnético, desenvolvido por Laithwaite e Eastham, utilizou o motor linear de indução como elemento de tração e levitação (CURTIS, 1973). Motores lineares de indução continuaram sendo desenvolvidos, com apoio da análise de elementos finitos, dado o aumento do poder computacional disponível na época, assim como a sistematização do estudo de motores de indução tipo gaiola de esquilo (GIERAS, J. F., 1983; DAWSON, G. E. *et al.*, 1986; GIERAS, J.; DAWSON, G.; EASTHAM, A., 1986). Visando novas aplicações para as máquinas lineares síncronas a ímãs permanentes, foi desenvolvido o estudo do seu campo eletromagnético e detalhados os critérios para o projeto (ZESHENG DENG; BOLDEA; NASAR, S., 1986; BOLDEA; NASAR, S. A., 1987a, 1987b). O desenvolvimento de ímãs de terras raras permitiu novos avanços nessa área, como será visto ao longo do texto.

O primeiro critério de classificação das máquinas lineares é o seu princípio físico, o que faz referência diretamente ao tipo de força envolvida. Inicialmente, serão abordadas as máquinas piezoelétricas e magnetostrictivas, cujo curso de curto alcance inviabiliza o seu uso em um sistema de conversão de energia de ondas.

Motores piezoelétricos se baseiam na capacidade de determinados cristais dielétricos em se deformarem ao serem submetidos a um campo elétrico externo e possuem diversas aplicações na área de inspeção e automação (SPANNER, 2006). Chama-se efeito magnetostrictivo a propriedade dos materiais ferromagnéticos em sofrer variações dimensionais ao serem sujeitos a um campo magnético, tendo sido descoberto ainda em meados do século XIX (JOULE, 1847), e decorre da alteração que o campo causa na estrutura cristalina do material (IDA; ROEMER, 1988). Geralmente possuem um curso pequeno, sendo adequados a sistemas de automação para detecção de ondas ultrassônicas e deslocamentos em sensores de força (PACHECO, 2007). O uso de ímãs permanentes no lugar de eletroímãs permite a mitigação da não-linearidade decorrente da temperatura, evitando o efeito pelicular e correntes de Foucault (WANG LEI; TAN JIU-BIN; ZHANG SHAN, 2010).

Máquinas Eletrostáticas são baseadas na relação eletromecânica decorrente da interação entre cargas elétricas, onde as de mesmo sinal se repelem e de sinais opostos se atraem. No geral, necessitam de altas voltagens para funcionamento e apresentam baixo rendimento, mas há possibilidades de melhoria, como a utilização da desaceleração de gotículas carregadas eletricamente em uma membrana especial imersa em um campo elétrico (XIE *et al.*, 2014). Desta forma, com a tecnologia atual, não são adequadas para o uso em um sistema de geração como o proposto.

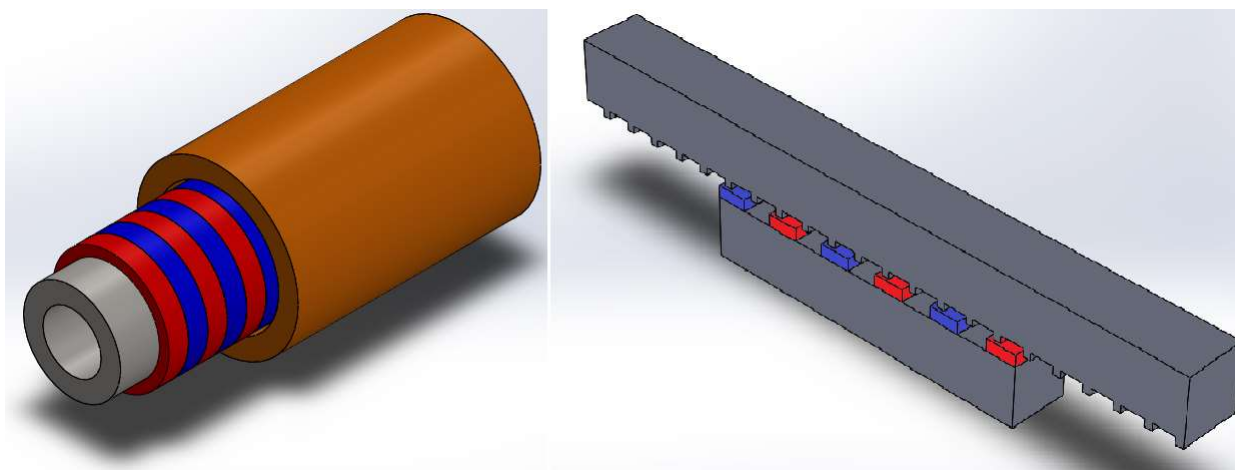
Por fim, abordaremos as máquinas eletromagnéticas, que possuem como fundamento a indução eletromagnética segundo a Lei de Faraday-Neumann-Lenz, entre os enrolamentos do estator (parte fixa) e translador (parte móvel). Esta indução pode ter por objetivo produzir torque no translador, no

caso de operação como motor, ou energia no estator, no caso de operar como gerador. Este tipo de máquina encontra ampla utilização na indústria, sendo o tipo mais comum.

Para melhor entendimento da máquina linear eletromagnética, consideremos um motor rotativo eletromagnético convencional, com um rotor cilíndrico interno a um estator de seção circular. Para melhor generalização, serão considerados que rotor e estator possuem polos magnéticos, não sendo necessário distinguir-se se originados por ímãs permanentes ou eletroímãs ou quantidade. O rotor possui um núcleo ferromagnético e os polos magnéticos na superfície. O estator é constituído de material ferromagnético e apresenta seus polos magnéticos na sua face interna. É possível uma compreensão inicial a partir do secionamento longitudinal e consequente deformação topológica do estator e do rotor de tal maneira que o estator apresente uma seção transversal regular com os polos magnéticos no mesmo plano e o rotor seja longitudinalmente planificado de tal modo que sua interação com o estator perca sua característica de rotação, sendo substituída por uma indução à translação em um plano deslocado e ao longo do estator. Daí, o antes rotor adquire novas nomenclaturas, que varia conforme o autor ou aplicação, a saber, linor, deslizador ou translador, termo último o qual adotaremos neste trabalho, por exemplo. Este é o esquema básico de um motor linear plano.

Quanto à sua geometria básica, podemos ter também o perfil tubular, onde o translador se movimenta interna e longitudinalmente ao estator. Assim como nas máquinas rotativas, o espaço entre as superfícies mais próximas do estator e do deslizador é nomeada entreferro. A Figura 6 apresenta os perfis geométricos básicos entre as máquinas lineares planas e tubulares. Os enrolamentos foram deliberadamente omitidos para que maior destaque fosse dado à forma.

Figura 6 – Máquinas Lineares Tubular (à esquerda) e Plana (à direita).

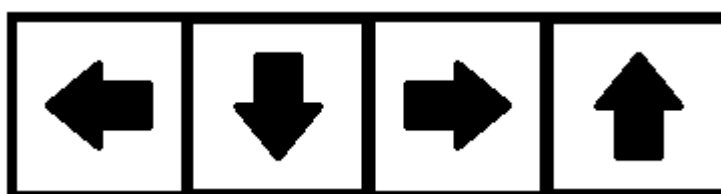


Fonte: Autores (2021)

A partir daí, podemos verificar mais uma característica geométrica, relacionada à diferença relativa de comprimento entre o translador e o estator, tendo sempre este último como base. Define-se estator curto aquele cujo comprimento é inferior ao translador (CHEVAILLER, 2006).

A geometria também é afetada pelo método adotado para o circuito magnético de excitação do entreferro a ímãs permanentes. Máquinas planas podem, ainda, ter a inserção de ímãs em um ou dois lados do núcleo ferromagnético, tanto no estator quanto no translador (CHEVAILLER, 2006). Nas máquinas planas e tubulares, os ímãs podem ser montados na superfície ou inseridos no núcleo, também em diversas configurações: ímãs longitudinalmente sequenciais com alternância dos polos magnéticos em sentido transversal ou em sentido longitudinal e do tipo Halbach (Figura 7), onde a disposição dos ímãs é feita de tal maneira que o campo resultante se aproxima de um monopolo magnético – enquanto em uma face o campo equivale a aproximadamente 97% do total (face forte), na face oposta, se encontram somente 3% do total (HALBACH, 1983). Na distribuição convencional, o campo divide-se em 50% em cada face. Tal configuração vem sendo estudada também para aplicação em máquinas vernier (SHI, C. *et al.*, 2017; RAIHAN *et al.*, 2019; ARDESTANI; ARISH; YAGHOBI, 2020).

