



Bruno Gomes Mansur

**Metodologia para estimar o impacto do
potencial de geração fotovoltaica nos
projetos Minha Casa Minha Vida na
operação do sistema elétrico brasileiro**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Urbana e Ambiental.

Orientador: Prof. Rodrigo Flora Calili

Rio de Janeiro
Agosto de 2018



Bruno Gomes Mansur

**Metodologia para estimar o impacto do
potencial de geração fotovoltaica nos
projetos Minha Casa Minha Vida na
operação do sistema elétrico brasileiro**

Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do grau de Mestre pelo Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e
Ambiental da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão
Examinadora abaixo assinada.

Prof. Rodrigo Flora Calili

Orientador

Programa de Pós-graduação em Metrologia - PUC-Rio

Prof. Reinaldo Castro Souza

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

Prof. Marcio Zamboti Fortes

Universidade Federal Fluminense – UFF

Prof. Márcio da Silveira Carvalho

Coordenador Setorial do
Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 15 de agosto de 2018.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem a autorização da universidade, do autor e do orientador.

Bruno Gomes Mansur

Gradou-se em Engenharia de Produção pela Universidade Veiga de Almeida (UVA) em 2010. Atualmente, trabalha na área de Energia.

Ficha Catalográfica

Mansur, Bruno Gomes

Metodologia para estimar o impacto do potencial de geração fotovoltaica nos projetos Minha Casa Minha Vida na operação do sistema elétrico brasileiro / Bruno Gomes Mansur ; orientador: Rodrigo Flora Calili. – 2018.

114 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)—Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental, 2018.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Civil – Teses. 2. Engenharia Urbana e Ambiental – Teses. 3. Energia solar. 4. Geração fotovoltaica. 5. Habitação social. 6. Programa Minha Casa Minha Vida. 7. Operação do sistema elétrico brasileiro. I. Calili, Rodrigo Flora. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental. III. Título.

CDD: 624

Agradecimentos

Ao meu orientador, Prof. Dr. Rodrigo Flora Calili, por ter aceitado a orientação dessa temática bem como seu direcionamento ao longo de nossas conversas.

Ao professor Celso Romanel que sempre me foi solícito durante todo o curso.

A todos os colegas de curso que não fecharam a porta quando precisei. Em especial a Jorcelino Rinalde de Paulo, Artur Willcox, Patricia Antunes e aos queridos secretários Paula Enoy e Bruno Reis que sempre quebraram um galho (mas sempre de forma ecologicamente correta).

A uma pessoa que dedicou seu tempo, talento, apoio, amizade e paciência me ajudando nesse trabalho. Obrigado mais uma vez pela força meu amigo Frederico Felipe Medeiros. Sou muito grato por sua amizade.

A Fernando Correa que me deu um norte com informações sobre Energia Solar, após minha decepção com a dificuldade de dados sobre Resíduos Sólidos.

Ao professor e consultor Hans Rauschmayer que me recebeu em seu lar e me concedeu muito além de uma entrevista, uma aula sobre energia solar.

À Gerente Executiva Senhora Mara Luísa Alvim Motta que me concedeu parte do seu tempo em me receber no escritório da Caixa Econômica Federal em Brasília-DF, para fornecer fatos, números e valores muito além do alcance do Google sobre o programa Minha Casa Minha Vida nos condomínios “Praia do Rodeadouro” e “Morada do Salitre”. Embora não participaram como tema central desse trabalho, mas promoveram ideias para o presente trabalho e futuros.

Aos colegas de trabalho Thiago Felício de Souza e Ana Lucia Gouveia de Sabóia pelas conversas e valiosas contribuições na reta final do trabalho.

A todos, meu sincero muito obrigado!

Resumo

Mansur, Bruno Gomes; Calili, Rodrigo Flora (Orientador). **Metodologia para estimar o impacto do potencial de geração fotovoltaica nos projetos Minha Casa Minha Vida na operação do sistema elétrico brasileiro**. Rio de Janeiro, 2018. 114p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A energia fotovoltaica é uma fonte de energia em constante expansão. Apesar de o Brasil possuir índice de irradiação solar superior aos encontrados na maioria dos países europeus, esta é uma fonte pouco explorada em nossa matriz elétrica. O governo federal por intermédio do programa Minha Casa Minha Vida (MCMV) busca proporcionar a uma ampla parcela da população de baixa renda o acesso à casa própria. Desde seu lançamento foram entregues 2,5 milhões de casas e o governo estima que para os próximos anos serão construídas mais dois milhões de novas moradias. Não há dúvida da sinergia que se pode ter em aliar um programa que atenda o déficit habitacional a programas ambientais geradores de energia limpa para complementação ao sistema elétrico brasileiro. O presente trabalho tem por objetivo estimar impacto do potencial de geração de energia obtida caso houvesse a inclusão de um programa de geração de energia fotovoltaica dentro do projeto MCMV. Foram propostos seis cenários da inserção da energia fotovoltaica na operação do sistema que foram comparados com o caso de referência de janeiro de 2018. De maneira geral, a inserção da energia fotovoltaica advinda do Programa MCMV traria benefícios relevantes para o sistema brasileiro, reduzindo o custo da geração, o risco de um possível déficit, além de contribuir com a sustentabilidade, uma vez que esta fonte de energia é limpa e renovável e contribuiria socialmente para uma parcela da população que não teria dinheiro para investir em energia solar fotovoltaica.

Palavras-chave

Energia Solar; Geração Fotovoltaica; Habitação Social; Programa Minha Casa Minha Vida; Operação do Sistema Elétrico Brasileiro.

Extended Abstract

Mansur, Bruno Gomes; Calili, Rodrigo Flora (Advisor). **Methodology to estimate the impact of photovoltaic generation potential on the “Minha Casa Minha Vida” projects in the operation of the Brazilian electricity system.** Rio de Janeiro, 2018. 114p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Introduction

The world seeks new forms to mitigate the dependence of fossil fuels and emissions of effect gases greenhouse. The climatic changes and the possible scarcity of the oil force the search for new forms of energy generation.

The solar energy, object of this work, is one of the sources of energy generation in constant expansion, according to the Global Market Outlook for Solar 2016-2020 report. Each country, including Brazil, must by means of iNDC (intended Nationally Determined Contribution) define the policies to be adopted to reduce and to remove the emissions of gases greenhouse (GHG), contributing for the Paris agreement.

According to the Brazilian Atlas of Solar Energy (INPE, 2017), although Brazil to possess index of superior solar irradiation to the found ones in the majority of the European countries, it is a power plant little explored, currently in the electrical matrix corresponds only the 0.93 GW, which corresponds, 0.59% of all electrical matrix (ANEEL, 2018), but its projection for 2024 indicates to a growth of 7 GW, around 3.3% (EPE, 2015b) of all the electrical matrix. Brazil tends to become more competitive in the solar market, since there is the attempt to purify the silicon, here in Brazil, at UNICAMP, that is, avoiding to export raw materials to import after the silicon purified.

Parallel to the growth of photovoltaic energy, Brazil has the MCMV program that aims to facilitate the access to the property of the less wealthy classes of society, the program has since delivered more than 2.5 million homes and estimates the hiring of more two million. The program does not aim at the rational use of the matrix, it is mainly concerned with the issue of housing shortages in the country. Despite, it is glimpsed possibility to include in its target a program of generation of clean energy for the layers most devoid of the society.

This could create a program of popular dwelling with environmentally sustainable lines of direction.

Probably, one of the reasons for not including issues related to the generation of clean energy in the "Minha Casa Minha Vida" dwellings is the usual thinking that such an element could excessively burden the construction costs, and may even increasing the costs of access to housing and maybe distort the program. Although housing may have its costs increased at an early stage, it should not be overlooked that such initial costs may be ignored in the long term by the economy derived from the use of solar energy, in addition to estimating the impact of that generation on the expansion of the Brazilian electric system.

Objectives

Considering the issue that Brazil has great potential for generating solar energy due to high irradiance rates and is still an unexplored energy source, parallel to the effort to diversify our electrical matrix, this dissertation has the main objective to estimate the impact of the potential of photovoltaic generation in the "Minha Casa Minha Vida" projects in the operation of the Brazilian electrical system, since there are an estimated two million new homes to be built by the government. The specific objectives are:

- Identify and describe the studies considering the impact of photovoltaic generation on the operation of the system;
- Define the scenarios of photovoltaic generation of the "Minha Casa Minha Vida";
- Simulate the Monthly Operation Program (Programa Mensal de Operação - PMO) in Brazil via NEWAVE model, considering the selected scenarios of photovoltaic generation in the "Minha Casa Minha Vida" Program.

Methodology

The present work has the purpose of estimating the potential of photovoltaic energy generation within the scope of the "Minha Casa Minha Vida" program. Methodologically, the work was divided into three stages. The first phase is related to the research and description of the operation of the photovoltaic system in Brazil and in the world. At this stage, it was also necessary to document

the most important regulations of the electricity sector related to the photovoltaic system. In addition, some standards linked to the “Minha Casa Minha Vida” program were also designed to contextualize the possible positive synergy between clean energy generation and the MCMV program.

The second step of the work has a quantitative and descriptive character, where the data of the research are evaluated, mapping of the solar resource in the study area, use of the techniques of scenario analysis to estimate the electric potential to be generated if it were possible to link the MCMV program to a clean energy generation program. For this second phase, the data provided by “Caixa Econômica Federal” (CAIXA) containing the characteristics of the dwellings comprised by the governmental program in question was used. With the numerical inputs derived from the data provided by CAIXA, the software NEWAVE is used, because it is the widely used program for planning and advising the Brazilian electricity sector.

In the third stage, the interpretation and formulation of the conclusions were done, considering the works and results obtained with the generation of solar energy within the MCMV program.

Considerations for solar energy

Photovoltaic energy in addition to being renewable, its use considerably reduces CO₂ emissions, which has generated interest worldwide (Zhang et al., 2011). It should be noted that the use of solar energy can be seen as a generation mechanism complementary to the conventional system and not as a mode of concurrent generation. Photovoltaic energy is also part of the main actions taken in the Energy Efficiency Program considered by Brazilian Regulation of Electric Energy (Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL), as well as the installation of solar heaters (replacement of electric showers) in hospitals, day care centers and nursing homes (Calili, 2013).

Although many good points have been seen, it is necessary to be aware that there are negative aspects of the photovoltaic production chain. Even though it is a renewable and inexhaustible source of energy, photovoltaic panels present high investment costs, an important point to be considered in the project implementation. In addition, since everything that is produced at any given

moment becomes waste, it is also necessary to think about the appropriate disposal of the panels discarded by failure or exhaustion.

China is the world leader in production of solar energy in the world, with an installed capacity of 43.4 GW, accounted for in 2015, and according to the report, Global Market Outlook for Solar 2016-2020 your estimate for 2020 is 130.3 GW. Followed by Germany, which has been growing in the renewable energy market, with strong encouragement from government policies (Zhang et al., 2011). It has an installed capacity of 39.7 GW with an estimate of 48.4 GW. Japan account with 34.3 GW of installed capacity and an estimate 63.3 MW. The U.S. even though they have the second largest projection with 85.3 GW for 2020, its capacity accounted for by the end of 2015 was at 25.9 GW.

The planning of operation in Brazil

In addition to the minimization of investment costs and operating costs, the main elements contained in medium and long-term planning are: studies and projections of the Brazilian electrical matrix, execution of studies that allow the integrated planning of energy resources, analyzes of the technical-economic and socio-environmental feasibility of the power plants, as well as obtaining the environmental license for hydroelectric and electricity transmission projects under the aegis of the EPE, which is a company linked to the MME (CCEE, 2014).

A chain of mathematical and computational models (Maceira et al., 2016) was developed by "CEPEL (a Brazilian Center of Electric Energy Research) to plan the operation and expansion of the electric system. The basic principle of these models is to operate the hydroelectric power plants of the system, deciding which one should be dispatched, in order to reduce the use of thermal generation power plant, activities that are coordinated by the National System Operator (Operador Nacional do Sistema - ONS), which aims to operate the system more efficiently, so as also to contribute to the reduction of operating costs and deficit risks.

"Minha Casa Minha Vida (MCMV)" Program

The MCMV program was launched by the Federal Government in March 2009, in partnership with states, municipalities, companies and non-profit organization. The program aims to facilitate the access to the property of the less

wealthy classes of society in urban and rural areas, alleviating the problem of the housing deficit in the country and changing the lives of thousands of Brazilian families (Vale et al. 2017). The worker with market interest would obtain a housing financing at a rate of 11%, ends up having access to financing at reduced rates ranging from 5.0% to 7.5% (Portal Brasil, 2016) depending on the range of income that the family finds. The government through subsidy and reduced rates provides a greater ability to finance the property. The program has since delivered 2.5 million homes, and the government estimates that over two million new homes will be built over the next two years.

Scenarios for study of the photovoltaics

As estimates for the coming years, three scenarios were elaborated with two cases to analyze the insertion of photovoltaic energy in the MCMV program. Base scenario, optimistic and pessimistic for the case without continuation of the program and with continuation of the program after the initial two years. The base scenario was estimated to be 500.000 less than the government projection of two million new homes (Portal Brasil, 2016). For the optimistic scenario was maintained the projection of the government for of two million new homes built the next years, and the pessimistic scenario was estimated one million dwellings less than the Brazilian government projection.

Projection of the energy surplus in social housing

The calculation of the design of the solar photovoltaic project was carried out in social housing in order to meet the demand of 90 kWh/month and generate a surplus of 5% more in the Brazilian regions. Regardless of the solarimetric index adopted in the regions of Brazil, the results for these regions are the same, three modules of 275 W will be needed, injecting in the network 5% more per residence (equivalent to a total generation of 94.5 kWh/month), considering that the measures are linear.

Results

All simulations of the study scenarios of the insertion of photovoltaic energy in the operation of the system were compared with the case provided by ONS, referring to the month of January 2018, which was called "official round".

Based on this official round, it is possible to make a comparison of the simulations with the insertion of solar energy with the MCMV Program with the actual simulation considering the operating premises adopted by the ONS in the system. Were evaluated, the expected Value of the Total Cost of Operation, Marginal Cost of Operation, Deficit Risk, Thermal Generation and Hydraulic Generation, of the evaluated scenarios, without the continuation and with continuation of the MCMV program from 2020.

In general, the insertion of photovoltaic energy from the MCMV Program would bring significant benefits to the Brazilian system, reducing the cost of generation, the risk of a possible deficit, and contributing to sustainability, since this energy source is clean renewable and would contribute socially to a portion of the population which would not have the money to invest in photovoltaic solar energy.

Conclusion

Considering the photovoltaic generation potential on the "Minha Casa Minha Vida" projects in the operation of the Brazilian electric system, the insertion of photovoltaic energy was beneficial to the system, whether in the economy generated with the result of the Total Cost of Operation, reduction of the energy price in the short-term energy price (spot price), with the reduction of the Marginal Cost of Operation, the reduction of the Risk of Deficit and the reduction of Thermal Generation. There is no doubt of the synergy that can be had in allying a program that addresses the housing deficit to environmental programs generating clean energy for expansion of the Brazilian electrical system. The inclusion of photovoltaic solar energy in the Brazilian electric matrix besides contributing to sustainability, since this source of energy is clean and renewable, would contribute socially to a portion of the population that would not have the money to invest in photovoltaic panels.

It is necessary to take into account that all planning of insertion of photovoltaic energy in the Brazilian electrical system is done with an thought of complementarity to the system, since our matrix is mainly hydraulic and has uncertainties as to the availability of water in the reservoirs. It is necessary that our matrix has dispatchable energy in which there is control of generation

moments, regardless of local climatic conditions, a factor that solar energy does not have.

There may be voices against the deployment of photovoltaic panels in housing under aegis of increase the cost the program and this cost cannot be passed on to buyers of housing. By means of the generated savings of the Expected Value of the Total Cost of Operation in any scenario studied, future studies can be proposed to the "Caixa Econômica Federal", Ministry of Mines and Energy and Ministry of Cities (who is charge of MCMV Program) comparing the value of the added photovoltaic systems in the dwellings and the economy obtained from the insertion of this energy in the operation of the Brazilian electrical system, compared to other sources (hydro, thermal, wind, etc.).

For the present study, only one roof area was used in the residences, with the installation of panels occupying an area of 4.95 m², simulating a generation of 5% more of the demand. As an indication for future works, a 10% increase in demand can be simulated, since there is space in the roof of the residences for a possible doubling of the occupied area with the photovoltaic panels. It can also be simulated beyond homes, buildings and housing complexes, which may have sources of energy from wind and solar integration.

Keywords

Solar Energy; Photovoltaic Generation; Social Housing; “Minha Casa Minha Vida” Program; Operation of the Brazilian Electric System.

Sumário

1	Introdução	21
1.1	Definição do problema de pesquisa	23
1.2	Motivação	24
1.3	Objetivo	24
1.4	Metodologia da Pesquisa	25
1.5	Estrutura do documento	28
2	Considerações sobre a Energia Fotovoltaica	29
2.1	Cenário Fotovoltaico no Mundo	32
2.2	Cenário Fotovoltaico no Brasil	35
2.3	O Sistema de Geração Distribuída	38
2.4	Mecanismos de incentivo à energia solar fotovoltaica	40
2.5	Comercialização da energia solar fotovoltaica	42
2.6	Considerações sobre o capítulo	45
3	O Planejamento da Expansão e Operação da Geração no Brasil	46
3.1	Demanda de Energia	49
3.2	Capacidade Instalada de Geração no Brasil	50
3.3	Cadeia de Modelos do Planejamento da Operação	50
3.4	Modelo NEWAVE	51
3.5	Modelo DECOMP	53
3.6	Modelo DESSEM	54
3.7	Considerações sobre o capítulo	55
4	Metodologia	56
4.1	O Programa Minha Casa Minha Vida (MCMV)	57
4.2	Faixa de renda para o Programa (MCMV)	58
4.3	Tipo de habitação social proposto no estudo e a média de consumo das edificações	59
4.4	O Programa MCMV nas regiões do Brasil	61
4.5	Mapeamento de energia solar nas regiões do Brasil	61

4.6 Cenários para estudo da inserção da energia fotovoltaica	62
4.7 Dimensionamento do Projeto Solar Fotovoltaico	64
4.7.1 Cálculo do Dimensionamento Projeto Solar Fotovoltaico	65
4.7.2 Projeção do excedente de energia nas habitações sociais	66
4.8 Simulação dos cenários de estudo	70
5 Resultados	72
5.1 Valor esperado do Custo Total de Operação	72
5.2 Custo Marginal de Operação (CMO)	75
5.3 Risco de Déficit	86
5.4 Geração Térmica	90
5.5 Geração Hidráulica	94
5.6 Discussão dos Resultados	98
6 Conclusão e Trabalhos Futuros	100
7 Referências bibliográficas	102
Apêndice A	111

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Consumo de energia per capita (kWh/hab)	49
Tabela 2 - Capacidade instalada de geração elétrica (GW)	50
Tabela 3 - Renda familiar mensal	59
Tabela 4 - Cenário Base	63
Tabela 5 - Cenário Otimista	63
Tabela 6 - Cenário Pessimista	63
Tabela 7 - Tipos de módulos fotovoltaicos	64
Tabela 8 - Potencial solar diária média nas regiões brasileiras	65
Tabela 9 - Resultado do Dimensionamento Solar Fotovoltaico	67
Tabela 10 - Cenário Base – 1,5 milhão de novas residências	68
Tabela 11 - Cenário Otimista – 2 milhão de novas residências	68
Tabela 12 - Cenário Pessimista – 1 milhão de novas residências	68
Tabela 13 - Cenário Base – 3,7 milhões de novas residências	69
Tabela 14 - Cenário Otimista – 5 milhões de novas residências	69
Tabela 15 - Cenário Pessimista – 2,5 milhões de novas residências	69
Tabela 16 - Valor esperado do custo total de operação nos cenários	73
Tabela 17 - Médias do CMO por cenários	77
Tabela 18 - Percentual médio de redução do CMO no subsistema SE	79
Tabela 19 - Percentual médio de redução do CMO no subsistema S	81
Tabela 20 - Percentual médio de redução do CMO no subsistema NE	83
Tabela 21 - Percentual médio de redução do CMO no subsistema N	85
Tabela 22 - Comparativo percentual médio de redução de Risco de Déficit	88
Tabela 23 - Comparativo percentual médio de redução de Risco de Déficit	90
Tabela 24 - Percentual médio de redução de geração térmica	93
Tabela 25 - Percentual médio de aumento e redução de geração hidráulica	97

Lista de Figuras

Figura 1 - Desenho da Pesquisa	27
Figura 2 - Os Principais Poluidores Mundiais – Gases de Efeito Estufa	30
Figura 3 - Capacidade Global de Energia Solar	33
Figura 4 - Ranking Mundial – Capacidade Instalada Total e Projeção 2016-2020	34
Figura 5 - Queda dos Custos de Energia Renovável	35
Figura 6 - Projeção e Expansão no Brasil	36
Figura 7 - Matriz Elétrica 2018	37
Figura 8 - Matriz Elétrica 2024	37
Figura 9 - O Sistema de Geração Distribuída	39
Figura 10 - Mecanismos de incentivos criados à energia solar fotovoltaica	42
Figura 11 - Fluxograma do mercado de energia	44
Figura 12 - Estudos de Planejamento	47
Figura 13 - Agentes institucionais do Setor Elétrico Brasileiro	48
Figura 14 - Cadeia de modelos do CEPEL	51
Figura 15 - Fluxograma do modelo NEWAVE	53
Figura 16 - Principais entradas e saídas do modelo DECOMP	54
Figura 17 - Etapas da metodologia proposta	56
Figura 18 - Casas Construídas	58
Figura 19 - Casas Populares	60
Figura 20 - O programa MCMV em território Nacional	61
Figura 21 - Síntese dos níveis de irradiação solar por região	62
Figura 22 - Horizonte de estudo do NEWAVE sem ampliação do programa MCMV	71
Figura 23 - Horizonte de estudo do NEWAVE com ampliação do programa MCMV	71
Figura 24 - Valor esperado do custo total de operação nos cenários sem ampliação do programa MCMV	73
Figura 25 - Valor esperado do custo total de operação nos cenários com ampliação do programa MCMV	74
Figura 26 - Resultados dos casos com e sem ampliação do programa MCMV	75

Figura 27 - Médias da rodada oficial	76
Figura 28 - Percentual de variação de CMO no subsistema SE no caso sem ampliação	78
Figura 29 - Percentual de variação de CMO no subsistema SE no caso com ampliação	79
Figura 30 - Percentual de variação de CMO no subsistema S no caso sem ampliação	80
Figura 31 - Percentual de variação de CMO no subsistema S no caso com ampliação	81
Figura 32 - Percentual de variação de CMO no subsistema NE no caso sem ampliação	82
Figura 33 - Percentual de variação de CMO no subsistema NE no caso com ampliação	83
Figura 34 - Percentual de variação de CMO no subsistema N no caso sem ampliação	84
Figura 35 - Percentual de variação de CMO no subsistema N no caso com ampliação	85
Figura 36 - Risco de déficit para o subsistema sudeste	86
Figura 37 - Risco de déficit para o subsistema sul	87
Figura 38 - Risco de déficit separado por subsistemas	87
Figura 39 - Risco de déficit para o subsistema sudeste	88
Figura 40 - Risco de déficit para o subsistema sul	89
Figura 41 - Risco de déficit separado por subsistemas	89
Figura 42 - Total geração térmica sem ampliação do programa MCMV	90
Figura 43 - Percentual de variação de geração térmica sem ampliação do programa MCMV	91
Figura 44 - Total geração térmica com ampliação do programa MCMV	92
Figura 45 - Percentual de variação de geração térmica com ampliação do programa MCMV	93
Figura 46 - Total geração hidráulica sem ampliação do programa MCMV	94
Figura 47 - Percentual de variação de geração hidráulica sem ampliação do programa MCMV	95
Figura 48 - Total geração hidráulica com ampliação do programa MCMV	96
Figura 49 - Percentual de variação de geração hidráulica com ampliação do programa MCMV	97

Lista de abreviaturas e siglas

ACL – Ambiente de Contratação Livre
ACR – Ambiente de Contratação Regulada
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
APE – Autoprodutores
CAIXA – Caixa Econômica Federal
CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CEPEL – Centro de Pesquisa de Energia Elétrica
CGHs – Centrais de Geração Hidrelétrica
CMO – Custo Marginal de Operação
CMSE – Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico
CNPE – Conselho Nacional de Política Energética
CVU – Custo Variável Unitário
ENA – Energia Natural Afluente
EPE – Empresa de Pesquisa Energética
FGTS – Fundo de Garantia do Tempo de Serviço
GD – Geração Distribuída
GEE – Gases do Efeito Estufa
ICMS – Imposto sobre a Circulação de Mercadorias e Serviços
IEA – International Energy Agency
iNDC – intended Nationally Determined Contribution
INPE – Instituto de Pesquisas Espaciais
IPI – Imposto sobre Produtos Industrializados
LER – Leilões de Energia Reserva
MCMV – Minha Casa Minha Vida
MME – Ministério de Minas Energia
ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico
PCHs – Pequenas Centrais Hidrelétricas

PDDE – Programação Dual Estocástica

PDE – Plano Decenal de Expansão de Energia

PEE – Programa Eficiência Energética

PLD – Preços de Liquidação das Diferenças

PMO – Programa Mensal de Operação

PREVMERCADO – Previsão do Mercado

PRODEEM – Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios

ProGD – Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica

REW – Renewable Energy World

SIN – Sistema Interligado Nacional

UHE – Usina Hidrelétrica

UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas

WRI – World Resource Institute

*“Muitas vezes o que aparentemente
é um fracasso pode ser exatamente
a razão de um grande sucesso futuro”*

(Anônimo)

1

Introdução

O mundo procura novas formas de mitigar a dependência dos combustíveis fósseis e de emissões de gases de efeito estufa. As mudanças climáticas e a possível escassez do petróleo forçam a busca por novas formas de geração de energia.