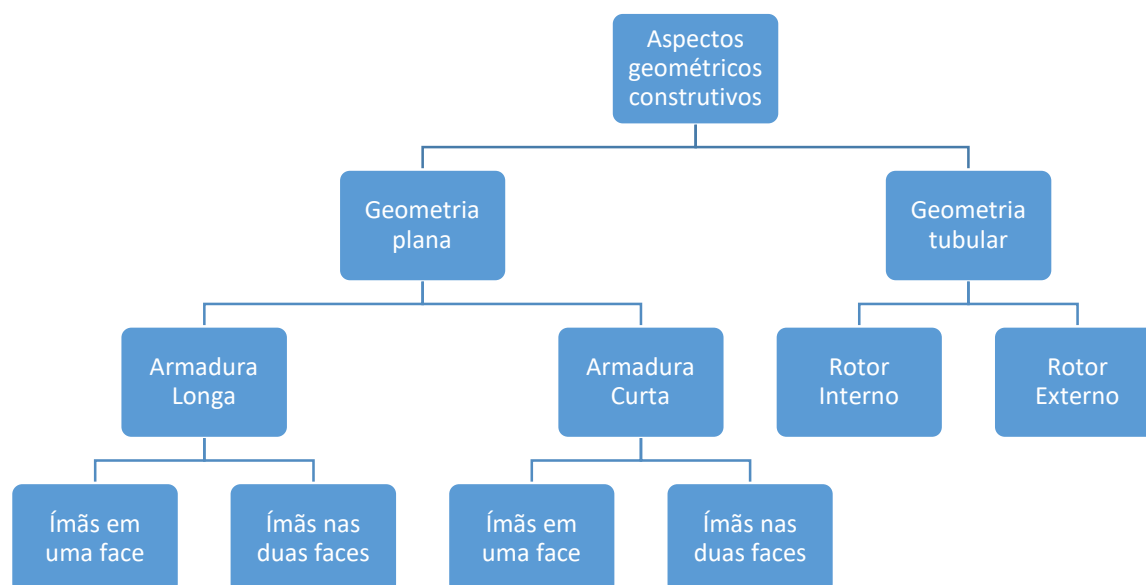
Figura 7 – Sequência simplificada de distribuição no arranjo Halbach



Fonte: Autores (2021)

Na Figura 8, são resumidos os aspectos geométricos construtivos aplicáveis às máquinas lineares.

Figura 8 – Aspectos geométricos construtivos de motores lineares



Fonte: Autores (2021), adaptado de Chevailler (2006)

O primeiro critério de classificação das máquinas eletromagnéticas se refere ao tipo de indução. Inicialmente, temos as máquinas auto-induzidas assíncronas, chamadas normalmente como de indução, onde a excitação do induzido é proveniente da fonte de energia que alimenta o campo, funcionando como um transformador (mas com atraso de fase entre os campos, denominado escorregamento), as induzidas por fontes externas, a partir de eletroímãs ou ímãs permanentes, como as máquinas de corrente contínua sem escovas, cuja alimentação tem forma retangular e gera uma força eletromagnética trapezoidal, e as máquinas síncronas (CHEVAILLER, 2006).

Máquinas de indução são muito utilizadas em sistemas de geração aonde se tenha a necessidade de operar bem em condições de variação na velocidade da fonte mecânica (CARUNAISELVANE; CHELLIAH, 2017), como no caso da energia eólica, onde se destacam os tipos gaiola de esquilo (parques eólicos com potências mais baixas) e rotor bobinado de dupla alimentação (sistemas com potências mais altas) (SGUAREZI FILHO; CARDOSO, 2014).

Cabe destacar que, apesar do baixo custo de instalação e manutenção e do fato de poderem ser interligados diretamente à rede, como sua velocidade de operação é constante e fixada pela frequência da rede e não pelo rotor, para que haja controle de potência é necessária a utilização de um sistema de controle com conversores de energia de alto custo, além de necessitarem de potência reativa para funcionar e que o rotor gire a uma velocidade superior à frequência de sincronismo (SGUAREZI FILHO; CARDOSO, 2014). No caso do gerador a indução de dupla alimentação, a instalação de um sistema de controle de velocidade aumenta a eficiência da extração da potência mecânica do vento em relação ao tipo gaiola de esquilo, mas demandam anéis e escovas para acessar o rotor, que são mais pontos suscetíveis a falhas e à manutenção (JARDIM, 2014).

Por outro lado, temos as máquinas síncronas, classe onde se encontram as máquinas do tipo vernier, nosso objeto de interesse. Estas, por sua vez, podem ser avaliadas pela simetria no número de polos nos campos primário e secundário, ou seja, se o número de polos do primário e do secundário são iguais. Neste caso, encontramos as máquinas homopolares, de fluxo transversal, de relutância e clássicas a ímãs permanentes (CHEVAILLER, 2006), que serão abordadas a seguir. Considerando a coleta da energia da arfagem da onda, as máquinas síncronas são a melhor opção para sistemas até 10kW (RHINEFRANK *et al.*, 2012). A topologia vernier, que possui número assimétrico de polos no primário e secundário, por se tratar do objeto investigado principal deste artigo, será tratada na próxima seção.

O primeiro motor homopolar foi construído por Michael Faraday, em 1821 (FARADAY, 1822); é atribuído também a ele a construção do primeiro gerador homopolar (LOSTY; LEWIS, 1973), ambos na versão rotativa. Ele é baseado na lei de Lorentz, onde a interação entre o campo magnético

gerado em um condutor pelo qual flui uma corrente elétrica com um campo magnético externo perpendicular a essa mesma corrente faz esse condutor experimentar uma força ortogonal a ambos campo externo e corrente (HAYT, JR; BUCK, 2011). Essa propriedade pode ser utilizada para movimentar um disco (motor rotativo) ou haste condutora (motor linear) e, por ser reversível, pode ser utilizado para em sistemas de geração em corrente contínua, sem a necessidade de comutadores, apenas de anéis coletores (STEWART, 2007). No entanto, este gerador não é adequado para a geração comercial de energia por ter um rendimento eletromecânico muito baixo.

Na máquina síncrona clássica a ímãs permanentes, o campo gerador é fornecido por ímãs permanentes que substituem os enrolamentos de campo nas máquinas síncronas convencionais, ficando estes normalmente instalados na parte móvel. Não necessitam, portanto, de escovas ou fonte CC, demandando menos intervenções de manutenção e exibindo melhor performance em rendimento e na relação torque/ volume que a convencional. **Possuem modelagem matemática semelhante a das máquinas trifásicas convencionais (UMANS, 2014).**

Nas máquinas de fluxo transversal (TFM, em Inglês), as cargas elétrica e magnética são desacopladas entre si, o que melhora a densidade de torque e a viabilidade de projetos multipolares. Ainda assim, a estrutura da TFM é normalmente complexa com um caminho tridimensional para o fluxo e o uso do núcleo laminado de aço silício é adequado (YANG, X. *et al.*, 2016).

O princípio básico da geração da força de propulsão em uma máquina linear de relutância é a variação da permeância no entreferro devido aos polos salientes tanto no estator quanto no translador. Considerando que não haja saturação magnética no motor, a força é proporcional ao quadrado da corrente e para que altas forças sejam alcançadas necessita de altas variações na permeância. É uma máquina ruidosa e tem baixa eficiência para entreferros maiores (CHEVAILLER, 2006). Em um gerador, tal princípio se aplica, pois, para alcançar alta permeância no entreferro de forma a induzir corrente em um nível satisfatório, necessita de grandes acelerações no translador.