O Acordo de Paris, no qual o Brasil ratificou, tem por objetivos: (i) assegurar que o aumento da temperatura média global fique abaixo de 2°C, acima dos níveis pré-industriais e prosseguir os esforços para limitar o aumento da temperatura a 1,5°C; (ii) cortar as emissões de gases de efeito estufa em 37% até 2025, com indicativo de redução de 43% até 2030. Ambos em comparação aos níveis de 2005; (iii) aumentar a participação de fontes renováveis na matriz energética e recuperar e reflorestar áreas desmatadas (Portal Brasil, 2016).

Cada país, inclusive o Brasil, deve por meio do iNDC (*intended Nationally Determined Contribution*), definir quais são as políticas que pretende adotar para reduzir e remover as emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE), contribuindo para o acordo de Paris. Em relação ao setor de energia, o Brasil deve alcançar uma participação estimada de 45% de energias renováveis na composição da matriz energética em 2030 e expandir o uso de fontes renováveis, além da energia hídrica, na matriz total de energia para uma participação de 28% a 33% até 2030 (EPE, 2016).

A energia solar, objeto deste trabalho é uma das fontes de geração de energia em constante crescimento, conforme relatório *Global Market Outlook for Solar* 2016-2020.

De acordo com Atlas Brasileira de Energia Solar (INPE, 2017) apesar de o Brasil possuir índice de irradiação solar superior aos encontrados na maioria dos países europeus, ainda é uma fonte de energia pouco explorada. No entanto, o custo, a falta de financiamento específico para a compra dos equipamentos

solares, agravado pela pouca consciência ambiental de nossa população, acaba por gerar um baixo dinamismo do setor brasileiro de geração de energia fotovoltaica.

No Brasil, um estudo de Projeção da demanda de energia elétrica feito pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) a expectativa é que de 2016 a 2020 haja um aumento de cinco milhões de domicílios no país (EPE, 2015c).

Em 2009 foi lançado o Programa Minha Casa Minha Vida (MCMV) pelo Governo Federal em parceria com estados, municípios, empresas e entidades sem fins lucrativos, que tem por objetivo facilitar as condições de acesso ao imóvel próprio de classes menos abastadas da sociedade, amenizando o problema do déficit habitacional no país.

Este programa já entregou, desde seu lançamento 2,5 milhões de moradias. O governo brasileiro estima a contratação de mais dois milhões de novas moradias para os próximos dois anos (Portal Brasil, 2016).

O programa não tem por objeto o uso racional da matriz, preocupa-se principalmente com a questão da carência de moradias no país. Não obstante, vislumbra-se a possibilidade de incluir em seu escopo um programa de geração de energia limpa para as camadas mais carentes da sociedade. Isto poderia criar um programa de habitação popular com diretrizes ambientalmente sustentáveis.

Provavelmente, uma das razões para a não inclusão de questões relacionadas à geração de energia limpa nas habitações do Minha Casa Minha Vida é o pensamento corriqueiro de que tal elemento poderia onerar em demasia os custos de construção das habitações, podendo até aumentar os custos de acesso às habitações e desvirtuar o programa. Ainda que as habitações possam ter seus custos onerados num primeiro momento, não se deve negligenciar a possibilidade de que tais custos iniciais podem ser cobertos no longo prazo pela economia derivada do uso de energia solar além da estimativa do impacto dessa geração na expansão do sistema elétrico brasileiro. Acredita-se que os painéis poderiam ser incluídos no financiamento, com seus custos elevados de implantação sendo diluídos ao longo dos anos. Isto poderia abranger milhares de famílias carentes e até mesmo localidades onde não se faz presente à rede de energia.

O presente trabalho tem por objetivo estimar o impacto de geração de energia, caso haja inclusão de um programa de geração de energia fotovoltaica dentro do projeto MCMV, ou seja, caso a estimativa do governo de construção de mais dois milhões de novas moradias para o programa utilizassem os painéis

fotovoltaicos. Assim, nesta dissertação, será estimado o impacto da geração de energia solar fotovoltaica de futuros projetos imobiliários de baixa renda na estrutura do sistema elétrico brasileiro. Este estudo objetiva balizar a junção da ideia de necessidade de programas de erradicação do déficit habitacional com a urgência de uma política pública de geração de energia limpa, mais especificamente fotovoltaica.

1.1

Definição do problema de pesquisa

O mundo moderno apresentou um processo de expansão sem precedentes dos níveis de consumo de energia nas últimas décadas. O processo contínuo de urbanização de diversas regiões do planeta, o crescimento populacional ainda significativo ao redor do mundo, são fatores que têm ocasionado pressões ambientais sem precedentes na história.

No Brasil segundo a EPE estima-se que o crescimento da população Brasileira mantenha-se a uma média de 0,7% a.a. entre 2016 e 2020, passando a ter 212 milhões de habitantes no final do período, com crescimento aproximado de 6 milhões (EPE, 2015c).

Com o crescimento populacional e os constantes aumentos da demanda de energia, faz-se necessário buscar por novas formas de geração de energia limpa, dentre elas a solar tema deste trabalho. Além disso, o uso da energia solar também pelas classes sociais menos abastadas revela-se elemento chave de um processo de desenvolvimento econômico material atrelado a um processo de inclusão social e conscientização ambiental em larga escala.

O presente trabalho pode-se estender e abranger milhares de famílias carentes e até mesmo localidades onde não se faz presente à rede de energia, ou seja, não há dúvida da grande sinergia que se pode ter em aliar um programa que atenda o déficit habitacional a programas ambientais geradores de energia limpa para complementação ao sistema elétrico brasileiro. Em síntese pode-se traduzir na seguinte questão de pesquisa: “Qual seria o impacto da energia fotovoltaica em projetos do Programa Minha Casa Minha Vida na operação do sistema de geração de energia no Brasil?”.

1.2 Motivação

Por ser um recurso abundante e renovável, a energia solar apresenta-se como um processo de geração bastante promissor para as próximas décadas. Segundo o relatório *Global Market Outlook for Solar 2016-2020*, a capacidade solar global instalada pode crescer para mais de 600 GW até 2020.

É uma forma de energia que gera menor impacto ambiental comparado à criação de usinas hidroelétricas e a utilização de termelétricas, contribuindo assim para ampliação da geração de energia por fontes renováveis e para a redução de emissões de GEE.

Outro motivo a se considerar para justificar o uso da energia solar é que o Brasil segundo *World Resource Institute* (WRI, 2015), está entre 10 maiores emissores de GEE, além de ser signatário do acordo de Paris (iNDC, 2015), onde se comprometeu a reduzir os GEE em até 37% até 2025 (Portal Brasil, 2016).

Deve-se vislumbrar o sistema fotovoltaico como um mecanismo de geração complementar ao sistema convencional, não como um modo de geração concorrente, uma vez que se trata de uma fonte intermitente, mas que possui grande potencial para o Brasil.

A motivação do trabalho está centrada na redução do custo de energia das pessoas que integram o programa MCMV, reduzindo o comprometimento da renda familiar com a conta de energia, aumentando assim o poder aquisitivo destas famílias menos abastadas. Além disso, a utilização de painéis fotovoltaicos reduziriam as perdas não técnicas e a inadimplência no sistema de distribuição de energia, mitigando estes dois grandes problemas que as distribuidoras de energia e a sociedade brasileira enfrentam.

Por fim, o fato de se usar a energia solar, contribui para o processo de construção mais sustentável ainda está à margem das principais políticas energéticas no Brasil.

1.3 Objetivo

Seguindo a ótica de nosso país ter um grande potencial de geração de energia solar devido aos altos índices de irradiação e de ainda ser uma fonte de energia pouco explorada, paralelo ao esforço da diversificação de nossa matriz

elétrica, esta dissertação tem o objetivo principal estimar o impacto do potencial de geração fotovoltaica nos projetos Minha Casa Minha Vida na operação do sistema elétrico brasileiro, uma vez que existe a estimativa de dois milhões de novas residências a serem construídas pelo governo. Os objetivos específicos são:

- Identificar e descrever os estudos sobre o impacto da geração fotovoltaica na operação do sistema;
- Definir os cenários de geração fotovoltaica do Programa Minha Casa Minha Vida;
- Simular o Programa Mensal de Operação (PMO) no Brasil via modelo NEWAVE, considerando os cenários de geração fotovoltaica no Programa Minha Casa Minha Vida.

1.4

Metodologia da Pesquisa

Segundo Vergara (Vergara, 2007), podemos adotar dois critérios de classificação de pesquisa: em relação aos fins e aos meios. No que diz respeito aos fins classifica-se a pesquisa como descritiva, expondo com detalhes a metodologia usada para estimar o potencial de geração fotovoltaica do programa Minha Casa Minha Vida; metodológica, utiliza-se a parte descritiva para análise, avaliação e manipulação dos dados; aplicada, pois se utiliza de métodos quantitativos para geração de novo conhecimento em relação ao tema. Em relação aos meios pode-se classificar como bibliográfica, devido as pesquisa feitas nas bases de dados; experimental, pela necessidade de manipular e tratar as variáveis ligadas com o objeto do estudo (impacto da geração fotovoltaica em comunidades baixa renda integrantes do programa MCMV) e por buscar o entendimento da metodologia atual através modelos estatísticos e de otimização. Por fim, essa pesquisa pode ser classificada como de natureza quantitativa, e foi dividida em três fases, conforme Figura 1.

O presente trabalho tem por finalidade estimar o potencial de geração de energia fotovoltaica dentro do escopo do programa Minha Casa Minha Vida. Com isso, metodologicamente dividiu-se o trabalho em três etapas. A primeira fase relaciona-se à pesquisa e descrição do funcionamento do sistema fotovoltaico no Brasil e no mundo. Nesta fase, fez-se necessário também comentar as mais importantes regulamentações do setor elétrico relacionados ao sistema

fotovoltaico. Além disso, algumas normas ligadas ao programa Minha Casa Minha Vida também foram detalhadas para contextualizar a possível sinergia positiva entre a geração de energia limpa e o programa MCMV.

A segunda fase do trabalho tem caráter quantitativo e descritivo, onde são avaliados os dados da pesquisa, mapeamento do recurso solar na área de estudo, utilização das técnicas de análise de cenários para estimação do potencial elétrico a ser gerado caso fosse possível atrelar o programa MCMV a um programa de geração de energia limpa. Para esta segunda fase, foram utilizados os dados fornecidos pela Caixa Econômica Federal (CAIXA) contendo as características de domicílios compreendidos pelo programa governamental em comento. De posse dos insumos numéricos derivados dos dados fornecidos pela (CAIXA), é utilizado o software NEWAVE, tendo em vista ser este o programa de amplo uso para planejamento e assessoramento do Setor Elétrico Brasileiro.

Na terceira etapa, tem-se a interpretação e elaboração das conclusões das pesquisas e resultados obtidos com a geração de energia solar dentro do programa MCMV.

Em síntese, a abordagem descritiva do sistema fotovoltaico e do MCMV, e a abordagem quantitativa utilizadas no trabalho unem-se para apresentar elementos inovadores de uma possível sinergia positiva entre um programa governamental de moradia popular com um programa possível de geração de energia limpa.

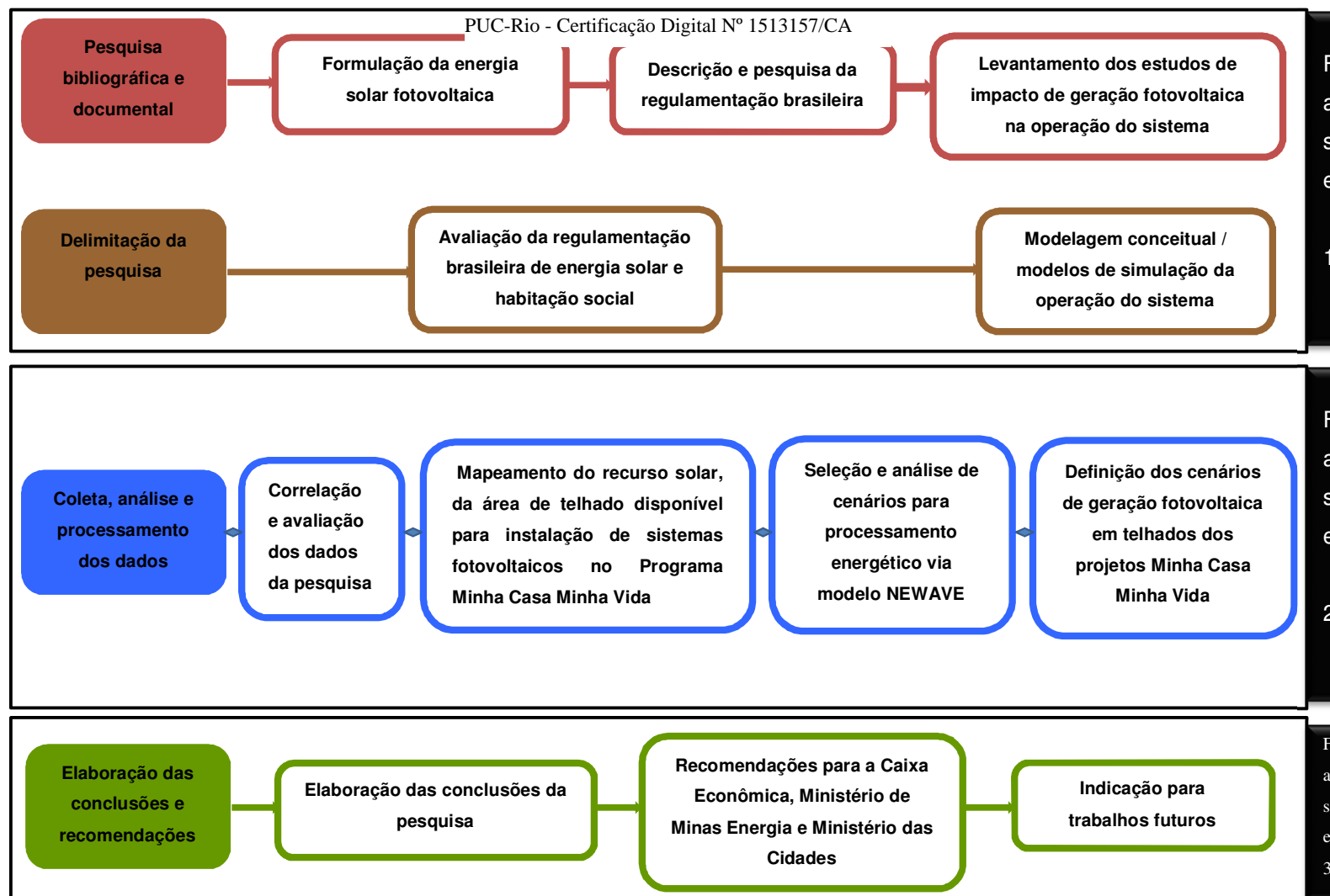


Figura 1 - Desenho da Pesquisa
Fonte: Elaboração própria

1.5

Estrutura do documento

O presente trabalho está organizado em seis capítulos. O primeiro capítulo compreende a introdução, definição do problema, motivação, objetivo, a metodologia aplicada e a estruturação do documento.

No segundo capítulo é contextualizada a energia fotovoltaica, o cenário da energia no mundo e no Brasil. São detalhadas as resoluções que regem a comercialização de energia fotovoltaica. O sistema de geração distribuída e os mecanismos existentes para o incentivo a energia fotovoltaica.

No terceiro capítulo é detalhado o planejamento da expansão e operação da geração no Brasil, a demanda de energia e a capacidade instalada de geração no Brasil. É apresentado a cadeia de modelos do Planejamento da Operação. O modelo NEWAVE utilizado para planejamento de médio prazo com horizonte de cinco anos. O modelo DECOMP utilizado para planejamento de curto prazo com um horizonte de tempo de até doze meses com discretização semanal para o primeiro mês e mensal para os demais. E o modelo DESSEM com programação diária com discretização horária.

O quarto capítulo é detalhado o Programa Minha Casa Minha Vida, as faixas de renda disponíveis, os tipos de habitações sociais do programa, o estudo médio de consumo das edificações e sua distribuição no Brasil. O capítulo também analisa o mapeamento da energia solar no Brasil, os cenários para estudo da inserção da energia fotovoltaica, o dimensionamento e cálculo do projeto solar fotovoltaico, a projeção do excedente de energia nas habitações sociais e as simulações dos cenários estudados.

Já o quinto capítulo são apresentados e analisados todos os resultados do estudo, gerados pelo modelo NEWAVE. Resultados para o caso sem ampliação do programa e com ampliação do programa. Sendo o Valor esperado do Custo Total de Operação, o Custo Marginal de Operação (CMO), Risco de Déficit, Geração Térmica, Geração Hidráulica, além da discussão de todos os resultados apresentados.

No sexto e último capítulo são apresentadas as considerações finais e as recomendações de trabalhos futuros, identificando seus possíveis desdobramentos.

Considerações sobre a Energia Fotovoltaica

A crise do petróleo deflagrada pelo primeiro choque do petróleo incentivou vários governos a financiar e a promover a busca de novas fontes de energia que gerassem menor impacto ambiental comparado à criação de usinas hidroelétricas e a utilização de termelétricas. Na década de 70, segundo Reis (2011), houve um grande impulso para a utilização terrestre da geração fotovoltaica, motivado pela crise mundial de energia em 1973/1974. Nesta época, o foco era a diminuição da extrema dependência que tinham as nações do petróleo. Entretanto, nos dias atuais, o motivo para expansão da energia solar não se deve somente a questões de crise energética como era na década de 70, mas ao fato da preocupação das nações em relação aos efeitos negativos da ação humana sobre o clima, e da necessidade da diversificação da matriz elétrica. A energia fotovoltaica além de ser renovável, seu uso reduz consideravelmente a emissão de CO₂, o que tem gerado interesse no mundo todo (Zhang et al., 2011). Lembrando que o Brasil segundo *World Resource Institute* (WRI, 2015), está entre 10 maiores emissores de GEE, conforme Figura 2, além de ser signatário do acordo de Paris (iNDC, 2015), onde se comprometeu a reduzir os GEE em até 37% até 2025 (Portal Brasil, 2016).

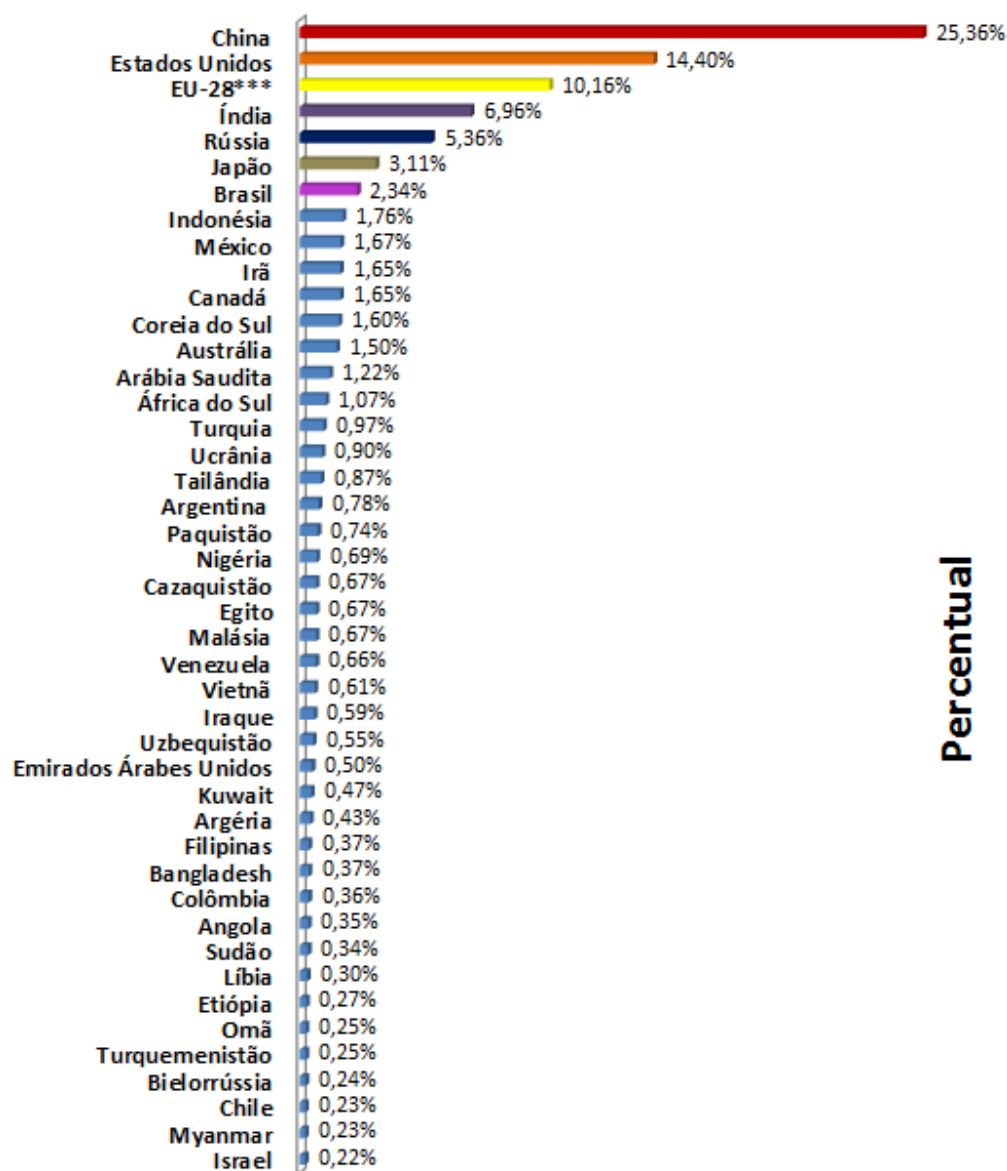


Figura 2 - Os Principais Poluidores Mundiais – Gases de Efeito Estufa
 Fonte: Elaboração própria com base nos dados do World Resources Institute (2012)

Destaca-se que o uso da energia solar pode ser visto como um mecanismo de geração complementar ao sistema convencional e não como um modo de geração concorrente. Um caso de complementariedade claro é a construção de painéis fotovoltaicos nas superfícies dos lagos represados pelas hidrelétricas. Supondo condições hidrológicas desfavoráveis, com períodos cada vez maiores de estiagem, os projetos de construção de painéis fotovoltaicos sobre o lago das usinas podem amenizar os efeitos adversos da estiagem sobre o processo de geração de energia hidrelétrica. Segundo as informações do Ministério de Minas Energia (MME, 2016b), os reservatórios no Brasil das Usinas Hidrelétricas (UHEs) Sobradinho (BA) e Balbina (AM) já utilizam os painéis flutuantes.

Segundo (Taboada et al., 2017) os painéis solares reduzem em até 90% a evaporação da água dos lagos por evitar essa incidência direta dos raios solares. Ou seja, além da geração complementar de energia, há possibilidade de mais um efeito benéfico que seria a economia de recursos hídricos.

A energia fotovoltaica também faz parte das principais ações adotadas no Programa Eficiência Energética (PEE) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), assim como, a instalação de aquecedores solares (substituição de chuveiros elétricos) em hospitais, creches e asilos (Calili, 2013). Os aquecedores solares além de utilizados para o desenvolvimento de estruturas mais sustentáveis também são utilizados em muitas residências ao redor do mundo, dando acesso à energia e água quente a muitas famílias de baixa renda (Aigbavboa, 2015).

Ainda que se tenha visto muitos pontos positivos, é necessário ter consciência que existem pontos negativos da cadeia de produção fotovoltaica. Mesmo sendo uma fonte de energia renovável e inesgotável, os painéis fotovoltaicos apresentam altos custos de investimentos, ponto relevante da implantação dos projetos. Além disso, como tudo o que é produzido em dado momento vira resíduo, é necessário também pensar na destinação apropriada dos painéis descartados por falha ou esgotamento. Segundo a REW (2016), existe uma série de estudos mencionando que embora não seja fácil, os painéis fotovoltaicos podem ser reciclados de maneira eficiente.

Noutro ponto, é preciso mencionar que o silício é uma das principais matérias-primas para construção dos painéis solares. É um material semicondutor abundante, muito utilizado na indústria eletrônica e microeletrônica. Porém o aumento constante na sua demanda é preocupante e sua exposição requerem cuidados.

“O silício pode ser extraído de praticamente qualquer lugar do planeta; é um tipo de areia comum e atóxica. Felizmente a produção das placas *de circuito* não exige grandes quantidades de silício, porque a exposição a esse elemento químico em maiores níveis, como acontece em minas e fábricas, pode causar problemas respiratórios e uma doença pulmonar incurável chamada silicose.” (LEONARD A., 2011, p. 85, grifo do autor).

Se realmente o país almeja adotar um processo sustentável de verdade, deve-se pensar em todas as fases da cadeia de produção de energia solar, desde a extração bem como responsabilizar também o consumidor e o produtor, definindo

políticas claras de descarte e reciclagem (e.g. logística reversa). Durante sua vida útil de operação um painel fotovoltaico não emite GEEs, mas sua fabricação há vários impactos como as emissões durante a mineração do material semicondutor, a purificação dos mesmos, a fabricação das células e dos painéis, além dos estágios de transporte envolvido. E para garantir que não se torne uma falsa solução, na Europa os painéis foram classificados como resíduos eletrônicos especiais, estabelecendo que o fabricante seja obrigado a pagar pelas operações de eliminação (Tommasi et al., 2017).

2.1

Cenário Fotovoltaico no Mundo

A produção de energia de forma sustentável envolve grandes desafios. Sua geração não poderá ser demasiadamente poluidora, nem emissora de CO₂. Segundo a International Energy Agency (IEA, 2018) para o cenário de desenvolvimento sustentável, a parcela de geração de tecnologias de baixo carbono deve aumentar para quase 63% em 2030, sendo que eólica e solar correspondem 50% desse crescimento.

Boa parte da expansão desse sistema deve-se aos compromissos internacionais firmados de redução dos efeitos adversos da atuação humana sobre o clima. Diversos países se comprometeram com as tratativas do Acordo de Paris (iNDC, 2015) visando a diminuir a emissão de gases do efeito estufa. Para incentivar a geração de energia limpa, segundo o relatório *World Energy Outlook* 2016 foram concedidos cerca de US\$ 150 bilhões em subsídios governamentais, somente em 2015.

Conforme pode ser visto na Figura 3, o relatório *Global Market Outlook for Solar* 2016-2020 considera dois cenários de projeção para a energia fotovoltaica. Ambos os cenários mostram um crescimento constante da capacidade global de geração fotovoltaica, levando em conta as políticas já adotadas pelos países e os compromissos firmados no Acordo de Paris. Com a saída recente dos Estados Unidos o cenário otimista torna-se cada vez mais improvável.

Portanto, além de manter as políticas energéticas, deve haver grande esforço por parte dos países no que diz respeito à eficiência energética.

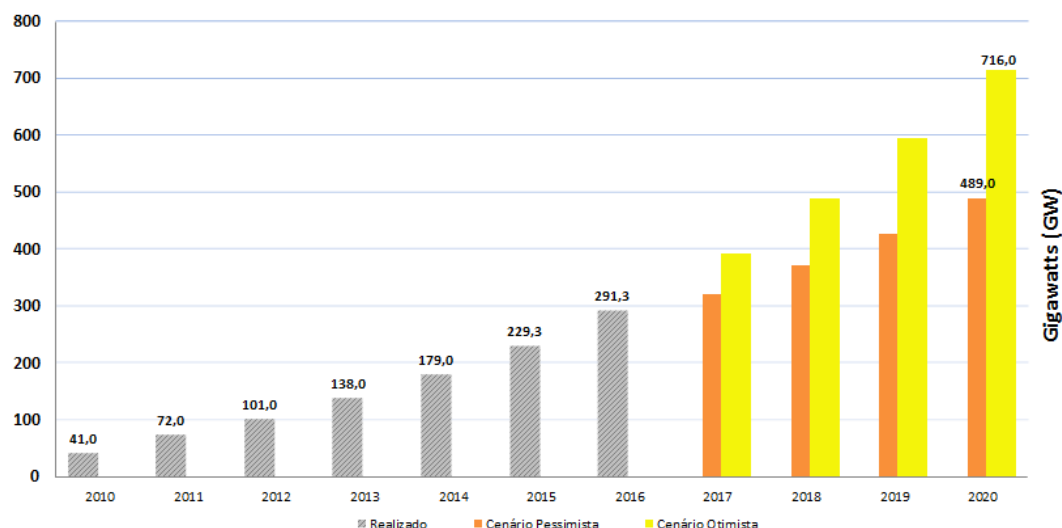


Figura 3 - Capacidade Global de Energia Solar

Fonte: Elaboração própria adaptado de Global Market Outlook for Solar 2016-2020

A China é líder mundial em produção de energia solar no mundo, conta com uma capacidade instalada de 43,4 GW, contabilizada em 2015, e segundo o relatório *Global Market Outlook for Solar 2016-2020* sua estimativa para 2020 é de 130,3 GW. Seguida por Alemanha, que vem crescendo no mercado de energia renovável, com forte incentivo de políticas governamentais (Zhang et al., 2011). Dispõe de uma capacidade instalada de 39,7GW com estimativa de 48,4 GW. O Japão conta com 34,3 GW de capacidade instalada e uma estimativa de 63,3 MW. Os EUA apesar de terem a segunda maior projeção com 85,3 GW para 2020 sua capacidade contabilizada até o final de 2015 era de 25,9 GW. Tal capacidade e projeção pode ser melhor visualizada na Figura 4.

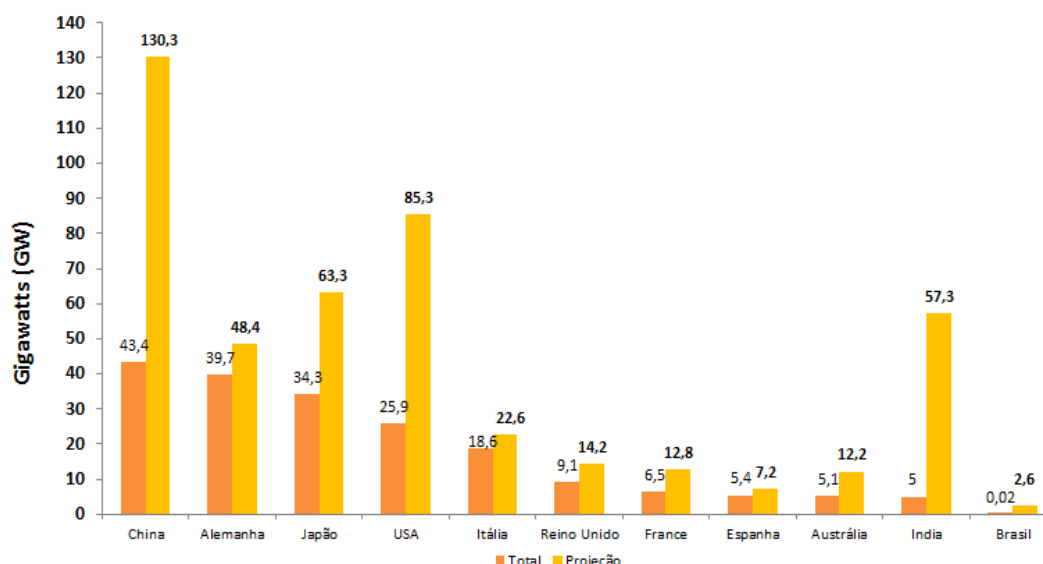


Figura 4 - Ranking Mundial – Capacidade Instalada Total e Projeção 2016-2020
 Fonte: Elaboração própria adaptado de Global Market Outlook for Solar 2016-2020

O custo dos painéis bem como sua instalação era o maior entrave para entrada dessa fonte de energia no cenário mundial, mas os custos estão em queda, conforme Figura 5. Com a evolução dos painéis fotovoltaicos a custos cada vez mais baixos, o crescimento da consciência ambiental, a energia solar vem ganhando maturidade tecnológica, tornando-se uma energia atrativa, seja do ponto de vista do consumidor comum a gestores políticos. Assim, a energia solar vem sido utilizada para definição das políticas públicas, auxiliando nos compromissos determinados pelas políticas energéticas dos países.

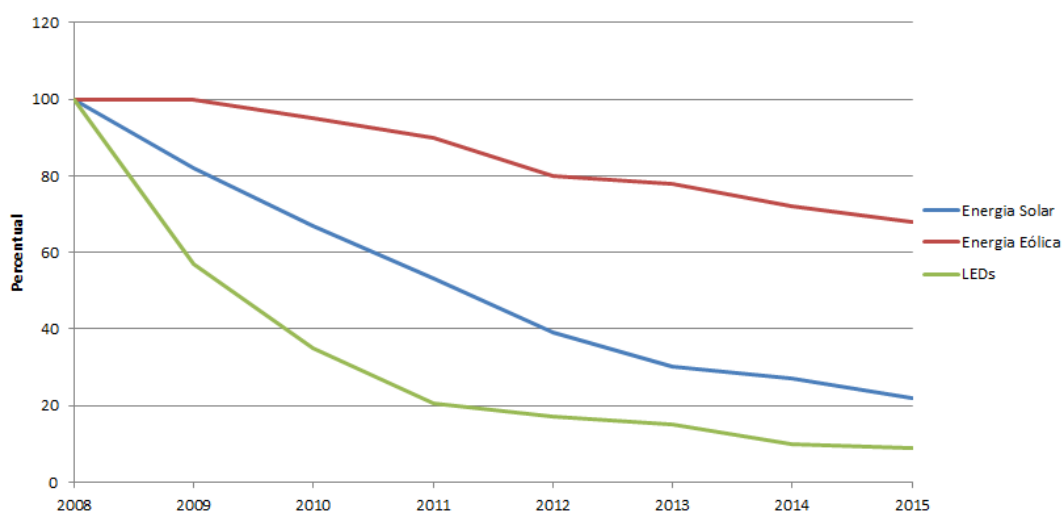


Figura 5 - Queda dos Custos de Energia Renovável

Fonte: Elaboração própria com base nos dados do Next Generation Wind and Solar

Power

2.2

Cenário Fotovoltaico no Brasil

A base energética brasileira é sem dúvida a hidrelétrica, o que já contribui para um processo de geração de energia menos poluente. Entretanto, o alagamento de grandes extensões de terras gera impactos negativos não negligenciáveis: possível liberação de metano derivado do processo de degradação anaeróbica da matéria orgânica que ocorre em áreas alagadas; o deslocamento de populações ribeirinhas moradoras próximas às barragens; os impactos sobre a fauna e flora. Estes são efeitos adversos do modelo hidrelétrico que devem ser levados em consideração ao se avaliar a construção de novas hidrelétricas.

A grande extensão territorial e a sua localização geográfica intertropical permite receber grandes quantidades de irradiação provenientes do sol. Tal fonte de geração de energia deveria ser mais incentivada no país. O Brasil possui níveis de irradiação solar bem superior aos países líderes de exploração de energia fotovoltaica. Conforme o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), a região do Brasil com menor incidência de sol é possível gerar mais eletricidade solar do que no local mais ensolarado da Alemanha.

Apesar de o Brasil possuir as maiores jazidas de quartzo do mundo, que é a matéria-prima para o silício, o silício purificado é importado, o que encarece a fabricação de células solares no Brasil. Mas alguns avanços foram obtidos em

relação a melhores perspectivas para a produção de silício no Brasil, que se refletirá no custo dos painéis solares num futuro próximo. Em 2012, um grupo de cientistas da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) conseguiu obter, pela primeira vez no Brasil, o silício purificado, o que vai nos tornar ainda mais competitivos no mercado de energia solar.

O Brasil poderá estar entre os 20 maiores países com maior geração de energia solar. Expansão e estimativa mostradas na Figura 4. Se considerarmos a potência já contratada de 2,6 GW para 2018 (MME, 2015b) poderemos chegar a 7 GW em 2024 (EPE, 2015b), conforme mostrado na Figura 6.

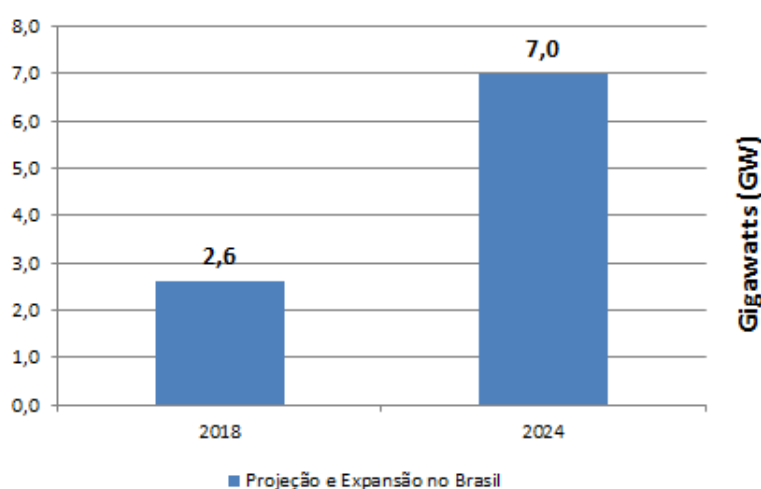


Figura 6 - Projeção e Expansão no Brasil

Fonte: Elaboração própria com base nos dados do MME (2015b) e EPE (2015b)

Seguindo por essa ótica, tendo em conta que o Brasil é um caso particular, mais da metade de sua matriz elétrica vem de fontes renováveis (EPE, 2015b). Em 2018 foi contabilizada uma capacidade instalada de 157 GW (ANEEL, 2018), e com a expansão da energia eólica e solar e das outras fontes, estima-se 207 GW de capacidade instalada em 2024. Melhor visualizado na Figura 7 e Figura 8.

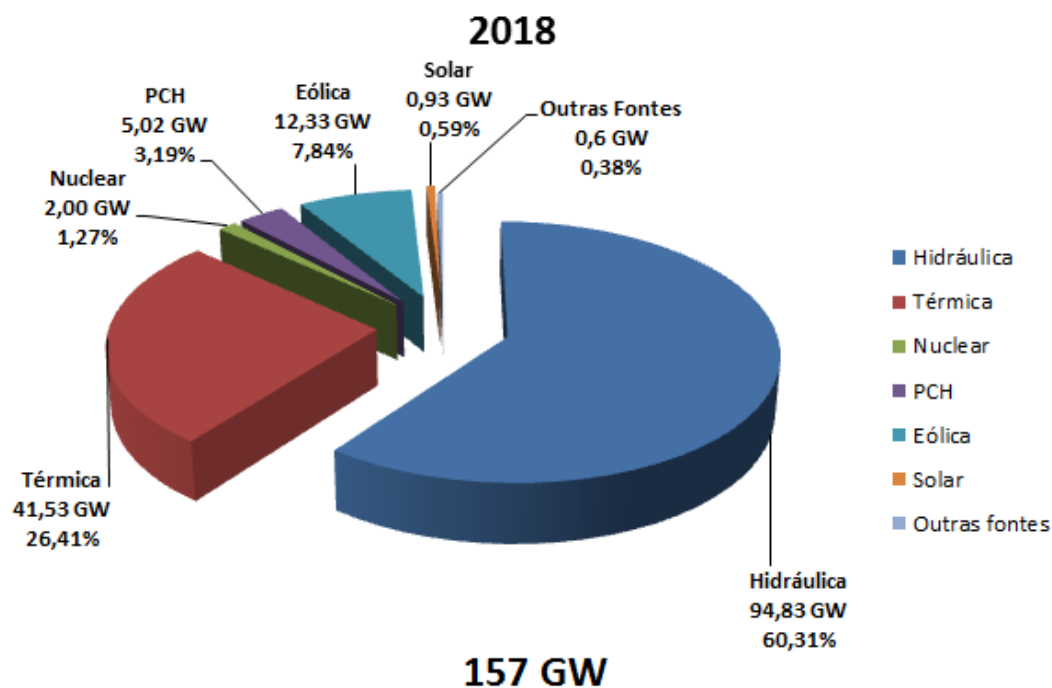


Figura 7 - Matriz Elétrica 2018
 Fonte: Elaboração própria com base nos dados da ANEEL (2018)

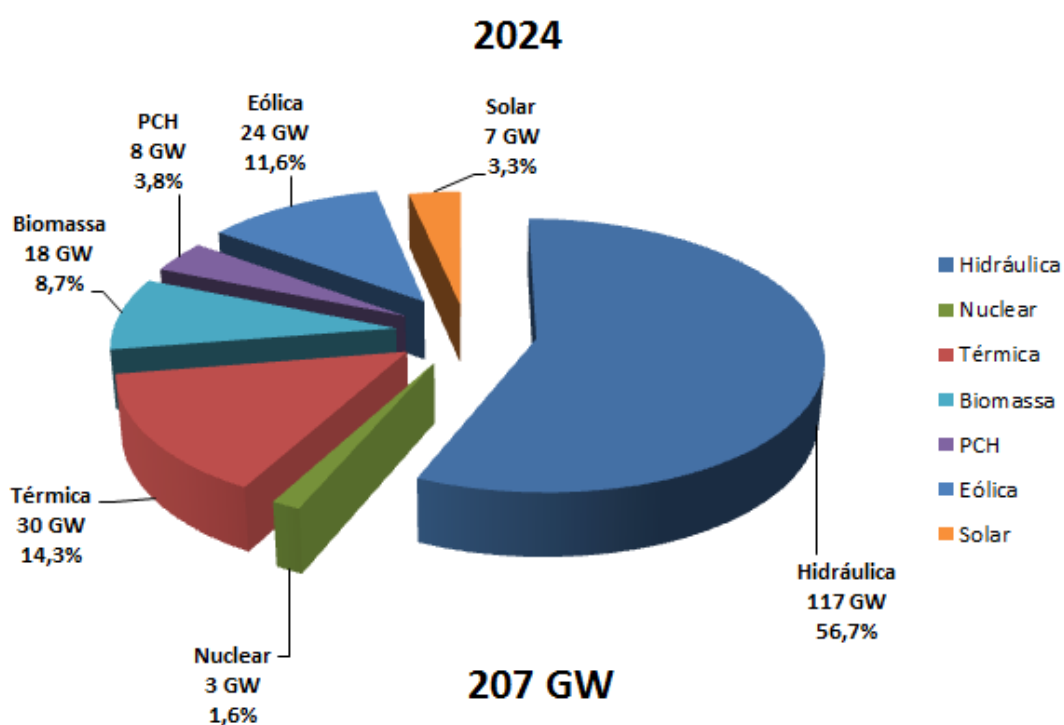


Figura 8 - Matriz Elétrica 2024
 Fonte: Elaboração própria com base nos dados da EPE (2015b)

2.3

O Sistema de Geração Distribuída

Geração Distribuída (GD) à geração elétrica realizada junto ou próxima dos consumidores, independente de potência, tecnologia e fonte de energia. Os tipos de GD são:

- Cogeneradores;
- Biomassa;
- Geradores de Emergência;
- Geradores para operação no horário de ponta;
- Painéis fotovoltaicos;
- Geradores eólicos de pequeno ou médio porte;
- Centrais de Geração Hidrelétrica (CGHs);
- Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs).

O uso de painéis solares fotovoltaicos em residências e condomínios (empreendimentos com múltiplas unidades consumidoras e geradoras) o consumidor além de produzir sua própria energia pode fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua região em um Sistema de Compensação de Energia Elétrica, conhecido também pelo termo em inglês *net metering*. Quando a geração de energia for superior à energia consumida naquele período, o consumidor produtor fica com créditos de energia que não poderá ser utilizado para geração de renda, apenas utilizado para diminuir, compensar as faturas dos meses subsequentes por até cinco anos, conforme a Resolução vigente.

A possibilidade de abatimento nas faturas subsequentes e isenção de Imposto sobre a Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) como já é feito em 21 estados do Brasil já é início de um grande incentivo para os investimentos nos sistemas de geração distribuída.

Todo Sistema de Geração Distribuída é regido pela Resolução Normativa 687, promulgada em novembro de 2015, que atualizou algumas diretrizes da Resolução 482/2012. Para o presente trabalho cabe destacar algumas delas. A Resolução 482/2012 permitiu o consumidor sendo pessoa física ou jurídica uma concessão para instalar um sistema gerador de energia elétrica próprio, provenientes de fontes renováveis e conectar paralelamente às redes de distribuição das concessionárias. Com a nova resolução, um cliente residencial

pode produzir a energia em uma localidade, e utilizar os créditos em outra residência de sua propriedade, bastando ser da mesma distribuidora. A Microgeração passa a ser um sistema gerador de energia elétrica com potência instalada inferior ou igual a 75 kW. Minigeração passa a ser um sistema gerador de energia elétrica, com potência superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW (para fonte hídrica) e menor ou igual a 5MW para as demais fontes renováveis, passando a valer agora de 75 kW aos 5 MW.

Todo processo de compensação de Energia é explicado na Figura 9.

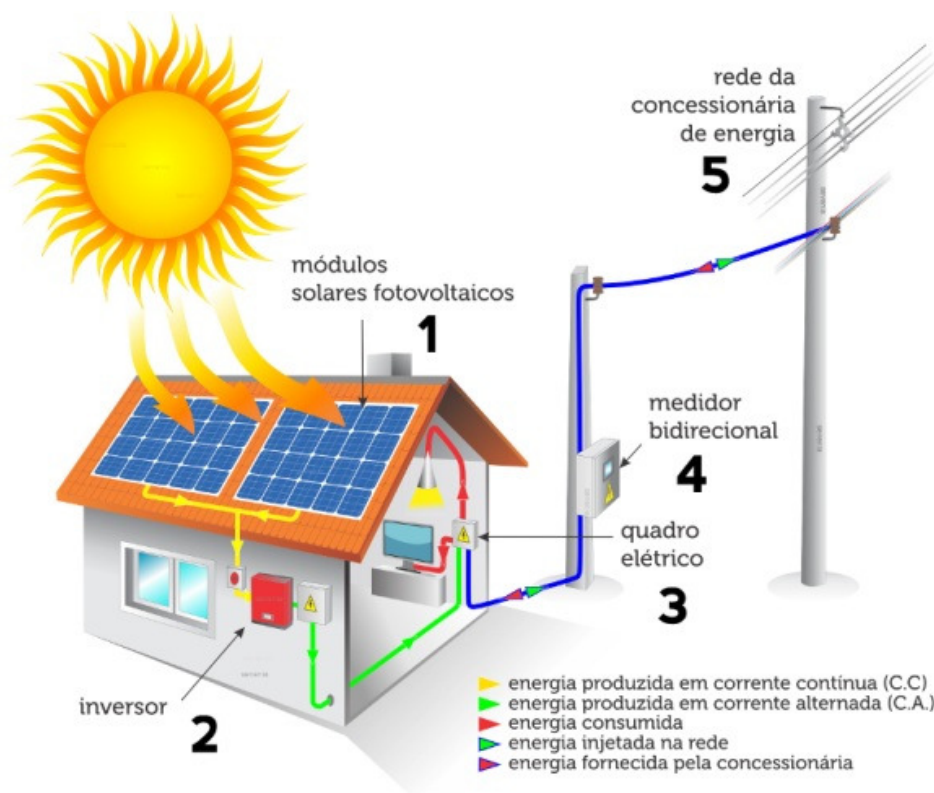


Figura 9 - O Sistema de Geração Distribuída
Fonte: Adaptado de Greenbras (2017)

- 1) Durante o dia, a luz solar incide sobre o conjunto de painéis solares conectados entre si (quanto maior for o conjunto de painéis, maior será a captação) que é absorvida e convertida em energia elétrica, corrente contínua (CC) e direcionada ao inversor.
- 2) O inversor por sua vez capta essa corrente contínua e transforma em corrente alternada (CA) que por sua vez poderá ser usada em casa, empresas e qualquer equipamento elétrico. Sendo esse o papel do inversor.
- 3) O “Quadro de força e luz ou quadro elétrico” recebe a energia convertida do inversor e faz a distribuição para o uso na casa, como mencionado acima, em

qualquer equipamento elétrico, como, chuveiros, computadores, televisões, geladeira, etc..

- 4) O medidor bidirecional registra a energia que foi gerada e não foi consumida, sendo injetada na rede da distribuidora local. Em períodos de ausência de sol é feito o uso da energia da distribuidora.
- 5) Caso a geração de energia for maior que a de consumo, a energia excedente é convertida em créditos que poderão ser usados em até 60 meses para abater as faturas de energia subsequentes, o que chamamos de compensação de energia, conforme as regras da resolução vigente.

2.4

Mecanismos de incentivo à energia solar fotovoltaica

Desde a década de 90 foram registrados programas de incentivo à energia solar fotovoltaica. Pelo Decreto de 27 de Dezembro de 1994 foi criado pelo Governo Federal o Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios (PRODEEM), para atender às localidades isoladas não supridas de energia elétrica pela rede convencional, com objetivo de promover o desenvolvimento autossustentável, social e econômico dessas localidades. Em junho de 2017 foi criada uma chamada pública com a finalidade de selecionar interessados em receber doações de bens remanescentes desse programa (MME, 2017).

Em dezembro de 1997 foi celebrado o Convênio nº 101 do Conselho Nacional de Política Fazendária (CONFAZ) que concede a isenção de ICMS com equipamentos e componentes como aquecedores solares de água, célula solares, geradores e aerogeradores fotovoltaicos.