No Instituto Federal Fluminense, como projeto de Iniciação Científica, está em desenvolvimento o projeto e construção de um protótipo de máquina de relutância variável a enrolamentos concentrados no estator (Figura 9). Devido a dispersão do circuito magnético aberto dada a arquitetura linear, a tensão produzida foi baixa (Figura 10). O próximo passo é a implementação da topologia vernier para realizar os testes comparativos.

Figura 9 – Protótipo de gerador de relutância variável em desenvolvimento no IFF: à esquerda, conjunto completo; à direita, detalhe de posicionamento de ímãs e bobinas



Fonte: Autores (2021)

Figura 10 – Tensão gerada no protótipo de gerador de relutância variável



Fonte: Autores (2021)

Estes três últimos tipos de máquina demandam maior frequência na variação da densidade de fluxo para que tenham rendimento satisfatório, o que as torna menos competitivas que a topologia vernier para aplicações onde se aproveite a energia capturada da arfagem de um flutuador, por exemplo (KIM, Byungtaek, 2017; LI, D. *et al.*, 2016; SHI, C. *et al.*, 2018).

### 3. A TOPOLOGIA VERNIER

O conceito original do motor vernier, cujo nome deriva da semelhança entre o seu funcionamento e o do paquímetro (*vernier caliper*, no original em inglês), dada a assimetria entre as escalas deste último, é baseado no motor de relutância polifásico, mas com um número diferente de

ranhuras no estator e no rotor. Isso faz com que, mesmo não havendo excitação no rotor, por se tratar de um motor de relutância, ao introduzir-se um campo rotativo no entreferro, este sofra uma variação brusca em sua permeância, causando um deslocamento relativamente pequeno no rotor, a uma fração definida da velocidade do campo rotativo, mas com alto torque (LEE, 1963). De maneira análoga, quando da operação da máquina como gerador, mesmo variações a baixas velocidades do rotor, se rotativo, ou do translador, no caso linear, provocam uma grande variação na permeância e, conseqüentemente, no fluxo de indução, gerando uma resposta compatível na armadura em tensão.

O baixo fator de potência das primeiras versões não inspirou muitas pesquisas sobre o motor vernier até o advento dos superímãs de terras raras, notadamente da liga neodímio-ferro-boro, que, aliado à surgente demanda por energias renováveis, abriu novos horizontes de desenvolvimento para este tipo de máquina (KIM, B.; LIPO, 2014), com o surgimento do motor vernier rotativo a ímãs permanentes (ISHIZAKI *et al.*, 1995). Nele, o estator é trifásico e o número de ranhuras do rotor é igual à soma entre o número de ranhuras e do número de pares de polos do estator, sendo que todas as ranhuras recebem ímãs permanentes enterrados com a mesma polaridade. A distribuição da densidade de fluxo magnético no entreferro é dada pela composição entre a interação entre as ranhuras do estator com os ímãs do rotor e entre as ranhuras do rotor e os ímãs do estator. O torque no rotor decorre desse fluxo e da força magnetomotriz (FMM) oriunda da corrente nos enrolamentos do estator. Essa relação de ganho de torque e redução de velocidade causada pelo fluxo no entreferro se assemelha em resultado a uma caixa de redução mecânica.

De uma maneira geral, a máquina vernier integra a classe de máquinas de modulação de fluxo, sendo um caso particular do conceito de engrenagem magnética, onde os segmentos ferromagnéticos de modulação coincidem com as ranhuras do estator, fazendo parte de um conjunto único. Ainda, os polos do rotor e do estator são distintos (CHEN, Y.; FU; WENG, 2017). Tal conceito também se aplica às contrapartes lineares, onde o torque se converte em força de impulso.

Dada a baixa frequência de oscilação das ondas do mar, com aproveitamento via boia para ondas na faixa de 0,02 e 0,485Hz (WANG, Xifeng; ICHIKAWA, 2016), a utilização da topologia Vernier em sistemas de geração de corpo flutuante de absorção pontual se mostra particularmente adequada devido a este tipo de máquina apresentar alta densidade de torque a baixas frequências. Tal topologia é adequada também para acionamento direto de sistemas eólicos em sua versão rotativa (ISHIZAKI *et al.*, 1995; KIM, B., 2019; KURBATOV; MOLOKANOV; KRYUKOV, 2014; LEE, 1963; LI, D. *et al.*, 2016; SHI, C. *et al.*, 2018; ZHANG, J. *et al.*, 2017).

Em um estudo comparativo entre um motor vernier com enrolamento de passo pleno (MVPP) e dois motores a ímãs permanentes convencionais projetados para o mesmo nível de densidade de fluxo, um de enrolamento de passo pleno (MCEPP) com o mesmo número de ranhuras do vernier e o

outro com enrolamento concentrado (MCEC) com o mesmo número de ímãs permanentes do vernier. Na Tabela 1, segue a comparação entre os 3 motores, onde foi atribuído 1 ao valor de referência de cada parâmetro (KIM, Byungtaek, 2017).

Tabela 1 – Comparação entre o MVPP, MCEPP e MCEC

Motor	Material ferromagnético no estator	Volume total	Perdas no núcleo	Fator de Potência	Potência de Saída
MVPP	>2	1,01	1	0,9	~1,8
MCEPP	2	~1,5	~2	1	1
MCEC	1	1	~2	1	1

Fonte: Autores (2021), compilado a partir de Kim (2017)

Pode-se verificar que a entrega de potência da máquina vernier é bem superior às duas topologias concorrentes, o que demonstra a vantagem de sua utilização. Cabe destacar também que seus fatores menos vantajosos não destoam tanto das arquiteturas concorrentes, se tornando impeditivos práticos para sua operação.

No que se refere à análise de torque, ao estudar através dos métodos analíticos, elementos finitos e medição de campo através da construção de protótipo, uma máquina vernier rotativa com rotor de 22 polos e estator com 12 ranhuras, pesquisadores chineses concluíram que por característica própria topologia, ainda que não haja requisitos rígidos de projeto, elas apresentam baixa ondulação no torque, podendo ficar abaixo de 0,2%. Podem superar em torque médio, ainda, as máquinas a ímãs permanentes comerciais comparadas em até 40% (LI, D. *et al.*, 2016).

A máxima densidade de torque pode ser determinada através da relação entre número de ranhuras e polos magnéticos. Considerando uma máquina vernier rotativa, uma investigação analítica, comparada com o uso do Método dos Elementos Finitos (MEF), sobre a força contraeletromotriz e sobre a potência a partir da permeância no entreferro foi realizada. Os principais fatores geométricos que influenciam a força contraeletromotriz são a razão entre a abertura da ranhura e o passo e razão entre o diâmetro e o comprimento efetivo do entreferro (KIM, B.; LIPO, 2014).

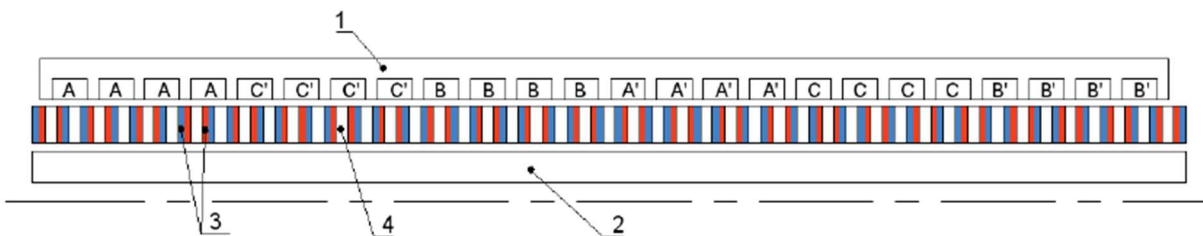
O princípio da modulação de fluxo da topologia vernier pode ser aplicado em uma diversa gama de configurações diferentes. As máquinas podem ser tubulares ou planas. As tubulares podem ter o rotor interno ou externo. As planas podem ter ímãs e enrolamentos apenas no estator, sendo o translador dentado, ou em ambos translador e estator. Essas questões geométricas aliadas à necessidade



de fluxo tornam a máquina vernier mais difícil de se projetar que as convencionais (RHINEFRANK *et al.*, 2012). A seguir, apresentamos um pequeno recorte de desenvolvimentos recentes visando diversas aplicações diferentes.