Em 2012, foi promulgada a Resolução Normativa 482 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) que coordena todo sistema de Geração Distribuída permitindo o consumidor sendo pessoa física ou jurídica uma concessão para instalar um sistema gerador de energia elétrica próprio, provenientes de fontes renováveis e conectar paralelamente às redes de distribuição das concessionárias.

O Projeto de Lei do Senado nº 167, de 2013 isenta do Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI) para painéis fotovoltaicos. Em 2014 foi aprovado o Projeto de Lei 8322/14 do Senado, que amplia a isenção de impostos sobre

importação para alguns equipamentos de geração elétrica de fonte solar como cabos, conectores e estruturas de suporte.

Em 2014, um projeto piloto realizado em dois condomínios na Bahia coordenado pela Caixa Econômica Federal (CAIXA) denominado Geração de Renda e Energia, usa painéis fotovoltaicos em casa populares do Programa Minha Casa Minha Vida (MCMV), tema do trabalho, houve uma Resolução Autorizativa 4385 específica da ANEEL (Motta et al., 2016), que permitiu que o excedente de energia não utilizada nos condomínios pudessem ser vendida e esse valor concedido às famílias beneficiadas.

O Convênio ICMS nº 16 de 2015 do CONFAZ, isenta a cobrança de ICMS sobre a energia injetada na rede, que anteriormente os microgeradores pagavam impostos sobre a própria energia gerada. Atualmente 21 estados do Brasil já aderiram ao Convênio. Ainda em 2015, foi promulgada a Resolução Normativa 687 que atualiza algumas diretrizes da Resolução 482/2012, dentre as quais:

- O aumento do prazo de compensação de 36 meses para 60 meses;
- A geração compartilhada que permite a reunião de consumidores, dentro da mesma área de concessão ou permissão, por meio de consórcio ou cooperativa (as unidades consumidoras podem estar em locais diferentes);
- Empreendimento com múltiplas unidades consumidoras, caracterizado pela utilização da energia elétrica de forma independente, no qual cada fração com uso individualizado constitua uma unidade consumidora e as instalações para atendimento das áreas de uso comum constituam uma unidade consumidora distinta, de responsabilidade do condomínio, da administração ou do proprietário do empreendimento.

Foi lançado também em 2015 o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD), para estimular e ampliar a geração de energia pelos próprios consumidores, com base em fontes renováveis de energia, priorizando a energia fotovoltaica. Com investimentos de 100 bilhões no ProGD (MME, 2015), segundo algumas projeções contidas nos estudos do MME, a previsão até 2030, é que 2,7 milhões de unidades consumidoras poderão ter energia gerada por elas mesmas, envolvendo residências, comércios e indústrias, podendo resultar 23.500 MW.

A CAIXA criou o financiamento Construcard, uma modalidade que permite a pessoa física financiar materiais de construção, incluídos equipamentos

de energia fotovoltaica, podendo ser quitados em até 240 meses com taxas de juros a partir de 2,5% ao mês.

Mais recentemente em novembro de 2017, o uso energia solar fotovoltaica em habitações sociais do programa MCMV, passa a ser uma realidade em nível nacional com a publicação da Portaria nº643/2017, que dispõe sobre a utilização de sistemas alternativos de geração de energia para essas habitações, visando à sustentabilidade ambiental dos empreendimentos, com obtenção de maior eficiência energética e contribuindo para economia de energia e redução de despesas dos beneficiários. A Figura 10 apresenta os mecanismos de incentivos criados à energia solar fotovoltaica por ano.

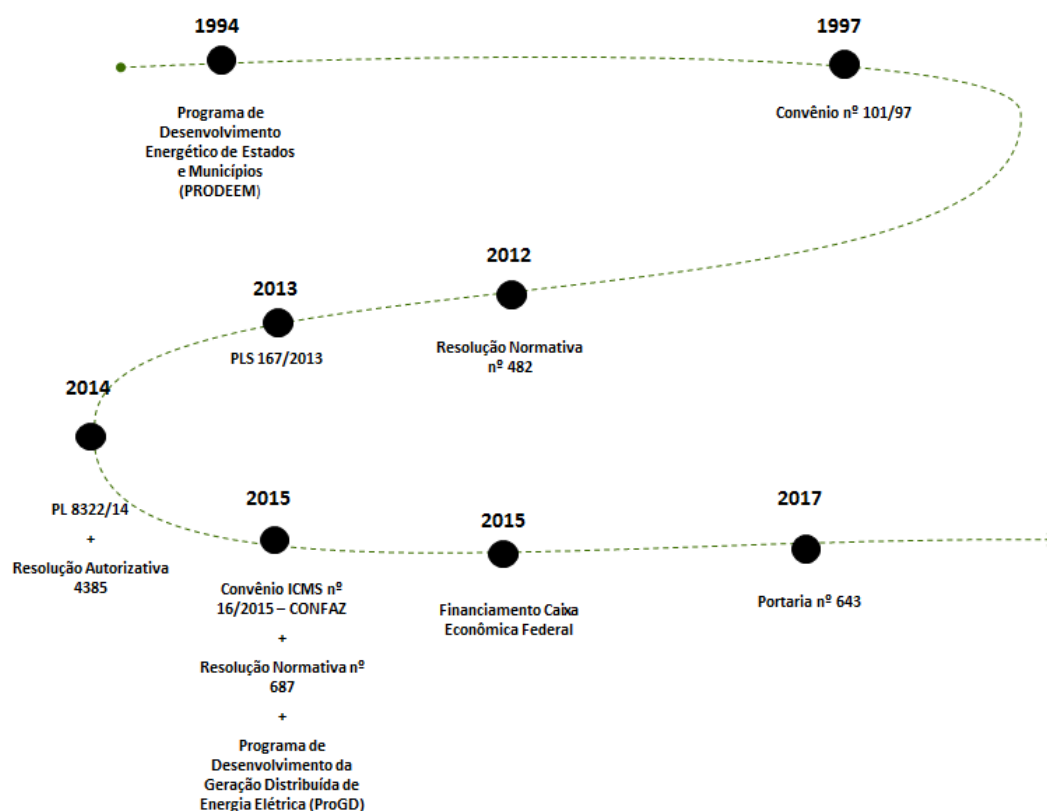


Figura 10 - Mecanismos de incentivos criados à energia solar fotovoltaica
Fonte: Elaboração própria

2.5 Comercialização da energia solar fotovoltaica

A ANEEL é o órgão regulador e fiscalizador de todas as relações do setor de energia brasileiro, zelando pela qualidade dos serviços prestados, pela universalização do atendimento e pelo estabelecimento das tarifas para os

consumidores finais, sempre preservando a viabilidade econômica e financeira dos agentes e da indústria (CCEE, 2014).

Atualmente no Brasil o mercado de contratação de energia segundo o modelo comercial e institucional estabelecido pela Lei nº 10.848 de março de 2004 e regulamentado pelo Decreto nº 5.163 de setembro de 2004 estipulam dois ambientes de contratação de energia, o Ambiente de Contratação Livre (ACL) e o Ambiente de Contratação Regulado (ACR).

O ACL apresenta dois tipos de consumidores, o Consumidor Livre e o Consumidor Especial. Para o consumidor que se enquadra em uma carga maior ou igual a 500 kW são considerados Consumidor Especial podendo apenas contratar energia de Fonte de Incentivada, que é medida estabelecida pelo governo para que seja estimulada a criação e/ou expansão de geradores de fontes renováveis limitados a 30 MW de potência, como PCH (Pequenas Centrais Hidrelétricas), Biomassa, Eólica e Solar. Para o consumidor que se enquadra em um consumo maior que 3 MW é considerado Livre, grandes comércios ou indústrias, tem a opção de contratação da energia Incentivada ou Convencional que é oriunda de usinas térmicas e/ou grandes hidrelétricas. Para o mercado livre as opções de fornecedores e negociação de preços fazem desse mercado muito mais atrativo, mas há dependência de chuvas, uma vez que o preço desse mercado pode ser considerado uma *proxy* do PLD (Preço de Liquidação de Diferenças).

No mercado cativo, ACR participam os agentes vendedores e os agentes de distribuição que estão conectados ao público consumidor que pagam uma fatura por mês as concessionárias de distribuição de energia elétrica. Dentre elas, por exemplo, a Cemig em Minas Gerais, Light no Rio de Janeiro e a Eletropaulo em São Paulo. Podem adquirir energia através dos leilões de compra proveniente de empreendimentos de geração existentes e de novos empreendimentos de geração, através da GD, desde que a contratação seja precedida de chamada pública realizada pelo próprio agente de distribuição, mas a contratação fica limitada ao montante de 10% do mercado do distribuidor. Os leilões são regulados pela ANEEL e promovidos pela CCEE, que desde que foi instituída em 2004, a CCEE até julho de 2014 realizou 54 leilões girando aproximadamente R\$ 1 trilhão (CCEE, 2014).

Os Leilões de Energia Reserva (LER) são destinados a aumentar a segurança no fornecimento de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional

(SIN), mitigando o risco hidrológico. Essa modalidade de leilão ocorre com ênfase em energias renováveis. O 6º LER foi considerado um marco histórico para o Setor Elétrico Brasileiro, uma vez que representou a primeira contratação de energia fotovoltaica, somando 10.790 MW de potência instalada (EPE, 2014).

Os leilões promovem a competição entre os agentes de geração, onde se busca o menor preço possível da energia elétrica que será repassada ao público consumidor. Na Figura 11 é mostrado um fluxograma do mercado de energia.

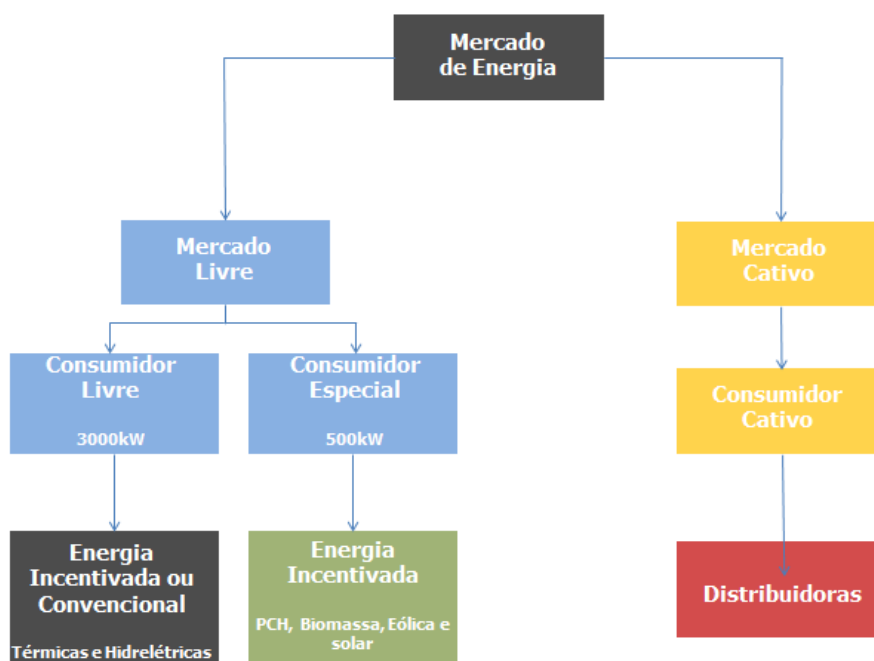


Figura 11 - Fluxograma do mercado de energia
Fonte: Elaboração própria

Outra forma de utilização da energia se dá através dos Autoprodutores (APE), sendo pessoa jurídica ou empresas reunidas em consórcio que recebem concessão ou autorização para produzir energia elétrica destinada ao seu uso exclusivo, podendo com uma eventual autorização da ANEEL, comercializar a energia excedente.

Para os consumidores ligados a rede de distribuição que fazem parte do ambiente de ACR e que dispõe da geração complementar de energia solar através de células fotovoltaicas, a geração sendo maior que o consumo, a energia não poderá ser comercializada, nem para um vizinho e nem para uma concessionária. Seguindo a Resolução Normativa nº 482 de 2012, e ampliada com a Resolução Normativa nº 687 de 2015, foi regularizado o acesso de microgeração e

minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica nacionais, ficando estabelecido o sistema de compensação de energia, como citado anteriormente.

A única forma de venda de energia da geração solar fotovoltaica foi estabelecida pela Resolução Autorizativa 4385 específica da ANEEL (Motta et al., 2016), que permitiu que o excedente de energia não utilizada nos condomínios do projeto denominado Geração de Renda e Energia coordenado pela CAIXA pudessem ser vendida em benefício das famílias que aderiram o programa e que também será assunto desse trabalho.

2.6

Considerações sobre o capítulo

Os mecanismos de incentivo a energia solar são importantes meios para disseminar seu uso. Com a publicação da Portaria nº643/2017 a utilização de energia solar fotovoltaica passou a ser uma realidade nas habitações sociais do programa MCMV. Anteriormente a Resolução 482/2012 permitiu a concessão para instalar um sistema gerador de energia elétrica próprio, oriundas de fontes renováveis e conectar as redes de distribuição das concessionárias, possibilitando que condomínios utilizassem o benefício da energia solar, inclusive dos programas MCMV. Posteriormente a Resolução foi ampliada para 687/2015 regularizando o acesso de microgeração e minigeração distribuída, bem como o sistema de compensação de energia permitindo compartilhar os créditos em outra residência de mesma propriedade, bastando ser mesma distribuidora. Fica evidente a importância desses mecanismos para incentivo de seu uso.

O Planejamento da Expansão e Operação da Geração no Brasil

A matriz elétrica brasileira é predominantemente hidráulica, além de possuir uma capacidade considerável de armazenamento. No Brasil, há grandes reservatórios, que podem reter o volume de água, para serem utilizadas nos períodos de baixa afluência, amenizando os efeitos da sazonalidade. Entretanto existem hidrelétricas que operam sem acúmulo de água, ou seja, o volume que chega à barragem passa diretamente pelas turbinas (usinas fio d'água).

O panorama da demanda de energia elétrica no Brasil cresce em proporção também ao crescimento econômico do país. Ao crescer a demanda é preciso aumentar sua oferta e conseqüentemente sua expansão. Um dos principais objetivos do planejamento da expansão é elaborar estratégias e planos que incluam a criação de usinas de geração e linhas de transmissão para atendimento dessa demanda (Gorenstin et al., 1993). Além da minimização dos custos de investimento e dos valores dos custos de operação. Para os estudos de planejamento os seguintes horizontes são mais bem visualizados na Figura 12.

Dentre os principais elementos contidos num planejamento de médio e longo prazo estão: estudos e projeções da matriz elétrica brasileira, execução de estudos que propiciem o planejamento integrado de recursos energéticos, realização de análises de viabilidade técnico-econômica e socioambiental de usinas. Assim como a obtenção da licença ambiental prévia para aproveitamentos hidrelétricos e transmissão de energia elétrica, que estão sob égide da EPE, que é uma empresa vinculada ao MME (CCEE, 2014).

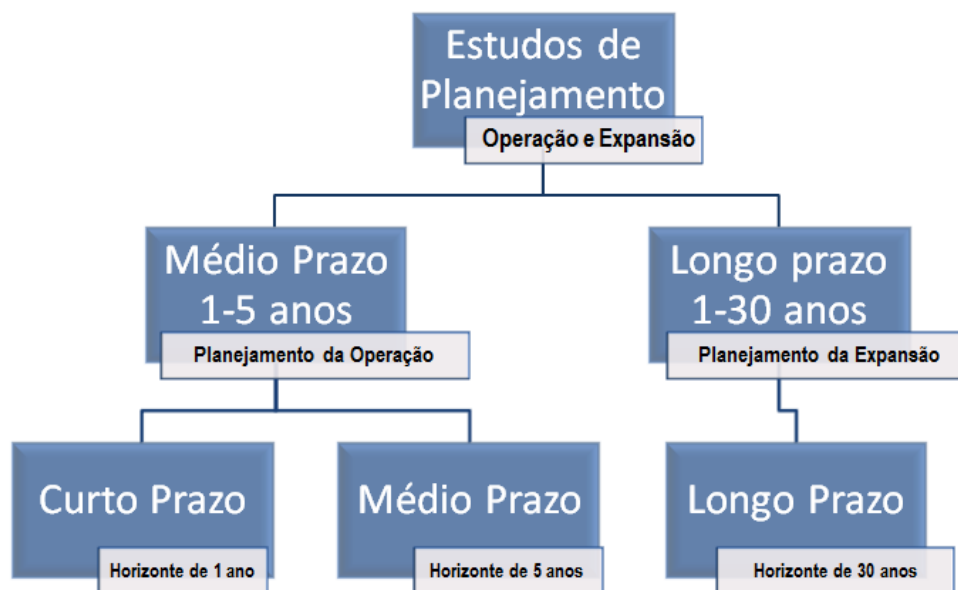


Figura 12 - Estudos de Planejamento
Fonte: Elaboração própria

Dentre os principais elementos contidos num planejamento de médio e longo prazo estão: estudos e projeções da matriz elétrica brasileira, execução de estudos que propiciem o planejamento integrado de recursos energéticos, realização de análises de viabilidade técnico-econômica e socioambiental de usinas. Assim como a obtenção da licença ambiental prévia para aproveitamentos hidrelétricos e transmissão de energia elétrica, que estão sob égide da EPE, que é uma empresa vinculada ao MME (CCEE, 2014).

As atividades do governo na área de planejamento estratégico são exercidas pelo Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), pelo MME e pelo Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE). As atividades de regulação são exercidas pela ANEEL, planejamento e programação da operação são feitas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), viabilização das atividades de comercialização (CCEE, 2014) e planejamento da expansão do setor é efetuada pela EPE. Na Figura 13 pode-se observar a relação entre os agentes institucionais.

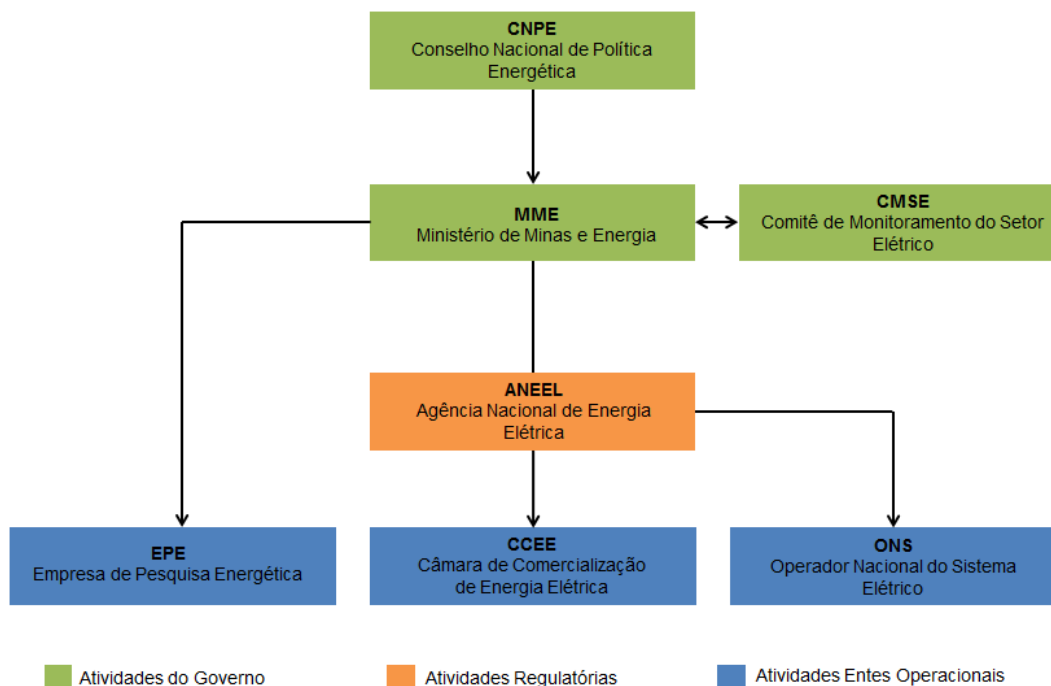


Figura 13 - Agentes institucionais do Setor Elétrico Brasileiro
Fonte: CCEE (2014)

Com a expansão das ofertas de energia eólica e solar (através das instalações solares em residências, com módulos fotovoltaicos em telhados) a operação do sistema elétrico brasileiro precisa mudar para se adaptar a essa expansão, bem como o sistema computacional utilizado para o cálculo do PLD (Barata apud Costa, 2017).

A inserção dessas fontes deve ser vista sob a ótica da complementariedade do sistema e não de substituição. Entende-se como complementariedade energética a capacidade de dois ou mais recursos (da mesma fonte ou de fontes distintas) apresentarem disponibilidade energética complementar no tempo. A complementariedade “perfeita” entre dois recursos ocorreria se, no momento em que um está com grande disponibilidade, o outro está com pouca disponibilidade, e quando a situação se inverte para o primeiro, também se inverte para o segundo (EPE, 2017b).

O presente trabalho se atenta ao estudo do planejamento da operação, estimando o impacto de geração de energia, caso haja inclusão de um programa de geração de energia fotovoltaica dentro do projeto MCMV, ou seja, caso a estimativa do governo de construção de mais dois milhões de novas residências para os próximos dois anos utilizem os painéis fotovoltaicos.

3.1 Demanda de Energia

O consumo anual per capita de energia elétrica no Brasil atingiu em 2014 seu patamar mais alto com consumo de 2.616 kWh/hab (EPE, 2017a), um aumento de 9,53% comparado ao ano base de 2010 (EPE, 2015a). Os dados também revelam que houve um declínio de 3,89% em 2016 comparado ao consumo de 2014. O consumo de energia é um dos principais indicadores do desenvolvimento econômico e do nível de qualidade de vida de qualquer sociedade (ANEEL, 2008). Como apresentado na Tabela 1 a economia Brasileira viveu um ciclo de expansão e um declínio após o ano de 2014, um reflexo de nossa atual situação econômica.

Tabela 1 - Consumo de energia per capita (kWh/hab)

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Brasil	2.388	2.447	2.490	2.557	2.616	2.556	2.514
%		2,47	4,27	7,08	9,55	7,04	5,28

Fonte: Elaboração própria com base nos dados (EPE, 2017)

A expansão do consumo de energia, embora possa refletir o crescimento econômico pode trazer aspectos negativos caso esse crescimento não acompanhe um planejamento e investimentos a fontes renováveis de energia como, possibilidade do esgotamento dos recursos utilizados para a produção de energia e o impacto ao meio ambiente. Um incentivo extremamente importante que pode ser feito durante a expansão, sem comprometer o desenvolvimento econômico e a expansão é o incentivo e o estímulo à eficiência energética.

“Portanto, investir cada vez mais em fontes de energia renovável e utilizar este insumo de forma racional e eficiente é vital para o crescimento sustentável do mundo. Assim, a eficiência energética toma cada vez mais um papel fundamental para que as gerações futuras tenham garantida sua existência, uma vez que reduzir consumo de energia significa também diminuir as emissões de gases de efeito estufa na atmosfera.” (Calili R. F., 2013, p. 19).

O crescimento econômico aumenta a demanda de energia, que por sua vez aumenta o consumo (Bartleet et al., 2010). O crescimento econômico, de renda e populacional torna-se uma forma de se projetar a evolução da demanda de energia.

O PREVMERCADO (Previsão do Mercado) é o modelo utilizado para projetar o consumo de energia elétrica com uma variável determinada por cenários macroeconômicos e previsões demográficas para um horizonte de planejamento decenal (CEPEL, 2017). Entre outras funções está a de projetar o mercado futuro de energia elétrica para o Brasil, grandes regiões e unidades da Federação em um horizonte decenal, para as classes residenciais, rural, comerciais, poderes e serviços públicos e iluminação pública.

3.2

Capacidade Instalada de Geração no Brasil

A capacidade instalada de geração elétrica no Brasil atingiu ao final de 2016 o montante total de 150,4 GW, sendo 80,6% de energia renovável. Houve uma expansão de 9,5 GW de expansão sobre 2015 (MME, 2016a). Um crescimento contínuo como nos mostra a Tabela 2. Em 2016 houve crescimento de 6,74% referente ao ano de 2015 e de 33,81% comparado a 2010.

Tabela 2 - Capacidade instalada de geração elétrica (GW)

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Brasil	112,4	117,1	121,0	126,7	133,9	140,9	150,4
Crescimento%		4,18	7,65	12,72	19,13	25,36	33,81

Fonte: Elaboração própria com base nos dados (MME, 2016a)

A expansão para o Brasil prevista para os próximos três anos é de aproximadamente 18,6 GW (MME, 2016a), representando um aumento de 12,37% da capacidade instalada quando comparada ao ano de 2016.

3.3

Cadeia de Modelos do Planejamento da Operação

Para o planejamento da operação e expansão da geração foi desenvolvido pelo Centro de Pesquisa de Energia Elétrica (CEPEL) uma cadeia de modelos matemáticos e computacionais (Maceira et al., 2016).

O princípio básico desses modelos tem por finalidade à operação das usinas hidrelétricas do sistema, decidindo quais usinas devem ser despachadas, visando reduzir o uso de geração térmica, atividades que são coordenados pelo Operador Nacional do Sistema (ONS), que visa operar o sistema de maneira mais

eficiente, de forma a contribuir também para a redução dos custos operativos e dos riscos de déficit.