Visando a aplicação em um sistema de conversão de energia das ondas do mar, pesquisadores russos propuseram a utilização de um gerador com topologia vernier plana conforme a Figura 11, onde 1 representa o estator onde o enrolamento trifásico é instalado, 2 o núcleo do translador, 3 os ímãs permanentes e 4 os enxertos de material ferromagnético. Foi verificado que a instalação de um sistema de controle eficiente melhorou a eficiência do gerador em 102% (KURBATOV; MOLOKANOV; KRYUKOV, 2014).

Figura 11 – Topologia do gerador com topologia vernier plana



Fonte: Kurbatov; Molokanov; Kryukov (2014)

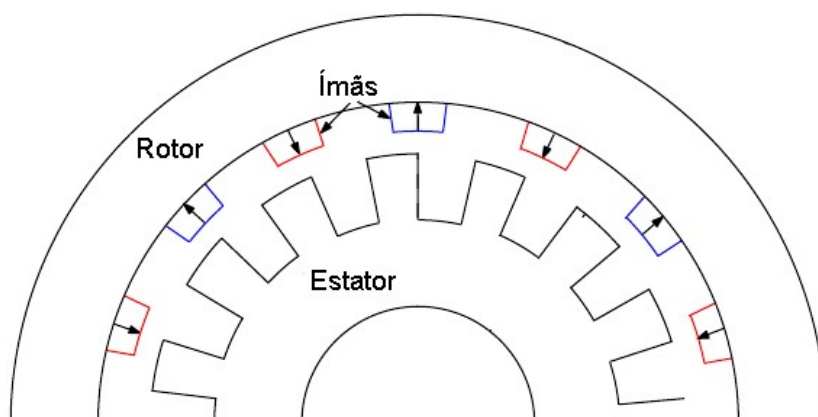
Visando um novo motor para corações artificiais que demanda alto torque com baixa frequência de operação, foi proposto o uso de um motor vernier linear com duplo estator, um interno e outro externo ao translador, deslocados de  $90^\circ$  elétricos entre si, reduzindo o atrito magnético. Tal configuração permite também o aumento do número de ímãs e, conseqüentemente, maior densidade de fluxo no entreferro, o que gera maior força de impulso, com maior confiabilidade, robustez e densidade de potência que modelos convencionais (LIU, Z. *et al.*, 2015).

O aumento do fator de potência é uma preocupação de diversos pesquisadores. A utilização de um motor rotativo com estrutura radial com duplo entreferro (interno e externo) foi proposta em resposta à perda do efeito de modulação de fluxo de uma máquina com entreferro simples, alcançando em simulação um fator de potência acima de 0,9 e mais do dobro da potência de uma máquina convencional de mesmo volume (KIM, B.; LIPO, 2016).

Os parâmetros geométricos influenciam na capacidade de torque da máquina vernier. Zhang *et al.* (2017) realizaram a otimização dos valores da espessura dos ímãs, da razão do arco do polo magnético e da razão de abertura da ranhura de forma a obter o máximo torque no modelo de máquina com rotor externo conforme seção mostrada na Figura 12. Os valores otimizados foram obtidos a partir da aplicação de algoritmos genéticos a equações validadas pelo MEF. No entanto, foi verificado que

o MEF é necessário para correção das distorções dos valores decorrentes da não-linearidade do material magnético.

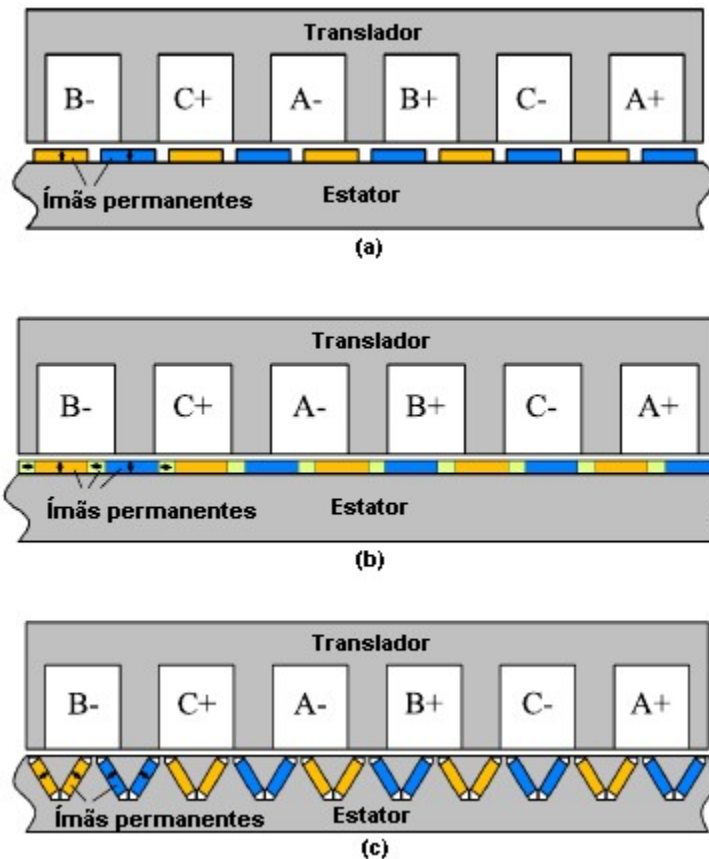
Figura 12 – Seção de máquina vernier rotativa com rotor externo



Fonte: (ZHANG, J. *et al.*, 2017), adaptado pelos Autores (2021)

Diferenças no posicionamento dos ímãs alteram a densidade de fluxo no entreferro e, conseqüentemente, o rendimento das máquinas vernier. Em comparação com máquinas vernier com transladores de mesmas dimensões, mas com ímãs permanentes montados na superfície em uma (Figura 13 (a)) e com arranjo Halbach na outra (Figura 13 (b)), a máquina vernier com ímãs enterrados (Figura 13 (c)) mostrou ter maior força de impulso e maior força contraeletromotriz com menor risco de desmagnetização dos ímãs ao garantir maior densidade de fluxo tanto no entreferro e no núcleo ferromagnético do translador (SHI, C. *et al.*, 2018).

Figura 13 - Configurações de máquinas vernier lineares: (a) com ímãs montados na superfície; (b) com ímãs montados na superfície em arranjo Halbach; (c) com ímãs internos



Fonte: Shi *et al.* (2018) adaptado pelos Autores (2021)

#### 4. PRINCIPAIS PARÂMETROS DE PROJETO DO GERADOR VERNIER

Como informado na seção 3., há várias possibilidades para o arranjo físico de um gerador vernier. A definição de qual tipo será adotado depende das características eletromecânicas requeridas na aplicação, assim como o orçamento disponível para implementação.

Ainda que tenham sido desenvolvidos inicialmente para aplicação na geração eólica, os seguintes passos, apresentados no método proposto para projeto de um gerador vernier para acionamento direto (KIM, B., 2019), podem ser adaptados e aproveitados para aplicação em fonte ondomotriz da seguinte forma:

- a. Definir a máxima potência elétrica requerida;
- b. Definir as velocidades de base e máxima de operação do gerador de acordo com as características dinâmicas decorrentes da ação do mar sobre o flutuador;
- c. Calcular, a partir daí, os parâmetros elétricos, considerando o esquema de controle do máximo torque por ampere;
- d. Em seguida, parte-se para a determinar as características geométricas do gerador em função dos parâmetros elétricos.

Diversas configurações distintas podem alcançar os requisitos elétricos de projeto, donde podem ser levados em considerações outros requisitos, tais como, entre outros, custo, melhor relação peso x potência, relação massa dos ímãs x potência, menor quantidade de material ferromagnético, menor quantidade de cobre nos enrolamentos.

Na prototipagem, alguns parâmetros geométricos podem ser determinados a partir das dimensões base de alguns elementos, tais como os ímãs permanentes.

Para realização dos testes de performance, no que for aplicável, pode ser avaliada a utilização da ABNT NBR ISO 8528-6 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014).