O mesmo modelo que é utilizado para a operação das usinas hidrelétricas também é utilizado pela CCEE para definição dos preços do mercado *spot* (PLD) a serem utilizados nas transações de compra e venda de energia.

É realizada a seguir, uma breve descrição dos principais modelos computacionais utilizados pelo CEPEL, ONS e CCEE. É importante destacar que à medida que o intervalo de tempo estabelecido pelos modelos diminui as incertezas com relação às vazões também diminuem. Na Figura 14 são apresentados os modelos desenvolvidos.

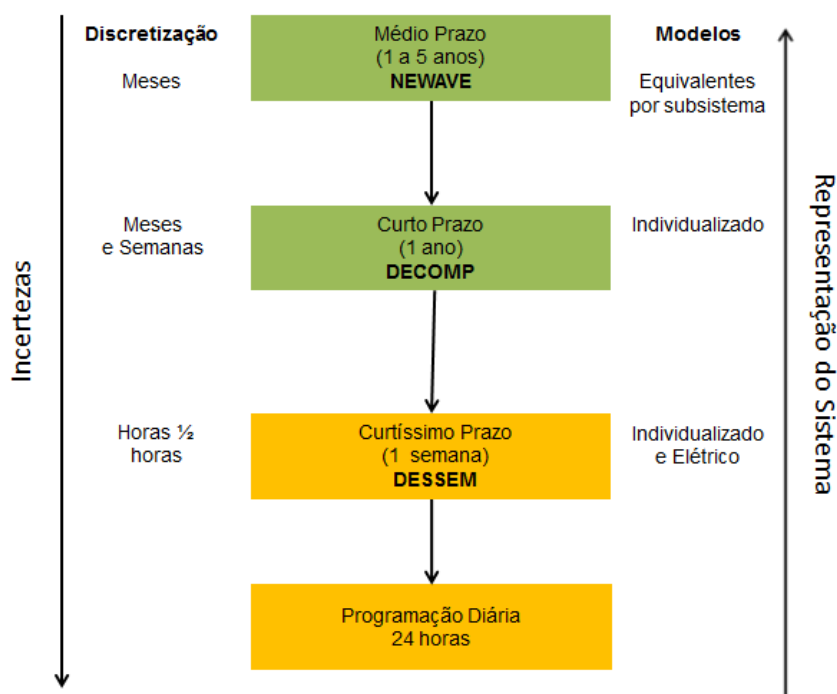


Figura 14 - Cadeia de modelos do CEPEL
Fonte: Adaptado do ONS (2012) apud (Souza et al., 2014)

3.4 Modelo NEWAVE

O modelo de planejamento de operação de médio prazo NEWAVE, é o primeiro modelo da cadeia desenvolvido pelo CEPEL. Representa o parque hidrelétrico de forma agregada, emprega a técnica de Programação Dinâmica Dual Estocástica (PDDE) (Calili et al., 2014). Definindo mensalmente o quanto será gerado pelas usinas hidrelétricas, térmicas e os intercâmbios entre os subsistemas,

atendendo à demanda de energia no país em um horizonte de cinco anos. Sua função objetivo é minimizar o valor do custo total esperado do sistema, proveniente do custo presente das usinas térmicas e o custo futuro do não atendimento da demanda de energia em função da decisão de gerar parcelas de energia hidráulica e térmica em determinado período (Lopes, 2007). O NEWAVE vem sendo utilizado para o planejamento da operação no médio prazo de subsistemas hidrotérmicos interligados, além da definição de preços a serem utilizados nas transações de compra e venda de energia. Apresenta um horizonte de cinco anos ou mais, com discretização mensal.

O modelo é utilizado em praticamente todas as grandes empresas do setor. Para o presente trabalho será incluído no modelo NEWAVE um cenário de uma possível ampliação de geração de energia fotovoltaica, caso haja inclusão dessa fonte dentro do projeto MCMV. O modelo faz uma leitura de uma série de classes que compõem os dados de entrada, por exemplo:

- Dados da configuração hidroelétrica;
- Dados das características das usinas hidrelétricas;
- Parâmetros para simulação com a série histórica de vazões afluentes;
- Dados da configuração térmica;
- Dados de características de usinas térmicas
- Dados de expansão térmica
- Dados de expansão solar

Na Figura 15 é apresentado um fluxograma do modelo NEWAVE.

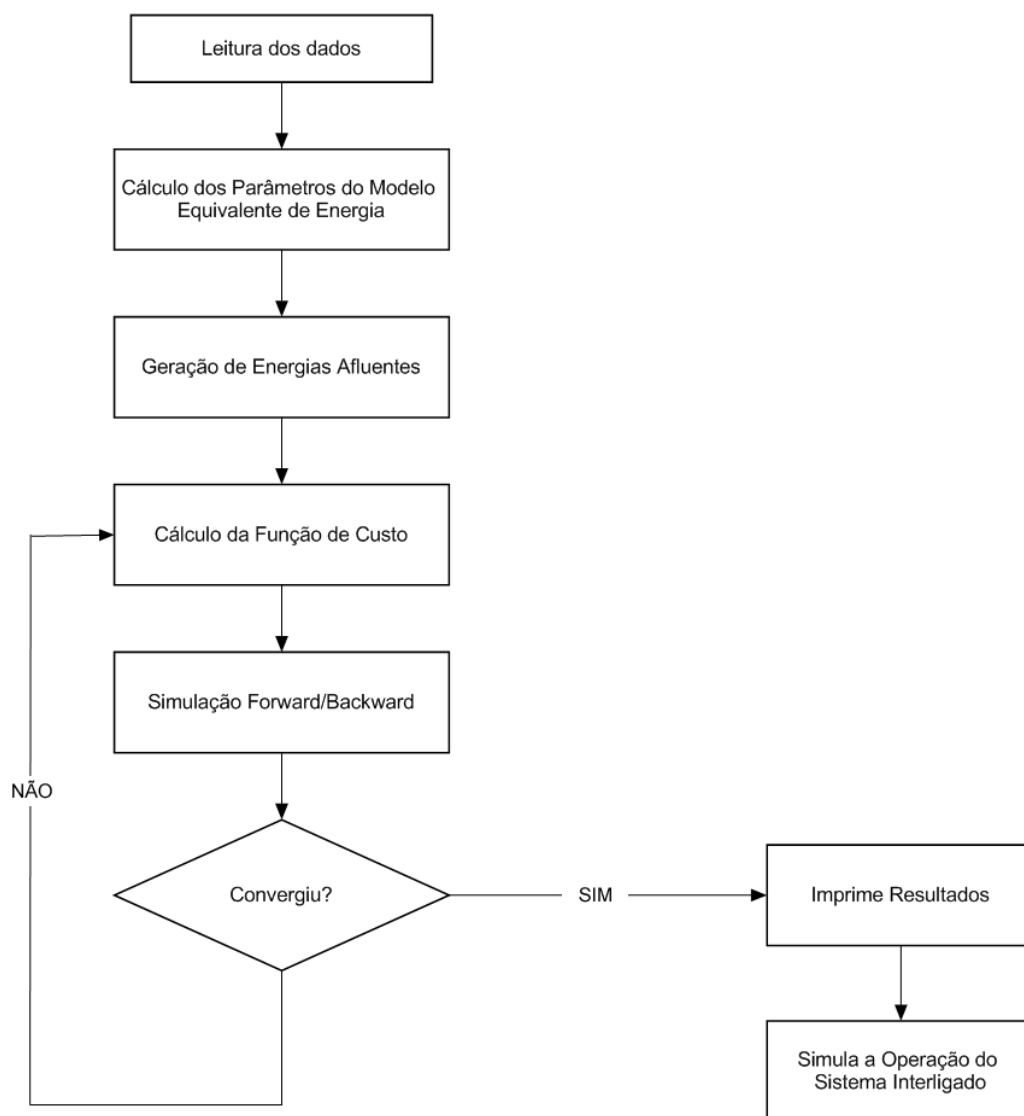


Figura 15 - Fluxograma do modelo NEWAVE
Fonte: Adaptado do CEPEL (2004)

3.5 Modelo DECOMP

O outro modelo desenvolvido pela CEPEL, o DECOMP (Determinação da Coordenação da Operação a Curto Prazo), assim como o NEWAVE, tem como objetivo a otimização do planejamento, mas em um horizonte de tempo mais curto, até doze meses com discretização semanal para o primeiro mês e mensal para os demais. O modelo retrata o valor econômico da água armazenada nos reservatórios em função dos níveis de armazenamento desses reservatórios.

Nessa etapa há um acoplamento, o modelo anterior apresentado fornece a função de custo futuro que agrega as usinas por subsistemas e o modelo

DECOMP por sua vez calcula o Custo Marginal de Operação (CMO) para cada um dos subsistemas.

O modelo também é utilizado pelo ONS, com objetivo de estabelecer metas, diretrizes energéticas de curto prazo da operação, de modo a aperfeiçoar a utilização dos recursos de transmissão e geração do SIN.

A representação do modelo é mostrada na Figura 16.

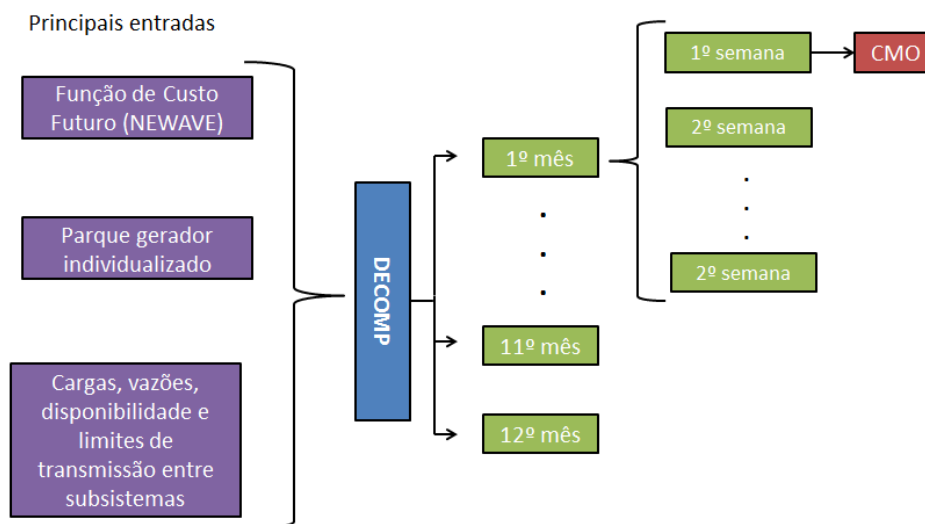


Figura 16 - Principais entradas e saídas do modelo DECOMP
Fonte: Adaptado do CEPEL (2011b) apud (Souza et al., 2014)

3.6 Modelo DESSEM

O modelo DESSEM foi desenvolvido para uma programação diária com discretização horária. Seu objetivo é determinar metas de geração hidro ou termoeletrica, por usina, que minimizem o custo total de operação do sistema, composto por uma parcela de custo presente, ao longo do horizonte de estudo e outra de custo futuro, cuja função é fornecida pelo modelo DECOMP (CEPEL, 2003). Com o modelo validado é possível determinar CMO de forma horária. As principais características do DESSEM são: permite o planejamento em curto prazo; o horizonte de previsão/planejamento é de uma semana; a discretização é horária.

3.7

Considerações sobre o capítulo

O capítulo iniciou com o estudo de planejamento da operação e expansão. O planejamento da operação sendo de médio prazo e o de expansão sendo de longo prazo. Dentre esses principais estudos de planejamento estão à projeção da demanda de energia, sua expansão e projeções da matriz elétrica, sob égide da EPE. Para esse planejamento da operação e expansão foram delineados os modelos matemáticos e computacionais desenvolvidos pelo CEPEL. Os modelos, NEWAVE, DECOMP e DESSEM.

Foi realizada também a relação entre os agentes institucionais do setor elétrico brasileiro, com as atividades de Governo, Regulatórias e Operacionais.

4

Metodologia

Nesta seção é apresentado o funcionamento do programa MCMV, sua importância e sua projeção de modo a corroborar com a proposta do trabalho.

É escolhido tipo de habitação e o modelo de painéis fotovoltaicos no programa MCMV, bem como a metodologia de trabalho, os parâmetros e o modelo matemático e computacional para a estimação do potencial de geração de energia fotovoltaica dentro do escopo do programa MCMV, além do impacto de geração fotovoltaica na operação do sistema.

A Metodologia proposta foi dividida em quatro etapas, facilitando a compreensão do trabalho, melhor visualizado na Figura 17.

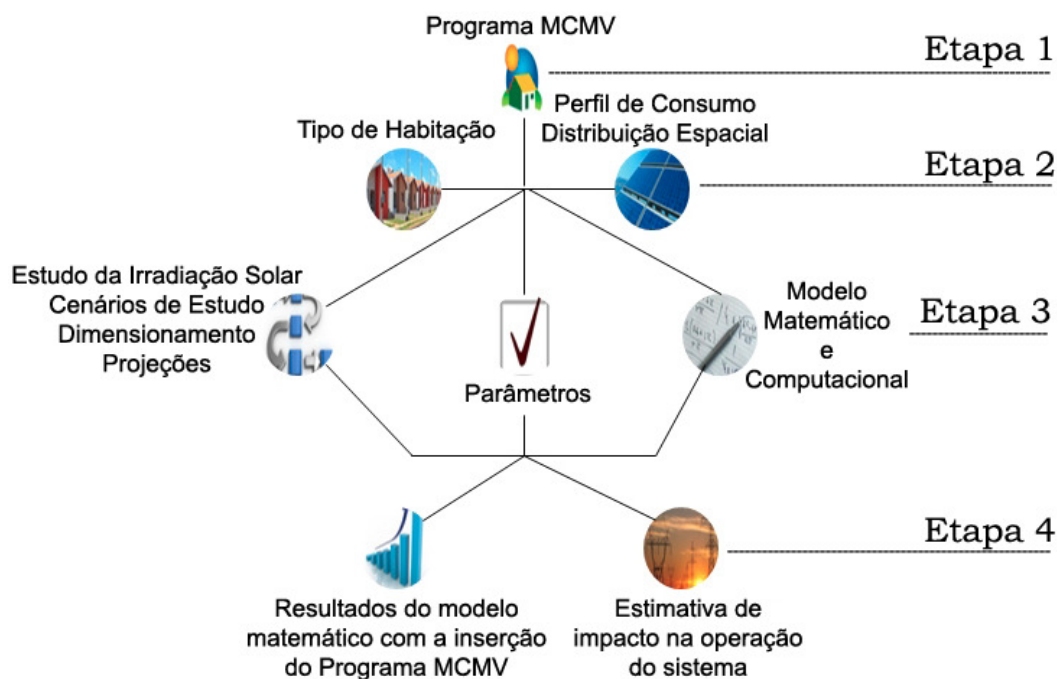


Figura 17 - Etapas da metodologia proposta
Fonte: Elaboração própria

- Etapa 1: Nessa etapa é feito um detalhamento do programa MCMV, seu lançamento, seu objetivo e sua forma de atendimento

a milhares de famílias brasileiras. Além da pesquisa das residências construídas e sua projeção do programa para os próximos anos.

- Etapa 2: O programa MCMV dispõe do financiamento de alguns tipos de imóveis, é definido o tipo de imóvel utilizado no estudo, a média do consumo de energia das habitações, evidenciando a habitação típica que será considerada nesse trabalho. Além disso, é mostrada sua distribuição espacial em todo território nacional.
- Etapa 3: Descreve a distribuição da irradiação solar no território nacional, os cenários utilizados neste trabalho, o dimensionamento do projeto solar por unidade habitacional, bem como as projeções do excedente de energia. Além disso, são definidos os parâmetros de *input* do modelo matemático e computacional NEWAVE, a fim de obter os resultados para a etapa seguinte.
- Etapa 4: Uma vez obtido os resultados do modelo, é feita a estimativa do impacto da geração fotovoltaica do programa MCMV na operação do sistema.

4.1

O Programa Minha Casa Minha Vida (MCMV)

O programa MCMV foi lançado pelo Governo Federal em março de 2009, em parceria com estados, municípios, empresas e entidades sem fins lucrativos. O programa tem por objetivo facilitar as condições de acesso ao imóvel próprio de classes menos abastadas da sociedade, em áreas urbanas e rurais, amenizando o problema do déficit habitacional no país e mudando a vida de milhares de famílias brasileiras (Vale, et al., 2017). O trabalhador que com juros do mercado obteria um financiamento habitacional a uma taxa de 11%, acaba tendo acesso a um financiamento a taxas reduzidas que variam entre 5,0% a 7,5%, (Portal Brasil, 2016) dependendo da faixa de renda que se encontra a família. O governo através do subsídio e das taxas reduzidas propicia uma capacidade maior de financiamento do imóvel.

O projeto ocorre da seguinte maneira, a construtora aprova o projeto junto a CAIXA que paga um valor delimitado de acordo com a faixa de renda que o projeto contempla. A construtora segue as especificações que são definidas em portarias do Ministério das Cidades: área mínima, especificação de piso,

especificação dos quadris, especificação dos telhados, etc. O valor financiado varia de acordo com a região, município e o estado participante. Após a aprovação do projeto da construtora, a CAIXA paga a esta um determinado valor do imóvel. A prefeitura é responsável por manter o cadastro e de fazer também o trabalho social com as famílias que irão morar no empreendimento, sendo também responsável por fazer a seleção dessas famílias e realizar o sorteio das casas.

O programa já entregou desde seu lançamento 2,5 milhões de casas. Conforme a Figura 18, a estimativa do governo para os próximos dois anos serão mais dois milhões de novas moradias construídas (Portal Brasil, 2016).

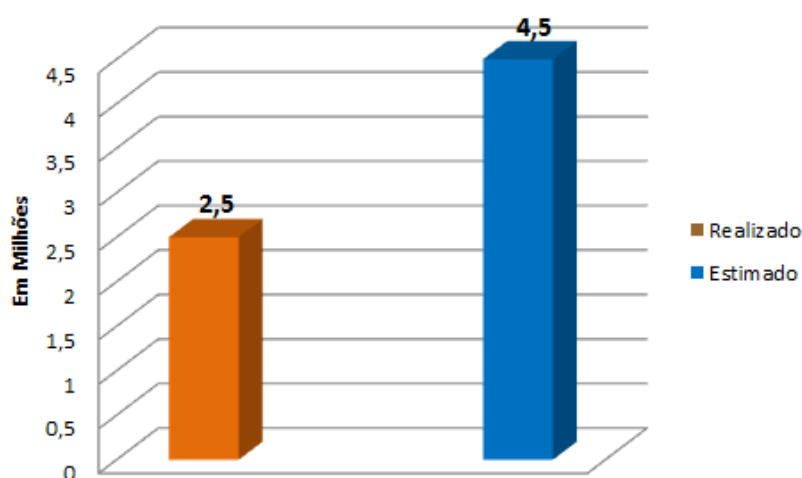


Figura 18 - Casas Construídas

Fonte: Elaboração própria com base nos dados (Portal Brasil, 2016)

4.2

Faixa de renda para o Programa (MCMV)

O Financiamento é dividido em faixas de renda mensais que variam de R\$1.800,00 à R\$9.000,00. O subsídio prestado pelo governo também será nivelado conforme a renda. À medida que a renda aumenta o subsídio deve diminuir (Brasil, 2017).

Em fevereiro de 2017, o Governo Federal divulgou novas regras para o financiamento da casa própria no MCMV. A proposta dos ajustes das faixas de renda e do limite do financiamento foram efetuados sob alegação de que um número maior de residências poderia ser custeado. Isto impulsionaria o setor da construção civil, que se encontra em crise, gerando empregos e oportunidades para que novas famílias consigam aderir o financiamento.

As faixas de renda foram reajustadas, conforme Tabela 3 a seguir. Além do reajuste das faixas, o teto do valor dos imóveis também foi reajustado para contemplar imóveis com valores mais elevados. São Paulo, Rio de Janeiro e Distrito Federal tiveram o teto reajustado de R\$225.000 para R\$ 240.000. E nas capitais de Norte a Nordeste de R\$ 170.000 o teto passa para R\$180.000. É possível o uso do FGTS (Fundo de Garantia do Tempo de Serviço) para fazer frente à parte do financiamento.

Tabela 3 - Renda familiar mensal

	Valor Mínimo	Valor Máximo	Encargos
Faixa 1		R\$ 1.800,00	
Faixa 1,5	R\$ 1.800,00	R\$ 2.600,00	5%
Faixa 2	R\$ 2.600,00	R\$ 4.000,00	5,5% a 7%
Faixa 3	R\$ 4.000,00	R\$ 9.000,00	8,16% a 9,16%

Fonte: Elaboração própria com base nos dados de Brasil, (2017)

4.3

Tipo de habitação social proposto no estudo e a média de consumo das edificações

O programa MCMV dispõe do financiamento para alguns tipos de imóveis. Residências unifamiliares denominadas Casas Populares, que possuem área útil mínima de aproximadamente 35 m². O programa conta também com apartamentos que são unidades habitacionais plurifamiliares, podendo ser edifícios e/ou conjuntos habitacionais, com área útil mínima de 42 m². A maioria dessas edificações não chega a 50 m² (Andrade et al., 2010). Para fins deste estudo utilizar-se-á uma área de 10 m² para se instalar o sistema fotovoltaico, visto que apenas uma aba do telhado deverá ser considerada ideal para instalação do sistema, por estar direcionada para o Norte geográfico, ideal para edificações situadas no hemisfério sul.

Para o estudo serão utilizadas residências unifamiliares, casas padronizadas conforme ilustra a fotografia da Figura 19. Mais a frente o tipo de geração fotovoltaico a ser utilizada será detalhado.



Figura 19 - Casas Populares
Fonte: Ciete Silvério apud São Paulo (2015)

Segundo Montenegro (2017) o perfil de consumo de energia de baixa renda situa-se na faixa de 100 kWh/mês, para Andrade et al. (2010) o consumo para as edificações do programa MCMV a média fica abaixo dos 100 kWh/mês. Para o estudo com base nas referências mencionadas utilizar-se-á média de 90 kWh/mês para o cálculo do dimensionamento do projeto solar fotovoltaico.

Uma maneira de minimizar o consumo de energia nessas habitações é a instalação do sistema de aquecimento solar para o chuveiro. Economia que pode chegar até 30% na conta de luz dos beneficiários do programa MCMV (Portal Brasil, 2015). O programa já conta com esse sistema instalado em algumas habitações, ainda assim o telhado dispõe de área disponível para a energia fotovoltaica proposta nesse trabalho.

Segundo Morgan (2014) uma das maneiras de também minimizar o consumo de energia em habitações sociais é a troca de aparelhos antigos pouco eficientes por mais econômicos que possuem o selo PROCEL (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica). O programa foi criado pelo governo federal em 1985, sendo gerenciado pela Eletrobras. E o selo foi instituído por Decreto Presidencial em 1993, visando o estímulo do uso racional e eficiente de energia. O selo é concedido a televisores, refrigeradores, freezers, condicionadores de ar, lâmpadas LED e até coletores solares medindo seu grau de eficiência.

4.4

O Programa MCMV nas regiões do Brasil

O programa MCMV atende a todas as regiões do Brasil, a região que mais apresenta habitações construídas é a região Sudeste, seguida das regiões Nordeste e Sul (Ministério do Planejamento, 2017). Na Figura 20 é apresentado o panorama das habitações sociais construídas do programa MCMV em todo território Nacional. Esta informação é importante, pois subsidiará a distribuição por subsistema da carga elétrica simulada com implantação do programa MCMV, objeto da presente pesquisa, quando da etapa de simulação do planejamento da operação.

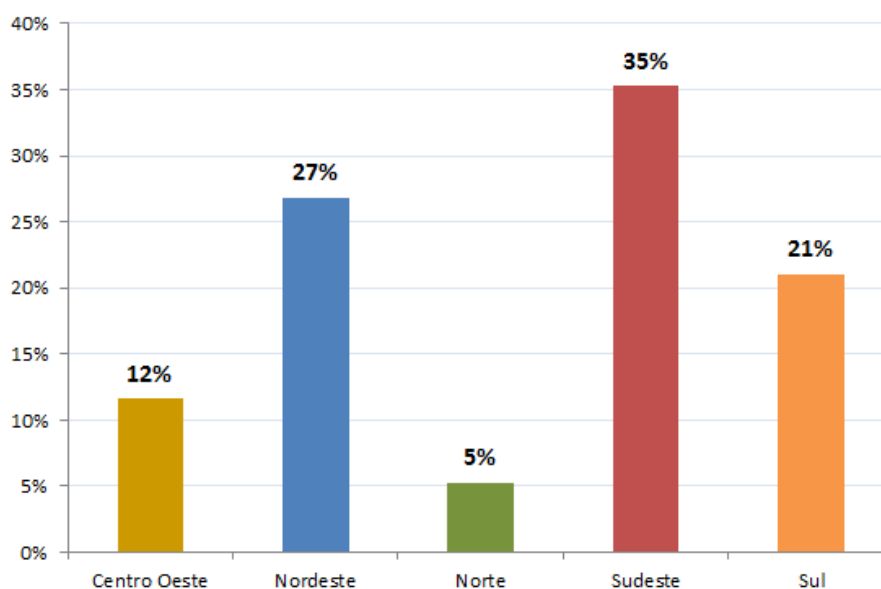


Figura 20 - O programa MCMV em território Nacional
 Fonte: Elaboração própria com base nos dados do Ministério do Planejamento
 (2017)

4.5

Mapeamento de energia solar nas regiões do Brasil

De acordo com Atlas Brasileira de Energia Solar (INPE, 2017), o Brasil possui um alto nível e baixa variabilidade da irradiação solar em comparação aos países onde a energia fotovoltaica já está bem estabelecida, como Alemanha, Espanha, Itália, Portugal e França.

No Brasil, a região Nordeste em comparação com as outras regiões apresenta a maior disponibilidade energética, seguida pelas regiões Centro-oeste e

Sudeste. A Figura 21 apresenta o valor médio anual do total diário de irradiação solar para as cinco regiões brasileiras, no tocante a irradiação global horizontal (que será utilizada nesse trabalho para fins de cálculo de estimativa de geração).

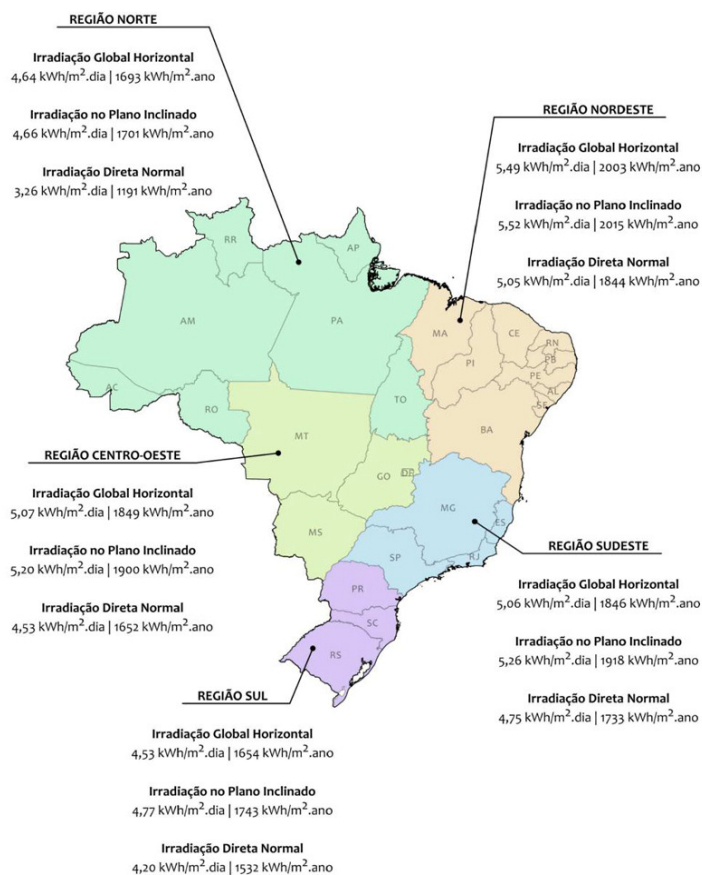


Figura 21 - Síntese dos níveis de irradiação solar por região
Fonte: INPE (2017)

4.6 Cenários para estudo da inserção da energia fotovoltaica

Como estimativas para os próximos anos foram elaborados três cenários com dois casos para estudo da inserção da energia fotovoltaica no programa MCMV. Sendo cenários base, otimista e pessimista para o caso sem ampliação do programa após os dois anos iniciais e cenários base, otimista e pessimista com ampliação para os anos seguintes. Mantendo o mesmo percentual das habitações nas regiões do Brasil, segundo o Ministério do Planejamento (2017) e apresentado na Figura 20, para o cenário base foi estimado 500 mil habitações a menos da projeção do governo de dois milhões de novas contratações (Portal Brasil, 2016), conforme será apresentado na Tabela 4, totalizando 1,5 milhões de residências.

Tabela 4 - Cenário Base

Região	Percentual	Nº de Casas
Centro-Oeste	12%	180.000
Nordeste	27%	405.000
Norte	5%	75.000
Sudeste	35%	525.000
Sul	21%	315.000
Total	100%	1.500.000

Fonte: Elaboração própria com base nos dados (Portal Brasil, 2016)

Para o cenário otimista foi mantido a projeção do governo para os próximos anos de dois milhões de novas residências construídas, como pode ser visto na Tabela 5.

Tabela 5 - Cenário Otimista

Região	Percentual	Nº de Casas
Centro-Oeste	12%	240.000
Nordeste	27%	540.000
Norte	5%	100.000
Sudeste	35%	700.000
Sul	21%	420.000
Total	100%	2.000.000

Fonte: Elaboração própria com base nos dados (Portal Brasil, 2016)

Para o cenário pessimista foi estimado um milhão de habitações a menos da projeção do governo, conforme Tabela 6, totalizando um milhão de residências.

Tabela 6 - Cenário Pessimista

Região	Percentual	Nº de Casas
Centro-Oeste	12%	120.000
Nordeste	27%	270.000
Norte	5%	50.000
Sudeste	35%	350.000
Sul	21%	210.000
Total	100%	1.000.000

Fonte: Elaboração própria com base nos dados (Portal Brasil, 2016)

4.7

Dimensionamento do Projeto Solar Fotovoltaico

A primeira variável do cálculo é o consumo médio mensal. Adotou-se o valor médio de 90 kWh/mês de consumo. Para essa etapa será dimensionado um sistema para atender 5% a mais desse valor médio.

O total de espaço necessário para instalação do sistema de geração fotovoltaica será calculado com o total de módulos fotovoltaicos utilizados. Os módulos seguem o mesmo padrão de medida em diversos fabricantes com 1 metro de largura e com comprimento de 1,65 a 2 metros. Os módulos possuem um conjunto 60 ou 72 células fotovoltaicas, dispendo de 240 W a 355 W de potência segundo Santana (2017), como pode ser visualizado na Tabela 7.

Tabela 7 - Tipos de módulos fotovoltaicos

Fabricante	Nº Células Fotovoltaicas	Potência (W)	Comprimento (m)	Largura (m)	Peso (kg)
Canadian	60	275~305	1,65	1,00	18,20
Solar	72	310~340	2,00	1,00	22,00
Globo Brasil	60	250~265	1,65	1,00	19,00
	72	305~320	2,00	1,00	27,00
Trina Solar	60	275~305	1,65	1,00	18,60
	72	320~335	2,00	1,00	22,50
Yingli Solar	60	240~260	1,65	1,00	18,50
	72	290~310	2,00	1,00	25,50

Fonte: Santana (2017)

Para o aproveitamento de energia (fator de eficiência) do inversor, segundo (Hirst et al., 2015), a limitação desses dispositivos se aproximam de 85%.

Considerando a ampliação do programa nas cinco regiões do Brasil, utilizou-se a irradiação global horizontal apresentada na Figura 21, com seus respectivos índices solarimétricos conforme Tabela 8.

Tabela 8 - Potencial solar diária média nas regiões brasileiras

Região	Média
Norte	4,71 kWh/m ² .dia
Nordeste	5,53 kWh/m ² .dia
Centro-Oeste	5,31 kWh/m ² .dia
Sudeste	5,03 kWh/m ² .dia
Sul	4,49 kWh/m ² .dia

Fonte: Elaboração própria com base nos dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar (INPE, 2017)

4.7.1

Cálculo do Dimensionamento Projeto Solar Fotovoltaico

As etapas do cálculo do dimensionamento do projeto solar são definidas como:

- Consumo médio diário (Wh/dia):

$$\text{Consumo médio diário} = \frac{\text{Consumo mensal}}{30} \quad (1)$$

- Potência gerada (W):

$$\text{Potência gerada} = \text{Potência do módulo} \times \text{Eficiência de conversão do inversor} \quad (2)$$

- Energia gerada dia por módulo (Wh/dia):

$$\text{Energia gerada} = \text{Potência gerada} \times \text{Irradiação solar} \quad (3)$$

- Número de módulos (Adimensional):

$$\text{Número de módulos} = \frac{\text{Consumo médio diário}}{\text{Energia gerada dia por módulo}} \quad (4)$$

- Área útil (m²):

$$\text{Área útil} = \text{Número de módulos} \times \text{Área do módulo} \quad (5)$$

4.7.2

Projeção do excedente de energia nas habitações sociais

O cálculo do dimensionamento do projeto solar fotovoltaico foi realizado nas habitações sociais para que fosse feito o atendimento da demanda de 90 kWh/mês e que gerasse um excedente de 5% a mais nas regiões do Brasil.

Independente do índice solarimétrico adotado nas regiões do Brasil, o resultado para essas regiões são os mesmos, serão necessários três módulos de 275 W, injetando na rede 5% a mais por residência (equivaleria a uma geração total de 94,5 kWh/mês), considerando que as medidas são lineares. Seguindo as etapas de cálculo mostradas anteriormente será realizada a estimativa para dimensionamento solar da região Norte do país como exemplo, adotando a mesma fórmula para as demais regiões. Na Tabela 9 são apresentados os resultados para todas as regiões do Brasil e as Tabelas 10, 11 e 12 são apresentadas as projeções de energia solar nas regiões para o caso sem ampliação nos cenários base, otimista e pessimista e as Tabelas 13, 14 e 15 são apresentadas as projeções para o caso com ampliação nos cenários base, otimista e pessimista para o programa MCMV.

Premissas de estimativa para o Dimensionamento Solar Fotovoltaico

- Percentual das habitações construídas.
 - Consumo médio adotado de 94,5 kWh/mês.
 - Potência do módulo de 275 W
 - Área do módulo de 1,65 m²
 - Tempo médio diário de insolação da Região.
 - Fabricante Canadian
 - Aproveitamento de energia (fator de eficiência) de 85%.
-
- Consumo médio diário (Wh/dia):

$$\text{Consumo médio diário} = \frac{94500 \text{ Wh/mês}}{30} = 3150 \text{ Wh/dia}$$

- Potência gerada (W):

$$\text{Potência gerada} = 275 \times 0,85 = 233,75W$$

- Energia gerada dia por módulo (Wh/dia):

$$\text{Energia gerada} = 233,75 \times 4,64 = 1084,6 \text{ Wh/dia}$$

- Número de módulos (Adimensional):

$$\text{Número de módulos} = \frac{3150 \text{ Wh/dia}}{1084,6 \text{ Wh/dia}} = 2,90$$

- Área útil (m²):

$$\text{Área útil} = 3 \times 1,65 \text{ m}^2 = 4,95 \text{ m}^2$$

Percebe-se que a área requerida para a instalação dos módulos é compatível com a área de telhado das casas populares.

Tabela 9 - Resultado do Dimensionamento Solar Fotovoltaico

Região	Número estimado de Módulos	Área estimada
Norte	3,00	4,95m ²
Nordeste	3,00	4,95m ²
Centro-Oeste	3,00	4,95m ²
Sudeste	3,00	4,95m ²
Sul	3,00	4,95m ²

Fonte: Elaboração própria

A Tabela 10 apresenta o montante de energia para o cenário base do caso sem ampliação, totalizando a inserção no sistema de 6,75 GWh.

Tabela 10 - Cenário Base – 1,5 milhão de novas residências

Região	Percentual	Nº de Casas	Geração kWh
Centro-Oeste	12%	180.000	810.000
Nordeste	27%	405.000	1.822.500
Norte	5%	75.000	337.500
Sudeste	35%	525.000	2.362.500
Sul	21%	315.000	1.417.500
Total	100%	1.500.000	6.750.000

Fonte: Elaboração própria

A Tabela 11 apresenta o montante de energia para o cenário otimista do caso sem ampliação, totalizando a inserção no sistema de 9 GWh.

Tabela 11 - Cenário Otimista – 2 milhões de novas residências

Região	Percentual	Nº de Casas	Geração kWh
Centro-Oeste	12%	240.000	1.080.000
Nordeste	27%	540.000	2.430.000
Norte	5%	100.000	450.000
Sudeste	35%	700.000	3.150.000
Sul	21%	420.000	1.890.000
Total	100%	2.000.000	9.000.000

Fonte: Elaboração própria

A Tabela 12 apresenta o montante de energia para o cenário pessimista do caso sem ampliação, totalizando a inserção no sistema de 4,5 GWh.

Tabela 12 - Cenário Pessimista – 1 milhão de novas residências

Região	Percentual	Nº de Casas	Geração kWh
Centro-Oeste	12%	120.000	540.000
Nordeste	27%	270.000	1.215.000
Norte	5%	50.000	225.000
Sudeste	35%	350.000	1.575.000
Sul	21%	210.000	945.000
Total	100%	1.000.000	4.500.000

Fonte: Elaboração própria

A Tabela 13 apresenta o montante de energia para o cenário base com continuidade do programa MCMV do caso com ampliação, totalizando a inserção no sistema de 16,8 GWh.

Tabela 13 - Cenário Base – 3,7 milhões de novas residências

Região	Percentual	Nº de Casas	Geração kWh
Centro-Oeste	12%	450.000	2.025.000
Nordeste	27%	1.012.500	4.556.250
Norte	5%	187.500	843.750
Sudeste	35%	1.312.500	5.906.250
Sul	21%	787.500	3.543.750
Total	100%	3.750.000	16.875.000

Fonte: Elaboração própria

A Tabela 14 apresenta o montante de energia para o cenário otimista com continuidade do programa MCMV do caso com ampliação, totalizando a inserção no sistema de 22,5 GWh.

Tabela 14 - Cenário Otimista – 5 milhões de novas residências

Região	Percentual	Nº de Casas	Geração kWh
Centro-Oeste	12%	600.000	2.700.000
Nordeste	27%	1.350.000	6.075.000
Norte	5%	250.000	1.125.000
Sudeste	35%	1.750.000	7.875.000
Sul	21%	1.050.000	4.725.000
Total	100%	5.000.000	22.500.000

Fonte: Elaboração própria

A Tabela 15 apresenta o montante de energia para o cenário pessimista com continuidade do programa MCMV do caso com ampliação, totalizando a inserção no sistema de 11,2 GWh.

Tabela 15 - Cenário Pessimista – 2,5 milhões de novas residências

Região	Percentual	Nº de Casas	Geração kWh
Centro-Oeste	12%	300.000	1.350.000
Nordeste	27%	675.000	3.037.500
Norte	5%	125.000	562.500
Sudeste	35%	875.000	3.937.500
Sul	21%	525.000	2.362.500
Total	100%	2.500.000	11.250.000

Fonte: Elaboração própria

4.8

Simulação dos cenários de estudo

Mensalmente o ONS produz um conjunto de arquivos, denominados *deck* para serem utilizados no NEWAVE para obtenção do CMO. Esses dados são públicos e podem ser acessados no site do ONS. Para o trabalho foi utilizado o *deck* fornecido pelo ONS referente ao mês de Janeiro de 2018.

As usinas não despachadas centralizadamente pelo ONS são modeladas no arquivo **sistema.dat** do *deck*, entre elas a geração eólica e a solar. Dessa forma o aumento da capacidade de geração foi modelado nesse arquivo.

Para obtenção do valor exato de geração solar acrescido ao NEWAVE foi modelada a inserção da energia gerada pelas residências mantendo a projeção de construção em todo território nacional nos três cenários tanto para o caso sem ampliação, quanto com ampliação do programa MCMV, de forma constante mês a mês, ou seja, de forma que no final do segundo ano para o caso sem ampliação é atingido à meta de construção das residências e para o caso com ampliação é atingido à meta no final do horizonte de estudo, ou seja, no final do quinto ano. Sendo assim foram realizadas seis rodadas do NEWAVE, além da rodada oficial, duas para o caso base, duas para o otimista e duas para o pessimista.

Dado este contexto, o presente trabalho com o auxílio do software tem como objetivo medir o impacto na operação do sistema elétrico brasileiro, caso houvesse a inclusão de geração fotovoltaica dentro do programa MCMV. Os resultados comparativos desse estudo envolvem:

- Valor esperado do Custo Total de Operação.
- Custo Marginal de Operação.
- Risco de Déficit.
- Geração Térmica.
- Geração Hidráulica.

Além dos resultados comparativos para este trabalho, o modelo apresenta diversas saídas como Energia Armazenada Final, Intercâmbio de Energia, Energia Natural Afluenta Esperada para o Futuro (ENA), Vertimento, Valor Esperado da Energia não Suprida.

No entanto entende-se que as variáveis escolhidas são mais representativas para avaliação do impacto na energia fotovoltaica na operação do sistema.

A Figura 22 representa o horizonte de estudo do NEWAVE para o caso sem ampliação do programa MCMV com a aplicação dos três cenários estudados.

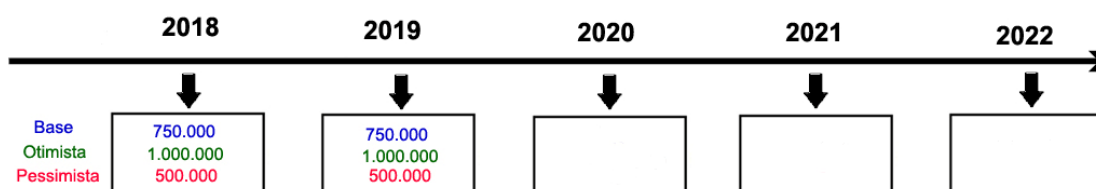


Figura 22 - Horizonte de estudo do NEWAVE sem ampliação do programa MCMV
Fonte: Elaboração própria

A Figura 23 representa o horizonte de estudo do NEWAVE para o caso com ampliação do programa MCMV com a aplicação dos três cenários estudados.

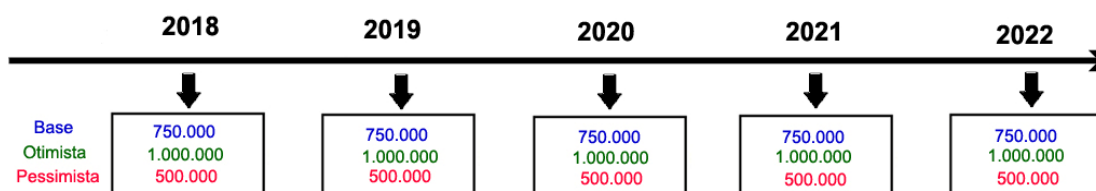


Figura 23 - Horizonte de estudo do NEWAVE com ampliação do programa MCMV
Fonte: Elaboração própria

Para obtenção destes resultados, será utilizado o software NEWAVE, cujo problema de operação hidrotérmica em sistemas equivalentes de energia é resolvido a cada estágio, descritos no apêndice A.

Resultados

Nessa etapa do trabalho são apresentados os resultados da metodologia proposta no capítulo anterior. Todas as simulações do planejamento da operação serão comparadas com o caso proveniente do *deck* fornecido pelo ONS, referente ao mês de Janeiro de 2018, que foi denominada “rodada oficial”. Com base nessa rodada oficial, pode-se fazer uma comparação das simulações com a inserção da energia solar com o Programa MCMV com a simulação real considerando as premissas de operação adotadas pelo ONS no SIN. Diante do exposto serão avaliados o Valor esperado do Custo Total de Operação, Custo Marginal de Operação, Risco de Déficit, Geração Térmica e Geração Hidráulica dos cenários base, otimista e pessimista sem a ampliação e com ampliação do programa MCMV a partir de 2020.

5.1

Valor esperado do Custo Total de Operação

A função objetivo do NEWAVE minimiza o valor esperado do Custo Total de Operação no horizonte de cinco anos.

O impacto da entrada de energia fotovoltaica no sistema do caso sem ampliação provoca uma redução de custos de -5,03% para o cenário otimista em comparação a rodada oficial, já o cenário otimista do caso com ampliação apresenta uma redução de -6,38%, o que em termos financeiros resulta em uma economia de R\$ 1,4 bilhão para o caso sem ampliação e R\$ 1,8 bilhão para o caso com ampliação. Seguidos dos cenários base com uma economia de -4,34% e para o pessimista uma economia de -4,14% para o caso sem ampliação, sendo -6,06% para o cenário base e -4,94% para o cenário pessimista caso com ampliação. Na Tabela 16 são mostrados os resultados dos casos simulados.

Tabela 16 - Valor esperado do custo total de operação nos cenários

Estudo de caso	Cenários	Valor esperado da operação em R\$ Milhões	Economia gerada em R\$ Milhões	Percentual de redução de custos
Sem ampliação do programa MCMV	Oficial	28257,07	-	-
	Base	27029,83	1483,61	-4,34%
	Otimista	26835,02	1487,61	-5,03%
	Pessimista	27088,56	1318,51	-4,14%
Com ampliação do programa MCMV	Oficial	28257,07	-	-
	Base	26544,26	1712,81	-6,06%
	Otimista	26453,74	1803,33	-6,38%
	Pessimista	26862,53	1394,54	-4,94%

Fonte: Elaboração própria

A Figura 24 apresenta graficamente os resultados de entrada de energia fotovoltaica sem a ampliação do programa, o custo total da operação da rodada oficial e as reduções de custos uma vez que um dos cenários fosse concretizado e sua redução percentual comparada à rodada oficial.

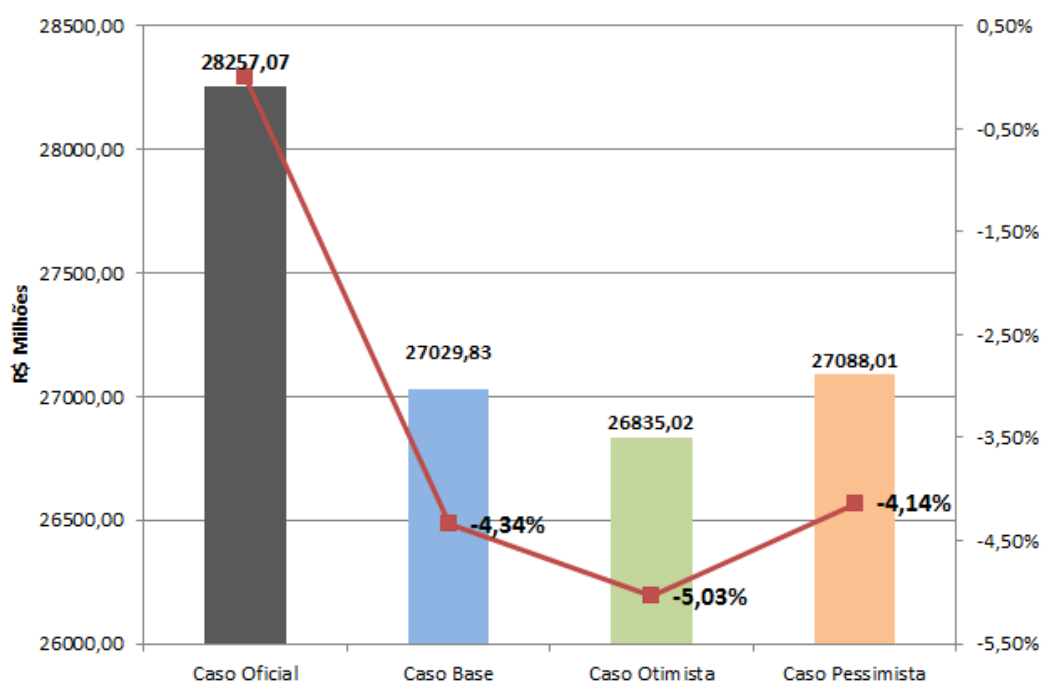


Figura 24 - Valor esperado do custo total de operação nos cenários sem ampliação do programa MCMV

Fonte: Elaboração própria

A Figura 25 apresenta graficamente os resultados de entrada de energia fotovoltaica com a ampliação do programa, o custo total da operação da rodada

oficial e as reduções de custos uma vez que um dos cenários fosse concretizado e sua redução percentual comparada à rodada oficial.

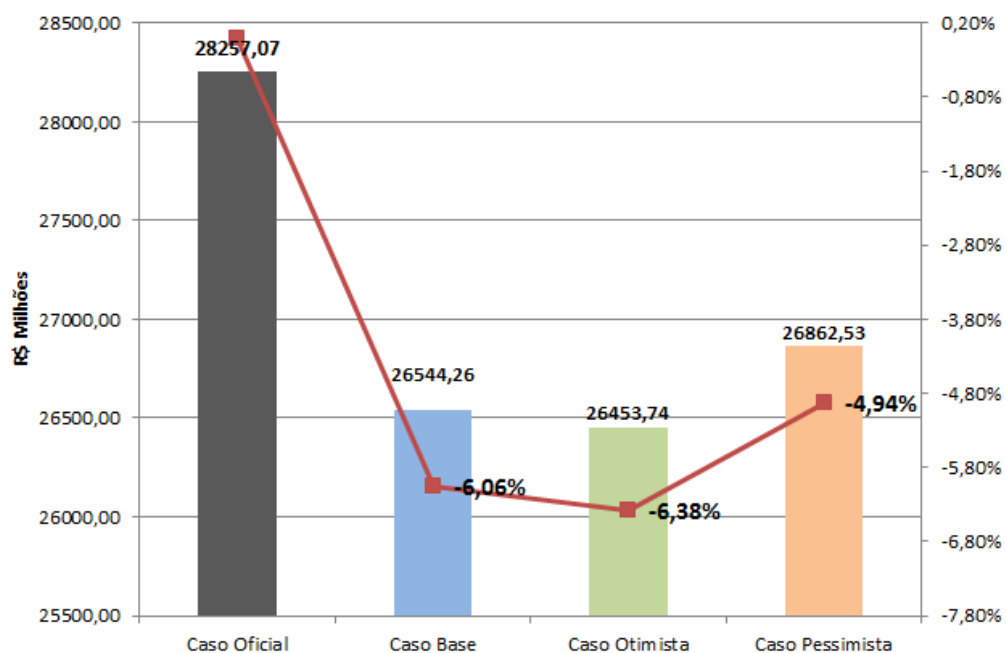


Figura 25 - Valor esperado do custo total de operação nos cenários com ampliação do programa MCMV

Fonte: Elaboração própria

A Figura 26 apresenta graficamente os resultados dos casos simulados sem ampliação do programa e com ampliação do programa, comparados à rodada oficial.