A determinação dos parâmetros elétricos pode ser feita considerando o efeito da engrenagem magnética. As peculiaridades geométricas e efeitos de saturação magnética da máquina reduzem a acurácia para determinação dos parâmetros eletromecânicos construtivos através de métodos analíticos (SHI, C. *et al.*, 2018) ao negligenciar a não-linearidade do comportamento magnético do motor (ZHANG, J. *et al.*, 2017); ainda que haja estudos que melhorem a determinação dos parâmetros baseados na permeância do entreferro com uso de séries harmônicas (KIM, B.; LIPO, 2014), os cálculos são complexos e de difícil otimização. Assim, sugere-se a utilização de modelagem matemática, notadamente o MEF, técnica amplamente empregada para projeto, refinamento e avaliação de máquinas elétricas diversas. Por se tratar de uma máquina de modulação de fluxo, o fluxo magnético no entreferro deve ser considerado prioritariamente.

De acordo com as condições previstas de utilização, deve ser definido um índice de proteção para o invólucro de forma a evitar danos ao equipamento e às pessoas de acordo com os limites definidos em norma (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017). Considerando a necessidade de imersão do conjunto em água salgada, sugere-se a adoção do grau IP68, sendo definida a pressão de estanqueidade conforme a lâmina d'água na qual o equipamento será instalado.

Além da estanqueidade do sistema, a proteção contra a corrosão deve ser uma preocupação, diante da agressividade da atmosfera salina e do fato da água do mar ser um excelente eletrólito para promoção de corrosão galvânica. De forma a aumentar a confiabilidade do sistema de geração e reduzir custos com manutenção, cabe uma seleção cuidadosa dos materiais e tipos de revestimento a serem adotados. Onde aplicável, o uso de materiais compósitos (resinas poliméricas reforçadas com cargas cerâmicas, como fibras de vidro, entre outras) reduzem o peso total quando comparados a materiais metálicos de mesma resistência mecânica e têm excelente resistência a esse tipo de fluido. Ligas metálicas de alta resistência à corrosão marinha, como aquelas de CuNi e aços inoxidáveis superduplex (BJØRGE HAUGAN, 2015) também podem ser utilizados, mas apresentam alto custo de aquisição. Revestimentos orgânicos de alta performance, à base de resinas epóxi (KUMARI; SAINI; DHAYAL,

2021) e poliuréia (WILSON, C. *et al.*, 2017), por exemplo, conferem grande proteção corrosiva por barreira, podendo ser alternativa para o uso do aço carbono, material de grande resistência mecânica e relativo baixo custo, mas pouco resistente às condições encontradas no mar (ADENIYI; AWOTUNDE, 2016). Revestimentos cimentícios também podem ser utilizados (LI, G. *et al.*, 2017), mas agregam mais peso que os revestimentos orgânicos. Em resumo, a seleção de materiais e revestimentos depende da interação com os demais parâmetros geométricos e do orçamento disponível.

Ainda considerando as premissas adotadas, diferentes métodos de controle e proteção do conjunto gerador podem ser previstos. Ainda que sejam definidos limites de operação de acordo com as condições ambientais históricas, deve-se considerar a possibilidade de ocorrência de eventos extraordinários, que possam levar à operação fora das condições normais de projeto e, conseqüentemente, a danos nos equipamentos. Sugere-se avaliar a instalação, no mínimo, de controle de sobrevelocidade, em caso de frequência de oscilação marítima excessiva, sobretensão, para proteção do gerador, sobrecorrente, evitando sobreaquecimento na máquina, e freios dinâmicos para acelerações acima do limite estabelecido.

Dada a característica própria de baixo fator de potência das máquinas vernier, há uma tendência para acumular maior energia reativa no sistema e, conseqüentemente, maior formação de correntes parasitas, o que pode gerar aquecimento excessivo do sistema. Deste modo, deve ser dada especial atenção ao circuito de arrefecimento do gerador, pois, em caso de geração de calor acima do permitido nos parâmetros de projeto, além de reduzir a eficiência e capacidade de carga do equipamento, pode levar à desmagnetização dos ímãs. Além disso, fatores de potência inferiores ao limite estabelecido pela legislação brasileira (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2010), o que pode acarretar em dificuldades para integrá-la ao sistema de geração distribuída. Devem ser projetados sistemas de correção de fator de potência através de bancos de capacitores e sistemas de retificação/inversão de potência, de forma a compatibilizar a energia gerada com a rede.

A Tabela 2 apresenta os principais parâmetros e características a serem considerados no projeto do gerador:

Tabela 2 – Parâmetros e Requisitos dos sistemas

	Parâmetros/ Requisitos	Unidade
	Período médio das ondas	[s]
	Altura máxima das Ondas	[m]
Especificações do sistema	Frequência máxima das ondas	[Hz]
	Temperaturas mínima e máxima da água do mar	[°C]

	Lâmina d'água	[m]
	Velocidade das ondas	[m.s <sup>-1</sup> ]
Material	Ímãs em liga de NdFeB	
	Classe dos ímãs	
	Estator e Translador em aço silício	
Parâmetros Geométricos	Peso máximo	[N]
	Área da seção transversal	[m <sup>2</sup> ]
	Comprimento do estator	[m]
	Comprimento do translador	[m]
	Passo polar	[mm]
	Entreferro	[mm]
	Aceleração Máxima do translador	[m.s <sup>-2</sup> ]
	Temperatura Máxima de Operação	[°C]
	Curso do translador	[m]
	Número de ranhuras do estator	
	Profundidade das ranhuras do estator	[mm]
	Número de ranhuras do translador	
	Profundidade das ranhuras do translador	[mm]
	Comprimento dos ímãs	[mm]
	Largura dos ímãs	[mm]
Profundidade dos ímãs	[mm]	
Parâmetros elétricos	Número de fases	
	Número de polos	
	Número de bobinas	
	Bitola dos fios (AWG)	
	Tensão Elétrica em vazio	[V]
	Tensão Elétrica com carga máxima	[V]
	Corrente Máxima por fase	[A]
	Potência Ativa Máxima	[W]
	Frequência	[Hz]
	Fator de potência mínimo	
Fator de trabalho	[%]	

Passo das bobinas	[mm]
Campo remanescente dos ímãs	[T]
Quantidade de ímãs no estator	
Quantidade de ímãs no rotor	
Densidade de fluxo magnético no entreferro	[T]
Permeância do entreferro	[H]
Modulação de fluxo requerida	

---

*Fonte: Autores (2021)*

## 5. CONCLUSÃO

As ondas do mar se constituem uma fonte de energia viável e perene, e pesquisas para sua utilização estão em franco desenvolvimento em várias partes do mundo. A variação de altura das ondas favorece a utilização de conversores de energia das ondas do tipo absorvedor pontual, adequados ao funcionamento em um ou mais graus de liberdade e podem ser adaptados de acordo com a localização em relação à costa (se em mar aberto, próximo à costa ou na região costeira).

A utilização de tomadas de força de acionamento direto aumenta a eficiência dos acoplamentos entre conversor de energia e gerador elétrico, aumentando o aproveitamento da energia mecânica e reduzindo custos de implantação e manutenção, o que reduz o custo total da energia gerada, tornando o sistema de geração mais competitivo em relação a outros sistemas mais bem estabelecidos. Assim, justifica-se a utilização de geradores lineares em complemento aos absorvedores pontuais.

A característica própria das ondas do mar na costa brasileira aponta a necessidade de utilização de sistemas que apresentem bom desempenho com operação em baixas frequências, o que remete ao uso da topologia vernier como escolha natural. Geradores vernier apresentam grandes variações na permeância do entreferro com pouca variação no curso do translador, o que se traduz na indução da armadura com maior densidade de potência e com menor demanda de material ferromagnético no núcleo. Este trabalho apresentou um recorte bibliográfico sobre máquinas lineares a ímãs permanentes, descrevendo as características das principais classes, a saber, máquinas homopolares, clássicas a ímãs permanentes, de relutância, de fluxo transversal e de modulação de fluxo – vernier, todas síncronas, incluindo uma breve comparação com as máquinas assíncronas (de indução).