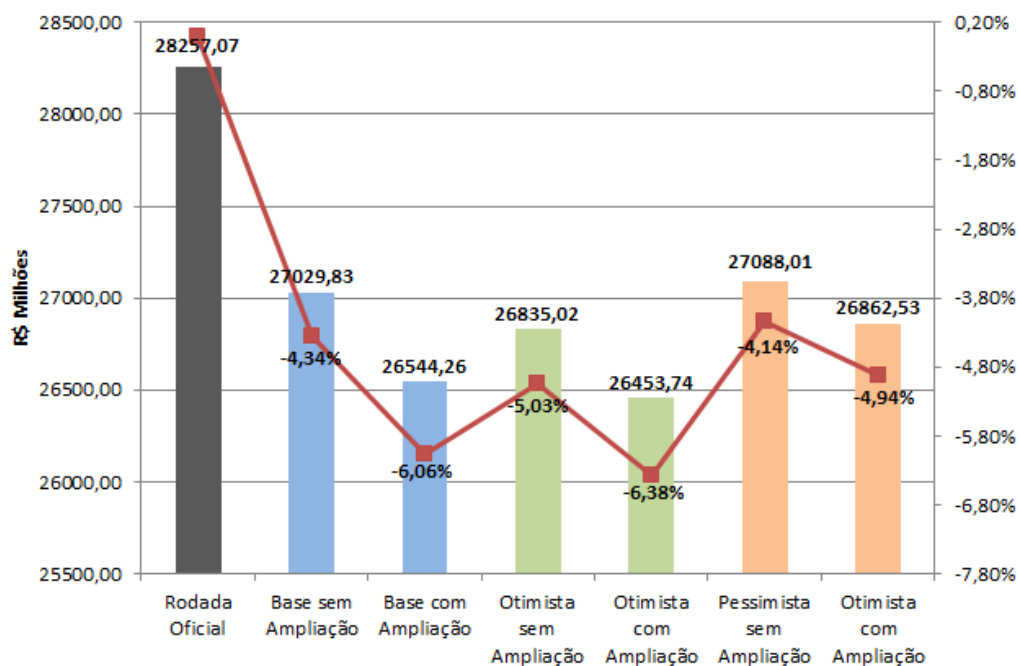


Figura 26 - Resultados dos casos com e sem ampliação do programa MCMV
Fonte: Elaboração própria

5.2 Custo Marginal de Operação (CMO)

Após a convergência e o término da rodada do NEWAVE, o modelo apresenta também como resultados o Custo Marginal de Operação (CMO) dos cenários considerados, que significa o custo por unidade produzida para atender a um acréscimo de carga no sistema, conforme Resolução Normativa ANEEL nº109 de 2004.

O Custo Marginal de Operação também é o referencial para o despacho de usinas térmicas. Assim quando as usinas térmicas estão com o custo variável unitário abaixo do CMO determinado semanalmente pelo ONS, são despachadas por ordem de mérito¹.

Na Figura 27 é apresentado o início do estudo com as médias da rodada da rodada oficial, permitindo o comparativo de um possível aumento ou redução do

¹ Térmicas despachadas pelo ONS para atendimento da carga que apresentam custo variável unitário (CVU) menor que o CMO.

CMO para os casos com ampliação e sem ampliação do programa MCMV.

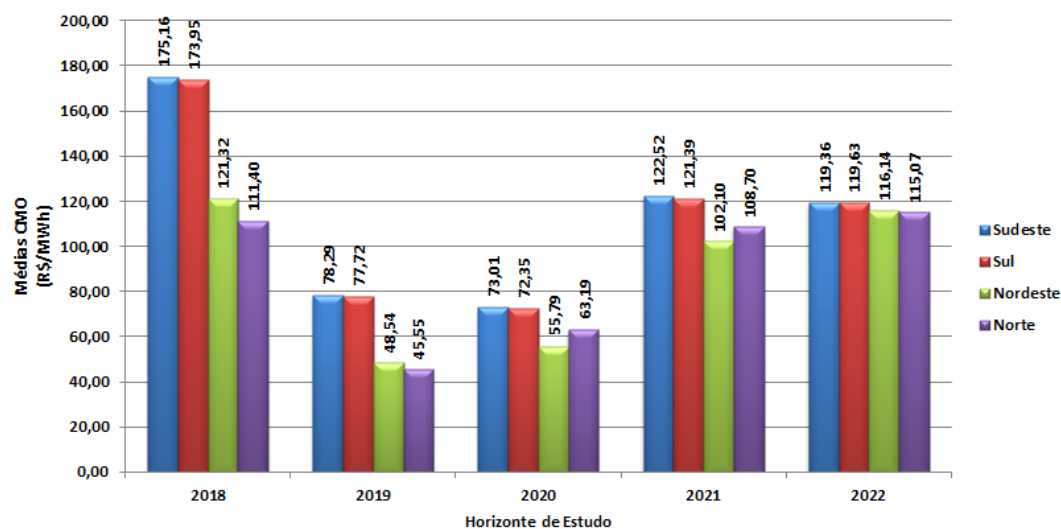


Figura 27 - Médias da rodada oficial
Fonte: Elaboração própria

A Tabela 17 apresenta os resultados das médias de ambos os casos para análise gráfica posteriormente.

A seguir são apresentadas as figuras comparando o resultado para cada subsistema de ambos os casos. A Figura 28 apresenta o resultado do subsistema Sudeste do caso sem ampliação. O cenário otimista em 2018 apresentou um percentual maior de redução do CMO, alternado o maior percentual de redução com o cenário base.

Tabela 17 - Médias do CMO por cenários

Cenários	Subsistemas	2018	2019	2020	2021	2022
Base sem ampliação	Sudeste	169,25	76,64	67,26	115,66	112,75
	Sul	167,14	76,15	66,66	114,45	112,97
	Nordeste	116,60	46,52	51,37	98,33	109,20
	Norte	106,92	44,02	57,57	103,49	107,00
Base com ampliação	Sudeste	169,76	77,04	65,72	111,38	108,72
	Sul	167,52	76,38	65,14	110,12	108,52
	Nordeste	115,53	46,73	49,86	94,07	104,86
	Norte	105,69	44,95	56,37	97,83	103,37
Otimista sem ampliação	Sudeste	166,58	77,62	67,29	114,63	114,43
	Sul	164,31	77,07	66,69	113,50	114,55
	Nordeste	115,41	46,49	50,64	97,08	110,92
	Norte	105,52	44,47	57,12	101,27	109,71
Otimista com ampliação	Sudeste	163,07	74,51	63,60	107,72	106,30
	Sul	159,41	73,80	62,99	106,57	106,67
	Nordeste	115,71	45,37	48,81	90,73	102,59
	Norte	106,83	43,70	54,58	95,59	101,14
Pessimista sem ampliação	Sudeste	169,21	75,86	70,21	117,29	114,46
	Sul	170,34	75,36	69,76	116,18	114,86
	Nordeste	116,05	47,27	52,88	97,84	110,34
	Norte	105,60	44,60	60,10	103,29	109,44
Pessimista com ampliação	Sudeste	165,77	77,24	69,30	113,50	110,93
	Sul	162,07	76,56	68,54	112,30	111,21
	Nordeste	115,81	48,00	51,18	94,75	107,80
	Norte	105,13	45,73	58,50	100,08	106,56

Fonte: Elaboração própria

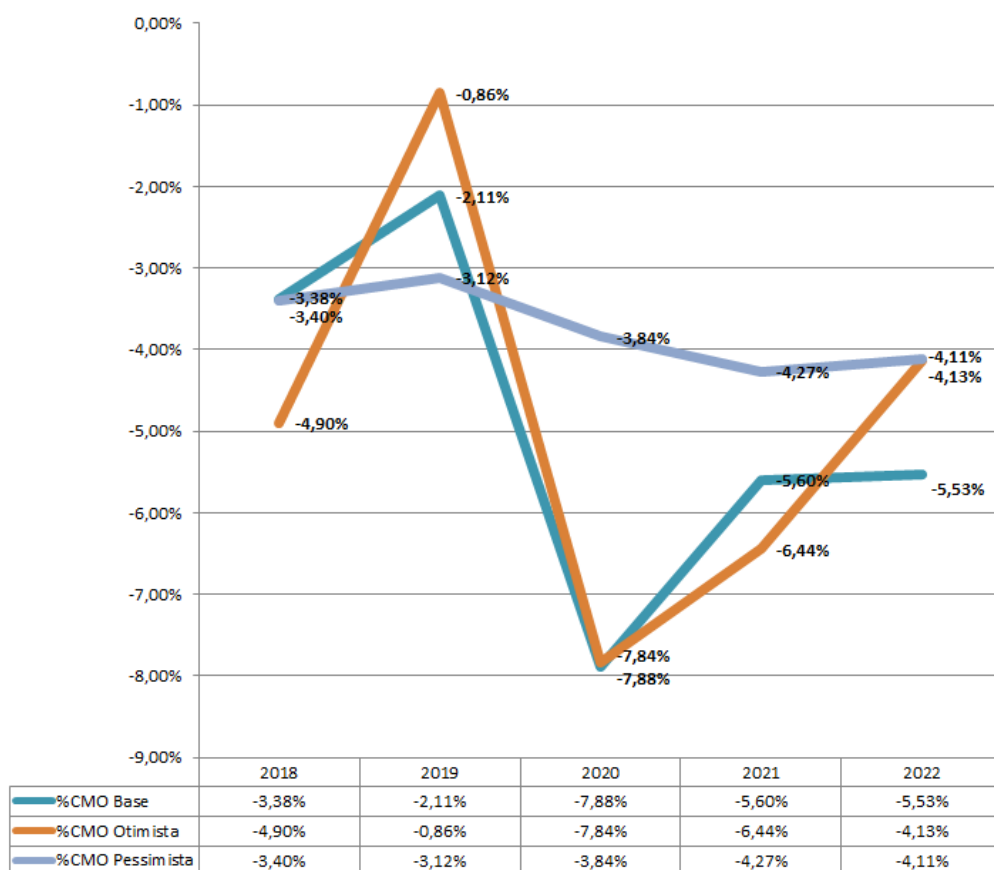


Figura 28 - Percentual de variação de CMO no subsistema SE no caso sem ampliação
Fonte: Elaboração própria

A Figura 29 apresenta o resultado do subsistema Sudeste do caso com ampliação. O caso otimista foi o que apresentou o maior percentual de redução do CMO.

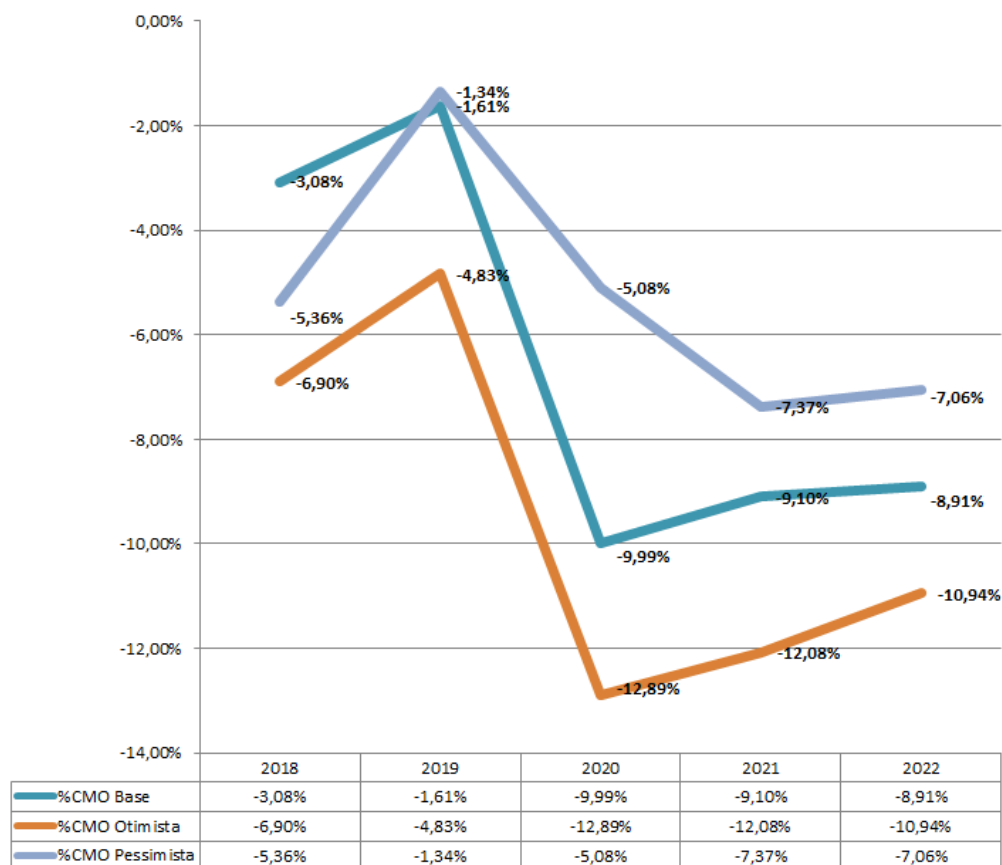


Figura 29 - Percentual de variação de CMO no subsistema SE no caso com ampliação
Fonte: Elaboração própria

A Tabela 18 apresenta um comparativo do percentual médio de redução do subsistema Sudeste para ambos os casos.

Tabela 18 - Percentual médio de redução do CMO no subsistema SE

Cenários		2018	2019	2020	2021	2022	Média
Sem Ampliação	Base	-3,38%	-2,11%	-7,88%	-5,60%	-5,53%	-4,90%
	Otimista	-4,90%	-0,86%	-7,84%	-6,44%	-4,13%	-4,83%
	Pessimista	-3,40%	-3,12%	-3,84%	-4,27%	-4,11%	-3,75%
Com Ampliação	Base	-3,08%	-1,61%	-9,99%	-9,10%	-8,91%	-6,54%
	Otimista	-6,90%	-4,83%	-12,89%	-12,08%	-10,94%	-9,53%
	Pessimista	-5,36%	-1,34%	-5,08%	-7,37%	-7,06%	-5,24%

Fonte: Elaboração própria

A Figura 30 apresenta o resultado do subsistema Sul do caso sem ampliação. O cenário otimista apresentou um desempenho semelhante ao subsistema Sudeste com um percentual maior de redução do CMO, alternado o maior percentual de redução com o cenário base.

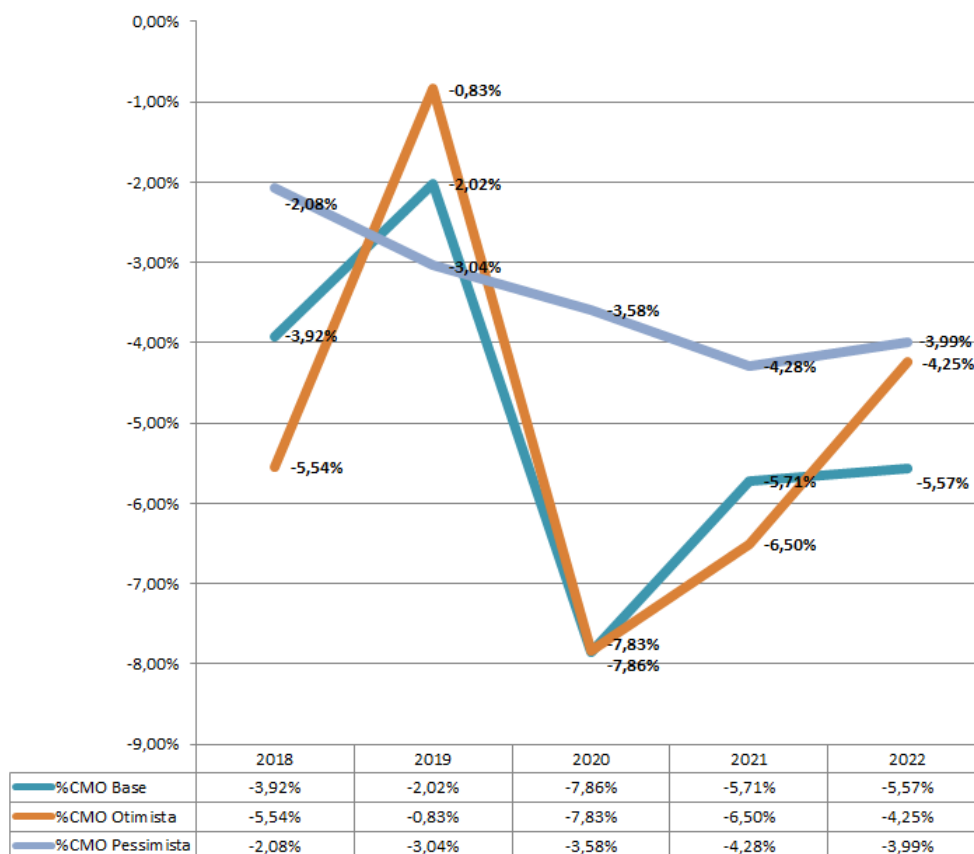


Figura 30 - Percentual de variação de CMO no subsistema S no caso sem ampliação
Fonte: Elaboração própria

A Figura 31 apresenta o resultado do subsistema Sul do caso com ampliação. O caso otimista também apresentou desempenho semelhante do subsistema Sudeste com maior percentual de redução do CMO.

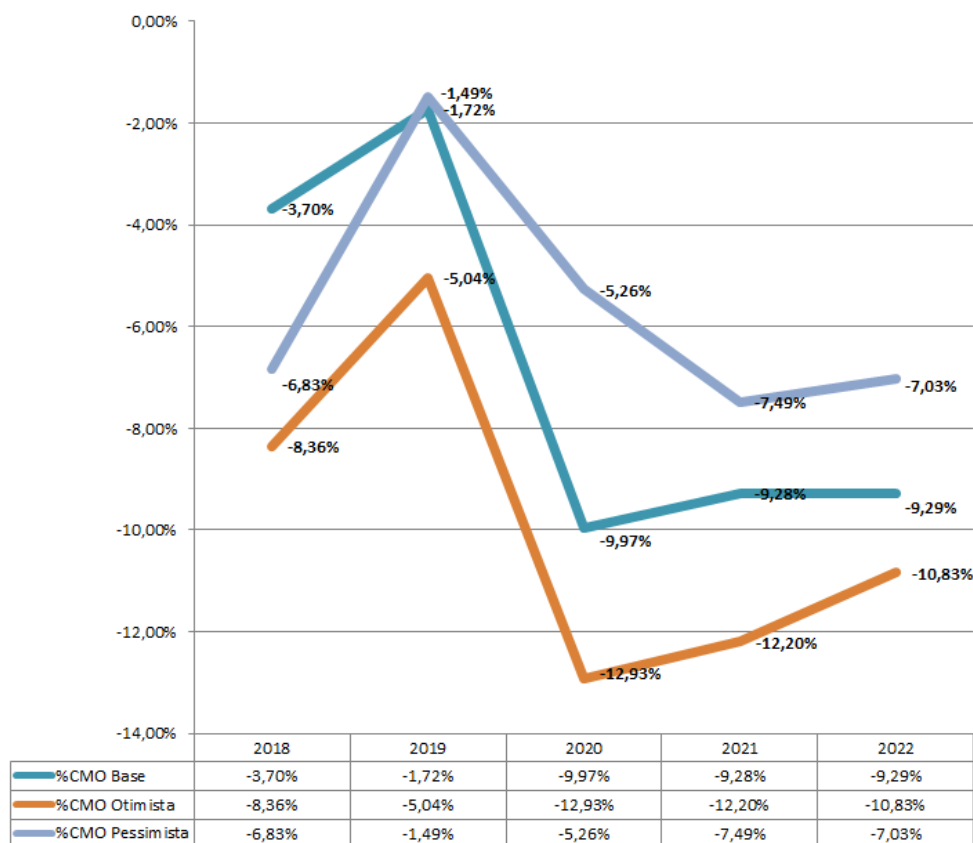


Figura 31 - Percentual de variação de CMO no subsistema S no caso com ampliação
Fonte: Elaboração própria

A Tabela 19 apresenta um comparativo do percentual médio de redução do subsistema Sul para ambos os casos.

Tabela 19 - Percentual médio de redução do CMO no subsistema S

	Cenários	2018	2019	2020	2021	2022	Média
Sem Ampliação	Base	-3,92%	-2,02%	-7,86%	-5,71%	-5,57%	-5,01%
	Otimista	-5,54%	-0,83%	-7,83%	-6,50%	-4,25%	-4,99%
	Pessimista	-2,08%	-3,04%	-3,58%	-4,28%	-3,99%	-3,39%
Com Ampliação	Base	-3,70%	-1,72%	-9,97%	-9,28%	-9,29%	-6,79%
	Otimista	-8,36%	-5,04%	-12,93%	-12,20%	-10,83%	-9,87%
	Pessimista	-6,83%	-1,49%	-5,26%	-7,49%	-7,03%	-5,62%

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 32 apresenta o resultado do subsistema Nordeste do caso sem ampliação. O cenário otimista apresentou um desempenho superior aos outros cenários com exceção ao final do horizonte.

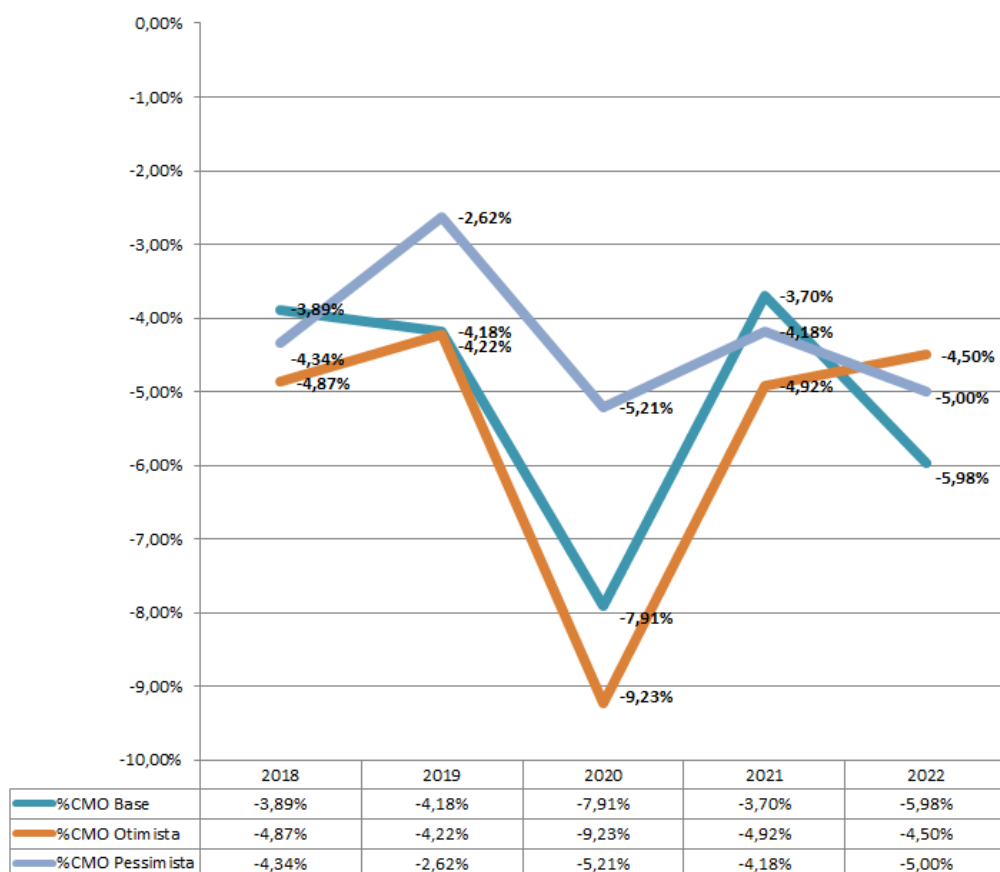


Figura 32 - Percentual de variação de CMO no subsistema NE no caso sem ampliação
Fonte: Elaboração própria

A Figura 33 apresenta o resultado do subsistema Nordeste do caso com ampliação. O cenário otimista inicia o horizonte com menor redução que o cenário base, mas apresentou a maior redução no restante do horizonte.