Dentre as máquinas vernier, pode-se constatar que as características geométricas influenciam diretamente na permeância do entreferro e, conseqüentemente, a eficiência da máquina. Podemos

destacar a disposição dos ímãs permanentes e as relações entre as dimensões das ranhuras e do entreferro como as principais.

A utilização de métodos numéricos nos processos de avaliação, comparação e otimização de configurações geométricas é de suma importância, pois os efeitos de não-linearidade dos ímãs permanentes reduzem a acurácia dos métodos analíticos de solução das equações. O MEF, por ter muito boa precisão e alta disponibilidade em *softwares* comerciais, é o método mais utilizado nas pesquisas sobre o tema.

Apesar de suas vantagens, a topologia vernier apresenta algumas desvantagens. O projeto deve buscar evitar a possibilidade de saturação do núcleo, caso no qual a relutância aumenta e reduz a eficiência da máquina. A presença da energia reativa, que reduz o fator de potência e o torna inferior às demais máquinas síncronas a ímãs permanentes, leva ao aquecimento do núcleo e, em caso deste ser excessivo, pode, entre outros danos, desmagnetizar os ímãs. Essa situação pode ser contornada através de melhorias construtivas, como apontam algumas pesquisas, ou da instalação de bancos de capacitores para correção do fator de potência.

De forma a viabilizar a geração distribuída de sistemas que utilizam este tipo de gerador, permitindo a integração à rede elétrica das concessionárias, deve ser previsto um sistema de controle e de condicionamento da energia gerada.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A ENERGIA QUE VEM DO MAR. **Coppe na Rio + 20**, [s.d.]. Disponível em: <<http://www.coppenario20.coppe.ufrj.br/?p=805>>. Acesso em: 2 mar. 2021.

ADENIYI, A. S.; AWOTUNDE, M. A. Corrosion Susceptibility of a 0.35%C Steel in Seawater Electrolyte Using the Electrochemical Method. **International Journal of Engineering Research in Africa**, dez. 2016. v. 27, p. 20–26. Disponível em: <<https://www.scientific.net/JERA.27.20>>. Acesso em: 14 mar. 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. REN 414/2010. RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 414, DE 9 DE SETEMBRO DE 2010. . 9 set. 2010, p. 293.

AL SHAMI, E.; ZHANG, R.; WANG, Xu. Point Absorber Wave Energy Harvesters: A Review of Recent Developments. **Energies**, jan. 2019. v. 12, n. 1, p. 47. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/12/1/47>>. Acesso em: 16 dez. 2020.



ARDESTANI, M.; ARISH, N.; YAGHOBI, H. A new HTS dual stator linear permanent magnet Vernier machine with Halbach array for wave energy conversion. **Physica C: Superconductivity and its Applications**, fev. 2020. v. 569, p. 1353593. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921453419303089>>. Acesso em: 4 mar. 2021.

ASSIS, J.; ARAÚJO, M. B.; SERRÃO, E. A. Projected climate changes threaten ancient refugia of kelp forests in the North Atlantic. **Global Change Biology**, 1 jan. 2018. v. 24, n. 1, p. e55–e66. Disponível em: <<https://onlinelibrary-wiley.ez135.periodicos.capes.gov.br/doi/full/10.1111/gcb.13818>>. Acesso em: 5 jan. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 8528-6. Grupos geradores de corrente alternada acionados por motores alternativos de combustão interna Parte 6: Métodos de Ensaio. . 16 dez. 2014, p. 20.

\_\_\_\_\_. ABNT NBR IEC 60529:2017. Graus de proteção providos por invólucros (Códigos IP). . 24 abr. 2017, p. 49.

BACHELET, E. **Levitating transmitting apparatus**. Disponível em: <<https://patents.google.com/patent/US1020943A/en?q=Levitating+Transmitting+Apparatus&inventor=emile+bachelet&oq=Levitating+Transmitting+Apparatus+emile+bachelet>>. Acesso em: 4 mar. 2021.

BESERRA, E. R. **AVALIAÇÃO DE SÍTIOS PARA O APROVEITAMENTO DOS RECURSOS ENERGÉTICOS DAS ONDAS DO MAR**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007. Doutorado. . Acesso em: 2 jan. 2021.

BJØRGE HAUGAN, E. Pitting and Crevice Corrosion of Super Duplex Stainless Steels in Seawater - Effect of Tungsten. **267**, 2015. Disponível em: <<https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2350313>>. Acesso em: 14 mar. 2021.

BOLDEA, I.; NASAR, S. A. Permanent-magnet linear alternators part 1: Fundamental equations. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, jan. 1987a. v. AES-23, n. 1, p. 73–78.

\_\_\_\_\_; \_\_\_\_\_. Permanent-Magnet Linear Alternators Part II: Design Guidelines. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, jan. 1987b. v. AES-23, n. 1, p. 79–82.

BOLT Lifesaver runs over 50 days at 100% uptime. **Offshore Energy**, 12 dez. 2018. Disponível em: <<https://www.offshore-energy.biz/bolt-lifesaver-runs-over-50-days-at-100-uptime/>>. Acesso em: 2 mar. 2021.

BOWERS, B.; WILSON, M. **Sir Charles Wheatstone FRS: 1802-1875**. [S.l.]: IET, 2001.

CARUNAISELVANE, C.; CHELLIAH, T. R. Present trends and future prospects of asynchronous machines in renewable energy systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, jul. 2017. v. 74, p. 1028–1041. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032116307894>>. Acesso em: 14 mar. 2021.

CHEN, Y.; FU, W.; WENG, X. A Concept of General Flux-Modulated Electric Machines Based on a Unified Theory and Its Application to Developing a Novel Doubly-Fed Dual-Stator Motor. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, dez. 2017. v. 64, n. 12, p. 9914–9923.

CHEVAILLER, S. **Comparative study and selection criteria of linear motors**. Lausanne, Suisse: ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE, 2006. Disponível em: <<http://infoscience.epfl.ch/record/85797>>. Acesso em: 4 mar. 2021.

CRUZ, J. M. B. P.; SARMENTO, A. J. N. A. **Energia das Ondas: introdução aos aspectos tecnológicos, económicos e ambientais**. Alfragide: Instituto do Ambiente, 2004.

CURTIS, A. Magnetic river mixes lift and thrust. **New Scientist**, 28 jun. 1973. v. 58, n. 852, p. 805. Disponível em: <[https://books.google.com.br/books?id=S0nn3r855xsC&printsec=frontcover&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q=eastham&f=false](https://books.google.com.br/books?id=S0nn3r855xsC&printsec=frontcover&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q=eastham&f=false)>. Acesso em: 1º mar. 2021.

DAWSON, G. E. *et al.* Design of Linear Induction Drives by Field Analysis and Finite-Element Techniques. **IEEE Transactions on Industry Applications**, set. 1986. v. IA-22, n. 5, p. 865–873.

DIPLING, H. K. **Schwebbahn mit raederlosen Fahrzeugen, die an eisernen Fahrschienen mittels magnetischer Felder schwebend entlang gefuehrt werden.** Disponível em: <<https://patents.google.com/patent/DE643316C/en?assignee=Hermann+Kemper&oq=Hermann+Kemper>>. Acesso em: 3 jan. 2021a.

DIPLING, H. K. **Schwebbahn mit raederlosen Fahrzeugen, die mittels magnetischer Felder an eisernen Fahrschienen schwebend entlang gefuehrt werden.** Disponível em: <<https://patents.google.com/patent/DE644302C/en?assignee=Hermann+Kemper&oq=Hermann+Kemper>>. Acesso em: 3 jan. 2021b.

EGMONT, L. B. F. D'. **AValiação de um dispositivo conversor de energia de ondas do mar e o papel das patentes nos projetos de engenharia.** Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017. Graduação. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10019485.pdf>>. Acesso em: 8 mar. 2021.

FARADAY, M. New Electro-magnetic apparatus. **Quarterly Journal of Science, Literature and the Arts**, 1822. 1822. p. 186–187. Disponível em: <<http://archive.org/details/quarterlyjournal12jour>>. Acesso em: 3 jan. 2021.

FRANCHINI, M.; MANNUCCI, P. M. Impact on human health of climate changes. **European Journal of Internal Medicine**, 1 jan. 2015. v. 26, n. 1, p. 1–5. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.ez135.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0953620514003628>>. Acesso em: 5 jan. 2021.

GIERAS, J.; DAWSON, G.; EASTHAM, A. Performance calculation for single-sided linear induction motors with a double-layer reaction rail under constant current excitation. **IEEE Transactions on Magnetics**, jan. 1986. v. 22, n. 1, p. 54–62.

GIERAS, J. F. Simplified theory of double-sided linear induction motor with squirrel-cage elastic secondary. **IEE Proceedings B Electric Power Applications**, 1983. v. 130, n. 6, p. 424. Disponível em: <<https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/ip-b.1983.0063>>. Acesso em: 4 mar. 2021.

HALBACH, K. Permanent Multipole Magnets with Adjustable Strength. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, ago. 1983. v. 30, n. 4, p. 3323–3325.

HAYT, JR, W. H.; BUCK, J. A. **Eletromagnetismo**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda., 2011.

HU, Y. *et al.* Electromagnetic Loss Analysis of a Linear Motor System Designed for a Free-Piston Engine Generator. **Electronics**, abr. 2020. v. 9, n. 4, p. 621. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2079-9292/9/4/621>>. Acesso em: 3 mar. 2021.

IDA, N.; ROEMER, L. E. A magnetostrictive motor. **Journal of Applied Physics**, 15 abr. 1988. v. 63, n. 8, p. 3989–3990. Disponível em: <<https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.340572>>. Acesso em: 18 dez. 2020.

ISHIZAKI, A. *et al.* Theory and optimum design of PM Vernier motor. *In*: 1995 SEVENTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL MACHINES AND DRIVES (CONF. PUBL. NO. 412), 1995, , [s.l.] . **Anais...** [S.l.]: [s.n.], 1995. p. 208–212.

JARDIM, A. S. **UTILIZAÇÃO DE MÁQUINA DE INDUÇÃO DUPLAMENTE ALIMENTADA SEM ESCOVAS (BDFM) COMO GERADOR EÓLICO**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <<http://www.monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10012471.pdf>>. Acesso em: 2 maio 2021.

JOULE, J. P. On the effects of magnetism, &c., upon dimensions of iron and steel bars. **The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**. New and united series of the philosophical magazine, annals of Philosophy, and journal of science. CXCIX ed. London: [s.n.], 1847, V. XXX.

KIM, B. Design Method of a Direct-Drive Permanent Magnet Vernier Generator for a Wind Turbine System. **IEEE Transactions on Industry Applications**, set. 2019. v. 55, n. 5, p. 4665–4675.

\_\_\_\_\_; LIPO, T. A. Operation and Design Principles of a PM Vernier Motor. **IEEE Transactions on Industry Applications**, nov. 2014. v. 50, n. 6, p. 3656–3663.

\_\_\_\_\_; \_\_\_\_\_. Analysis of a PM Vernier Motor With Spoke Structure. **IEEE Transactions on Industry Applications**, jan. 2016. v. 52, n. 1, p. 217–225.

KIM, Byungtaek. Design of a PM Vernier Machine with Consideration for Modulation Flux and Comparison with Conventional PM motors. **Energies**, 9 nov. 2017. v. 10, n. 11, p. 1819. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1996-1073/10/11/1819>>. Acesso em: 8 jan. 2021.

KUMARI, S.; SAINI, A.; DHAYAL, V. Metal oxide based epoxy coatings for corrosion protection of steel. **Materials Today: Proceedings**, 3 mar. 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785321006799>>. Acesso em: 10 mar. 2021.

KURBATOV, P.; MOLOKANOV, O.; KRYUKOV, K. Design of a prototype of PM vernier electrical generator with power electronic unit for a wave energy plant. *In*: 2014 16TH INTERNATIONAL POWER ELECTRONICS AND MOTION CONTROL CONFERENCE (PEMC), 2014, Antalya, Turkey. **Anais eletrônicos...** Antalya, Turkey: IEEE, 2014. p. 1053–1058. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6980648/>>. Acesso em: 4 jan. 2021.

LAITHWAITE, E. Linear Motors for High-Speed Vehicles. **New Scientist**, 28 jun. 1973. v. 58, n. 852, p. 802–805. Disponível em: <[https://books.google.com.br/books?id=S0nn3r855xsC&printsec=frontcover&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q=eastham&f=false](https://books.google.com.br/books?id=S0nn3r855xsC&printsec=frontcover&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q=eastham&f=false)>. Acesso em: 2 mar. 2021.

LAITHWAITE, Eric R. **A History of Linear Electric Motors**. London: Macmillan Education UK, 1987.

LAITHWAITE, Eric Roberts. **Induktionsmotor mit mindestens einem Statorteil mit ebener Statorfläche und einem längs der Statorfläche linear beweglichen Organ**. Disponível em: <<https://patents.google.com/patent/CH356190A/en?inventor=eric+laithwaite&num=100&sort=old>>. Acesso em: 3 jan. 2021.

LEE, C. H. Vernier Motor and Its Design. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, jun. 1963. v. 82, n. 66, p. 343–349.

LI, D. *et al.* Analysis of Torque Capability and Quality in Vernier Permanent-Magnet Machines. **IEEE Transactions on Industry Applications**, jan. 2016. v. 52, n. 1, p. 125–135.

LI, G. *et al.* Study on the resistance to seawater corrosion of the cementitious systems containing ordinary Portland cement or/and calcium aluminate cement. **Construction and Building Materials**, dez. 2017. v. 157, p. 852–859. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061817320081>>. Acesso em: 14 mar. 2021.

LIU, Z. *et al.* A Novel Double-Stator Tubular Vernier Permanent-Magnet Motor With High Thrust Density and Low Cogging Force. **IEEE Transactions on Magnetics**, jul. 2015. v. 51, n. 7, p. 1–7.

LOSTY, H. H. W.; LEWIS, D. L. Homopolar Machines. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences**, 1973. v. 275, n. 1248, p. 69–75. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/74299>>. Acesso em: 5 jan. 2021.

MAGALHÃES, A. S.; DOMINGUES, E. P. Aumento da eficiência energética no Brasil: uma opção para uma economia de baixo carbono? | Economia Aplicada. **Economia Aplicada**, 1 set. 2016. v. 20(3), p. 273–310. Disponível em: <<http://www.revistas.usp.br/ecoa/article/view/124395>>. Acesso em: 5 jan. 2021.

MAJIDNIYA, M. *et al.* Performance simulation by a nonlinear thermodynamic model for a Free Piston Stirling Engine with a linear generator. **Applied Thermal Engineering**, fev. 2021. v. 184, p. 116128. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431120336085>>. Acesso em: 3 mar. 2021.

MARTÍNEZ, M. *et al.* Modelling and simulation of wave energy hyperbaric converter (WEHC) for applications in distributed generation. **International Journal of Hydrogen Energy**, out. 2012. v. 37, n. 19, p. 14945–14950. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319912003175>>. Acesso em: 2 mar. 2021.

MCNUTT, M. Climate Change Impacts. **Science**, 2 ago. 2013. v. 341, n. 6145, p. 435–435. Disponível em: <<https://science-sciencemag-org.ez135.periodicos.capes.gov.br/content/341/6145/435>>. Acesso em: 5 jan. 2021.

PACHECO, C. J. **APLICAÇÃO DE MATERIAIS COM MAGNETOSTRICÇÃO GIGANTE EM SENSORES DE DESLOCAMENTO SEM CONTACTO**. Rio de Janeiro, Brazil: PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO, 2007. MESTRE EM FÍSICA. Disponível em: <[http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/Busca\\_etds.php?strSecao=resultado&nrSeq=11023@1](http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/Busca_etds.php?strSecao=resultado&nrSeq=11023@1)>. Acesso em: 18 dez. 2020.

PECHER, A.; KOFOED, J. P. (Org.). **Handbook of Ocean Wave Energy**. [S.l.]: Springer International Publishing, 2017.

QUEIROZ, Z. Usina de ondas do Pecém está abandonada. **Jornal dos Municípios**, 30 set. 2014. Disponível em: <<https://jornaldosmunicipios.com.br/noticias/municipios/usina-de-ondas-do-pecem-esta-abandonada/>>. Acesso em: 9 mar. 2021.

RAIHAN, M. A. H. *et al.* Development of low translator mass linear Vernier machine for wave energy power take off. **The Journal of Engineering**, jul. 2019. v. 2019, n. 18, p. 5224–5228. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/joe.2018.9304>>. Acesso em: 4 mar. 2021.

RHINEFRANK, K. *et al.* Comparison of Direct-Drive Power Takeoff Systems for Ocean Wave Energy Applications. **IEEE Journal of Oceanic Engineering**, jan. 2012. v. 37, n. 1, p. 35–44.

RICARTE, E. DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVOS DE CONVERSÃO DE ENERGIAS MARINHAS. **Cadernos de Energia /PPE – Programa de Planejamento Energético**, ago. 2017. n. 5, p. 80.

SQUAREZI FILHO, A.; CARDOSO, J. G. Energia eólica: tipos de geradores e conversores usados atualmente. **O Setor Elétrico**, maio. 2014. v. 9, n. 100, p. 160–161. Disponível em: <[https://issuu.com/revistaosetoreletrico/docs/ed-100\\_maio\\_2014/55](https://issuu.com/revistaosetoreletrico/docs/ed-100_maio_2014/55)>. Acesso em: 4 mar. 2021.

SHADMAN, M. *et al.* Ocean Renewable Energy Potential, Technology, and Deployments: A Case Study of Brazil. **Energies**, jan. 2019. v. 12, n. 19, p. 3658. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/12/19/3658>>. Acesso em: 16 dez. 2020.

SHI, C. *et al.* A Novel Linear Permanent Magnet Vernier Machine With Consequent-Pole Permanent Magnets and Halbach Permanent Magnet Arrays. **IEEE Transactions on Magnetics**, nov. 2017. v. 53, n. 11, p. 1–4.

\_\_\_\_\_ *et al.* Design and Analysis of an Interior Permanent Magnet Linear Vernier Machine. **IEEE Transactions on Magnetics**, nov. 2018. v. 54, n. 11, p. 1–5.

SILVA, E. F. D. E *et al.* UM ESTUDO SOBRE O APROVEITAMENTO DA ENERGIA DOS OCEANOS - ENERGIA DAS ONDAS: RENOVÁVEL, ECONOMICAMENTE VIÁVEL E LIMPA. *In: XII CONFERÊNCIA DE ESTUDOS EM ENERGIA ELÉTRICA, 2014, Uberlândia - MG. Anais eletrônicos...* Uberlândia - MG: Universidade Federal de Uberlândia, 2014. p. 6. Disponível em: <[https://www.peteletricaufu.com/static/ceel/doc/artigos/artigos2014/ceel2014\\_artigo041\\_r01.pdf](https://www.peteletricaufu.com/static/ceel/doc/artigos/artigos2014/ceel2014_artigo041_r01.pdf)>. Acesso em: 15 dez. 2020.

SOLOMON, S. *et al.* Persistence of climate changes due to a range of greenhouse gases. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, 26 out. 2010. v. 107, n. 43, p. 18354–18359. Disponível em: <<https://www-pnas.ez135.periodicos.capes.gov.br/content/107/43/18354>>. Acesso em: 5 jan. 2021.

SPANNER, K. Survey of the Various Operating Principles of Ultrasonic Piezomotors. **Actuator 2006**, 2006. p. 8. Disponível em: <[https://www.pi-usa.us/fileadmin/user\\_upload/pi\\_us/files/technotes\\_whitepapers/Actuator2006\\_SurveyoftheVariousOperatingPrinciplesofUltrasonicPiezomotors\\_c.pdf](https://www.pi-usa.us/fileadmin/user_upload/pi_us/files/technotes_whitepapers/Actuator2006_SurveyoftheVariousOperatingPrinciplesofUltrasonicPiezomotors_c.pdf)>. Acesso em: 18 dez. 2020.

STEIN, W. **Transport And Diffusion Across Cell Membranes**. London, UK: Elsevier, 1986.

STEWART, S. M. Algumas experiências simples de demonstração envolvendo motores homopolares. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, 2007. v. 29, n. 2, p. 275–281. Disponível em:



<[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S1806-11172007000200012&lng=en&nrm=iso&tlng=en](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1806-11172007000200012&lng=en&nrm=iso&tlng=en)>. Acesso em: 3 jan. 2021.

UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley - 7.ed.** Porto Alegre: AMGH Editora, 2014.

VICENTE, P. C.; FALCÃO, A. F. O.; JUSTINO, P. A. P. Nonlinear dynamics of a tightly moored point-absorber wave energy converter. **Ocean Engineering**, fev. 2013. v. 59, p. 20–36. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0029801812004179>>. Acesso em: 3 mar. 2021.

WANG LEI; TAN JIU-BIN; ZHANG SHAN. A giant magnetostrictive actuator based on use of permanent magnet. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, maio. 2010. v. 46, n. 9–12, p. 893–897. Disponível em: <<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=aph&AN=47885074&site=ehost-live>>. Acesso em: 3 mar. 2021.

WANG, Xifeng; ICHIKAWA, K. Effect of High-Frequency Sea Waves on Wave Period Retrieval from Radar Altimeter and Buoy Data. **Remote Sensing**, 1 set. 2016. Disponível em: <<https://doaj.org>>. Acesso em: 5 jan. 2021.

WILLIAMS, F. C.; LAITHWAITE, Eric Roberts. **Improvements in and relating to induction machines.** Disponível em: <<https://patents.google.com/patent/GB760250A/en?inventor=eric+laithwaite&num=100&sort=old>>. Acesso em: 3 jan. 2021.

WILSON, C. *et al.* **Implementation of polyurea applications for wastewater system corrosion-mitigation projects : final report on Project F15-AR04.** [S.l.]: Construction Engineering Research Laboratory (U.S.), 2017. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11681/22761>>. Acesso em: 14 mar. 2021.

WORLD ENERGY COUNCIL. **World Energy Resources 2016.** London: [s.n.], 2016.

XIE, Y. *et al.* High-efficiency ballistic electrostatic generator using microdroplets. **Nature Communications**, 7 abr. 2014. v. 5, n. 1, p. 1–5. Disponível em: <<https://www-nature.ez135.periodicos.capes.gov.br/articles/ncomms4575>>. Acesso em: 7 jan. 2021.

YANG, X. *et al.* Torque Characteristic Analysis of a Transverse Flux Motor Using a Combined-Type Stator Core. **Applied Sciences**, 8 nov. 2016. v. 6, n. 11, p. 342. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2076-3417/6/11/342>>. Acesso em: 3 jan. 2021.

ZEHDEN, A. **Electric traction apparatus.** Disponível em: <<https://patents.google.com/patent/US782312A/en>>. Acesso em: 3 jan. 2021.

ZESHENG DENG; BOLDEA, I.; NASAR, S. Fields in permanent magnet linear synchronous machines. **IEEE Transactions on Magnetics**, mar. 1986. v. 22, n. 2, p. 107–112.

ZHANG, J. *et al.* Quantitative Design of a High Performance Permanent Magnet Vernier Generator. **IEEE Transactions on Magnetics**, nov. 2017. v. 53, n. 11, p. 1–4.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS DA DISSERTAÇÃO

A partir dos pontos investigados nesta pesquisa de dissertação, conclui-se que são temas relevantes para investigações futuras em trabalhos subsequentes:

- Requisitos legais e normativos para incentivo de implementação de novas tecnologias renováveis para geração distribuída;
- Avaliação da viabilidade técnica e econômica considerando a instalação de uma planta de energia termosolar concentrada na região de atuação do PPEA, centro-norte do Estado do Rio de Janeiro;
- Utilização de máquinas do ciclo Stirling para viabilizar sistemas compactos de energia termosolar concentrada;
- Projeto de sistema de controle e condicionamento de energia para geradores vernier lineares para aplicação em conversores de energia das ondas;
- Projeto e implementação de protótipo de gerador linear para aproveitamento de energia ondomotriz em ambiente real.