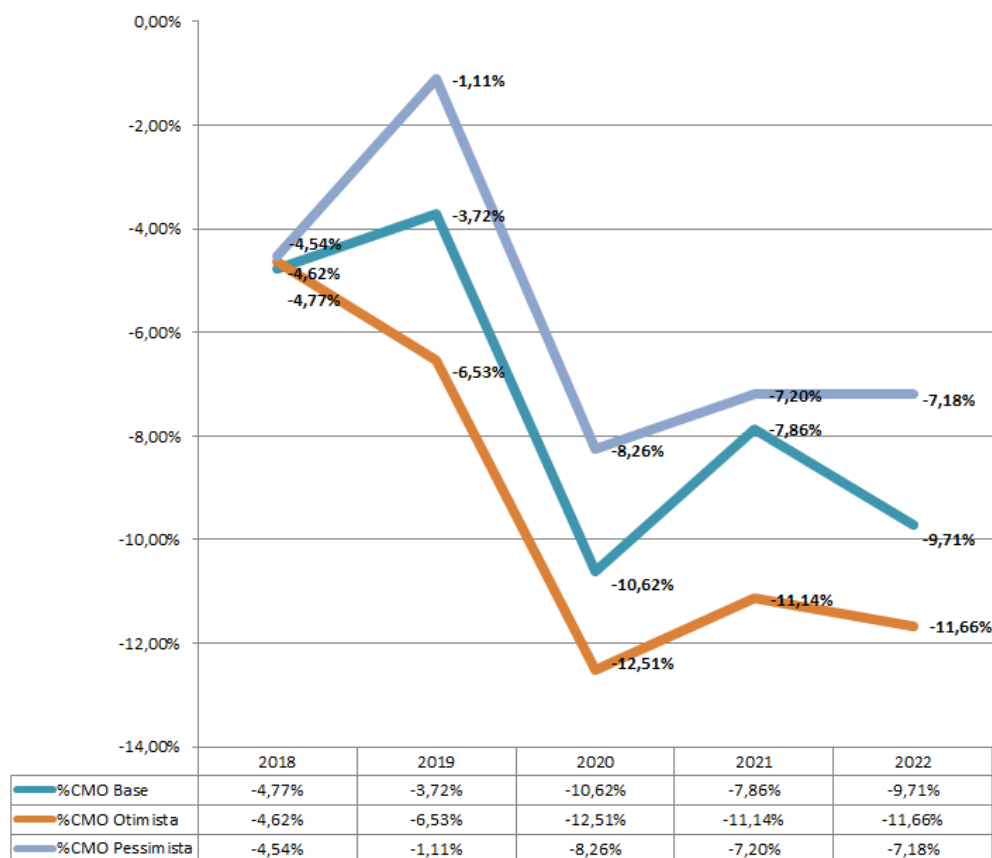


Figura 33 - Percentual de variação de CMO no subsistema NE no caso com ampliação
Fonte: Elaboração própria

A Tabela 20 apresenta um comparativo do percentual médio de redução do subsistema Nordeste para ambos os casos.

Tabela 20 - Percentual médio de redução do CMO no subsistema NE

Cenários		2018	2019	2020	2021	2022	Média
Sem Ampliação	Base	-3,89%	-4,18%	-7,91%	-3,70%	-5,98%	-5,13%
	Otimista	-4,87%	-4,22%	-9,23%	-4,92%	-4,50%	-5,55%
	Pessimista	-4,34%	-2,62%	-5,21%	-4,18%	-5,00%	-4,27%
Com Ampliação	Base	-4,77%	-3,72%	-10,62%	-7,86%	-9,71%	-7,34%
	Otimista	-4,62%	-6,53%	-12,51%	-11,14%	-11,66%	-9,29%
	Pessimista	-4,54%	-1,11%	-8,26%	-7,20%	-7,18%	-5,66%

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 34 apresenta o resultado do subsistema Norte do caso sem ampliação. O cenário otimista apresenta no início do horizonte de estudo uma redução menor do CMO, alternando com o cenário base ao longo do horizonte.

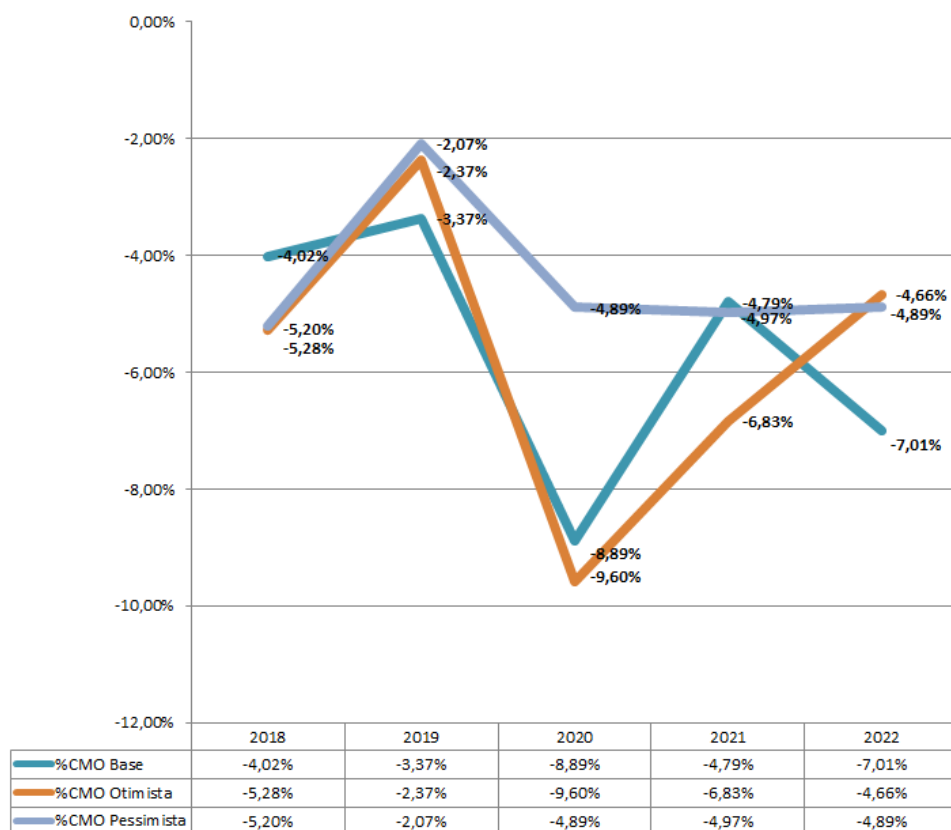


Figura 34 - Percentual de variação de CMO no subsistema N no caso sem ampliação
Fonte: Elaboração própria

A Figura 35 apresenta o resultado do subsistema Norte do caso com ampliação. O início do horizonte de estudo começa com o cenário pessimista apresentando a maior percentual de redução do CMO, seguido pelo cenário otimista no restante do horizonte.

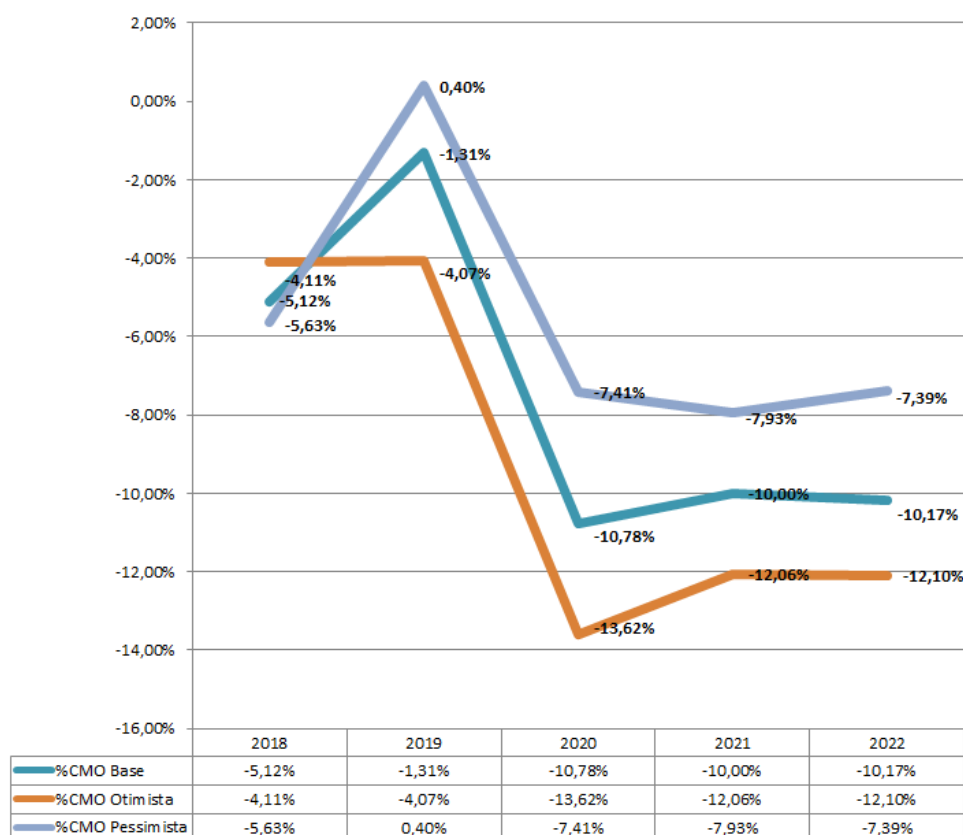


Figura 35 - Percentual de variação de CMO no subsistema N no caso com ampliação
Fonte: Elaboração própria

A Tabela 21 apresenta um comparativo do percentual médio de redução do subsistema Norte para ambos os casos.

Tabela 21 - Percentual médio de redução do CMO no subsistema N

	Cenários	2018	2019	2020	2021	2022	Média
Sem Ampliação	Base	-4,02%	-3,37%	-8,89%	-4,79%	-7,01%	-5,62%
	Otimista	-5,28%	-2,37%	-9,60%	-6,83%	-4,66%	-5,75%
	Pessimista	-5,20%	-2,07%	-4,89%	-4,97%	-4,89%	-4,41%
Com Ampliação	Base	-5,12%	-1,31%	-10,78%	-10,00%	-10,17%	-7,48%
	Otimista	-4,11%	-4,07%	-13,62%	-12,06%	-12,10%	-9,19%
	Pessimista	-5,63%	0,40%	-7,41%	-7,93%	-7,39%	-5,59%

Fonte: Elaboração própria.

5.3 Risco de Déficit

O risco de déficit é um importante indicador de segurança energética no estudo do planejamento de médio prazo no setor de energia e é também uma variável de saída do software NEWAVE, podendo ser definido como probabilidade da carga não ser atendida em determinado intervalo de tempo, dado a oferta de energia. A ocorrência do déficit de energia tem como consequência um racionamento, ocasionando inclusive, impactos negativos no cenário econômico de um país.

Sendo a rodada oficial o fator inicial de comparação aos casos de inserção de energia fotovoltaica no sistema, foi possível comparar a redução ou aumento do montante de déficit (energia não suprida) e o percentual de ocorrência na maioria dos cenários. Os subsistemas nordeste e norte não apresentaram risco de déficit, sendo analisados apenas os subsistemas sudeste e sul.

Partindo do caso sem ampliação do programa MCMV, o subsistema sudeste apresenta redução do montante de risco déficit no início do horizonte em comparação ao caso oficial, tendo um pequeno aumento nos anos 2019 e 2020 e seguindo o padrão de redução para os anos subsequentes. A Figura 36 apresenta os resultados para o subsistema sudeste, além do maior percentual de ocorrência por ano.

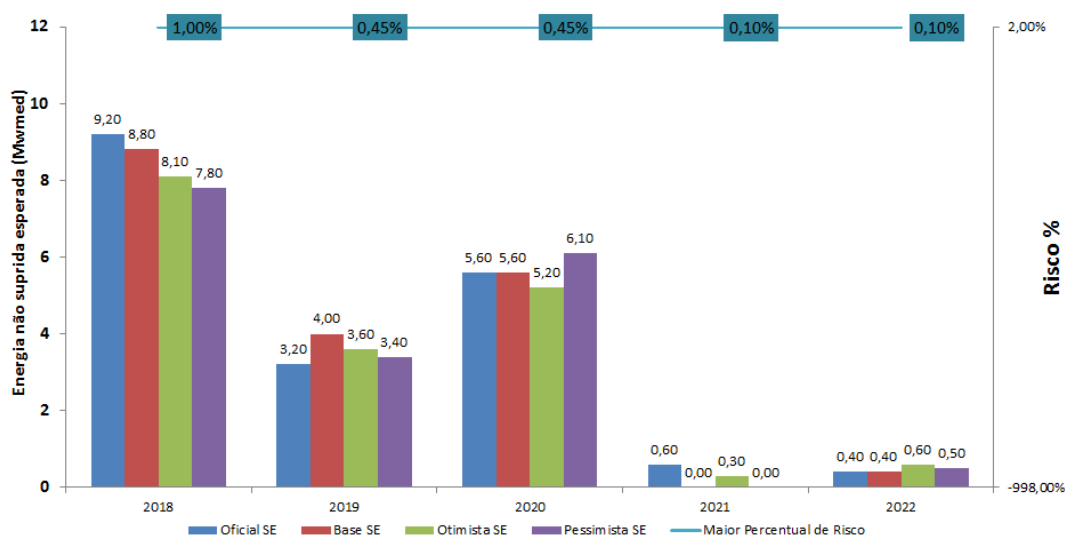


Figura 36 - Risco de déficit para o subsistema sudeste
Fonte: Elaboração própria

O subsistema sul registra uma pequena variação de aumento e redução do montante de risco de déficit ao longo do horizonte de estudo em comparação a rodada oficial, como apresenta a Figura 37, além do maior percentual de ocorrência por ano.

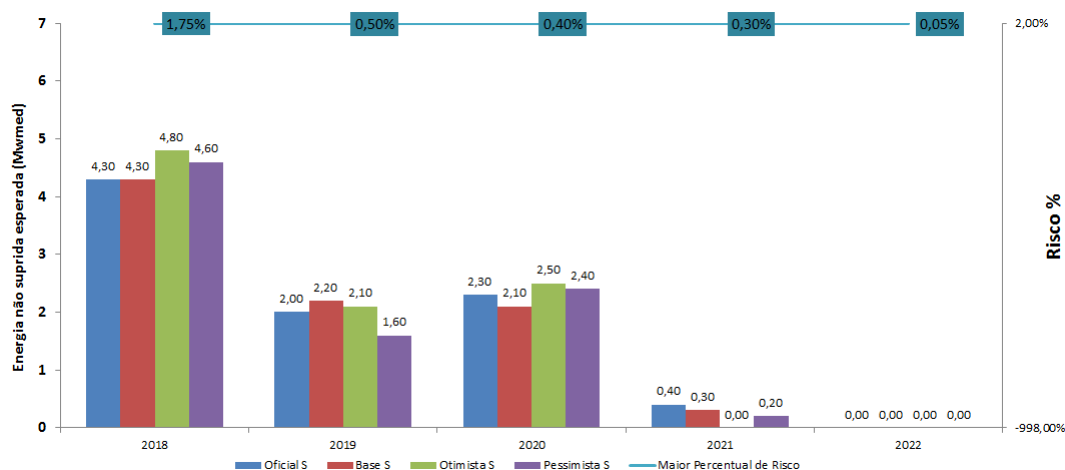


Figura 37 - Risco de déficit para o subsistema sul
Fonte: Elaboração própria

A Figura 38 apresenta o montante total de risco de déficit do caso sem ampliação do programa MCMV, a análise de todo horizonte de estudo separado por subsistemas.

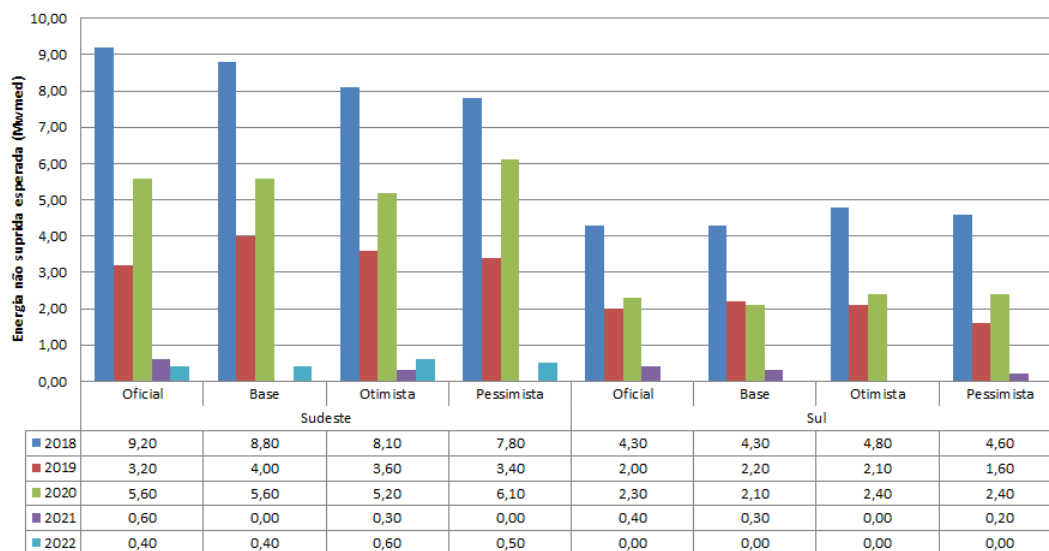


Figura 38 - Risco de déficit separado por subsistemas
Fonte: Elaboração própria

A Tabela 22 apresenta um comparativo do percentual médio de redução de risco de déficit para o caso sem ampliação.

Tabela 22 - Comparativo percentual médio de redução de Risco de Déficit

Cenários	Subsistemas	2018	2019	2020	2021	2022	Média %
Oficial	Sudeste	1,00%	0,35%	0,45%	0,10%	0,05%	0,39%
	Sul	1,40%	0,40%	0,30%	0,30%	0,05%	0,49%
Base	Sudeste	0,95%	0,40%	0,35%	0,05%	0,05%	0,36%
	Sul	1,05%	0,50%	0,35%	0,10%	0,05%	0,41%
Otimista	Sudeste	0,95%	0,45%	0,30%	0,10%	0,10%	0,38%
	Sul	0,90%	0,45%	0,35%	0,05%	0,05%	0,36%
Pessimista	Sudeste	0,90%	0,35%	0,40%	0,05%	0,05%	0,35%
	Sul	1,75%	0,45%	0,40%	0,20%	0,10%	0,58%

Fonte: Elaboração própria

Para o caso com ampliação, novamente os subsistemas nordeste e norte não apresentaram risco de déficit, sendo analisados apenas os subsistemas sudeste e sul. Para o subsistema sudeste houve pequenas variações de aumento e redução do montante de risco de déficit. A Figura 39 apresenta os resultados além do maior percentual de ocorrência por ano.

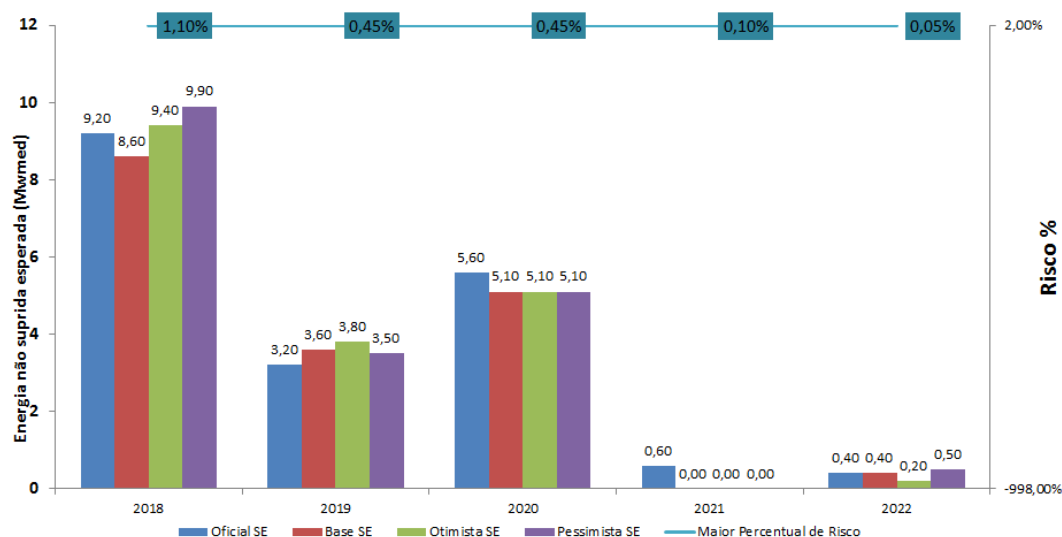


Figura 39 - Risco de déficit para o subsistema sudeste
Fonte: Elaboração própria

O subsistema sul no início do horizonte apresenta redução do montante do risco de déficit e segue com pequenas variações de aumento e redução ao longo

do horizonte. A Figura 40 apresenta os resultados além do maior percentual de ocorrência por ano.

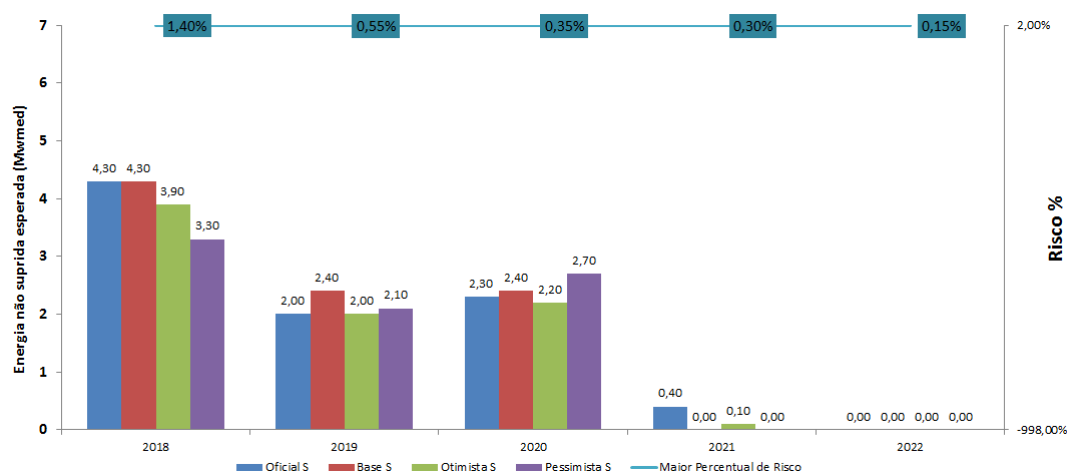


Figura 40 - Risco de déficit para o subsistema sul
Fonte: Elaboração própria

A Figura 41 apresenta o montante total de risco de déficit do caso com ampliação do programa MCMV, a análise de todo horizonte de estudo separado por subsistemas.

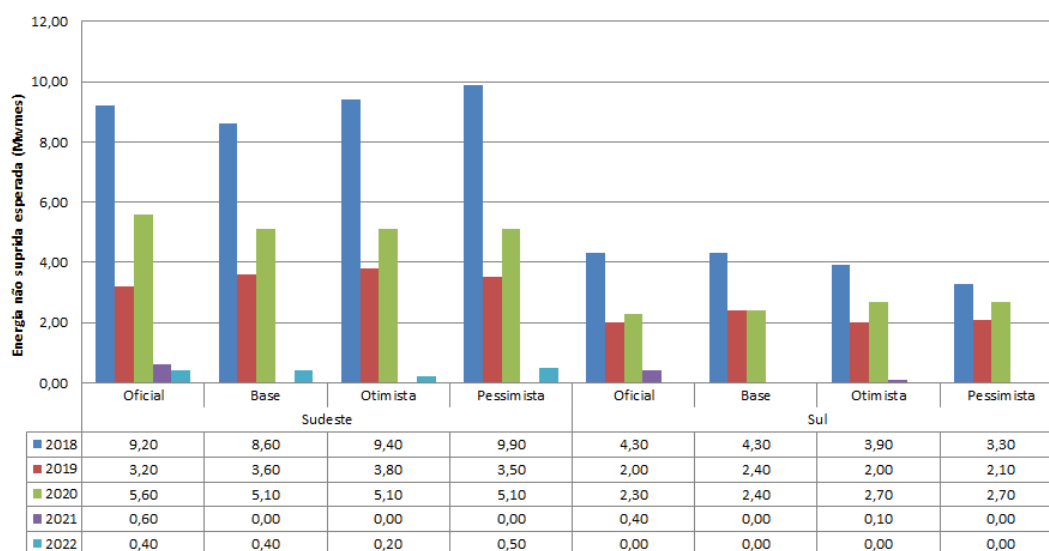


Figura 41 - Risco de déficit separado por subsistemas
Fonte: Elaboração própria

A Tabela 23 apresenta um comparativo do percentual médio de redução de risco de déficit para o caso com ampliação.

Tabela 23 - Comparativo percentual médio de redução de Risco de Déficit

Cenários	Subsistemas	2018	2019	2020	2021	2022	Média %
Oficial	Sudeste	1,00%	0,35%	0,45%	0,10%	0,05%	0,39%
	Sul	1,40%	0,40%	0,30%	0,30%	0,05%	0,49%
Base	Sudeste	0,90%	0,45%	0,40%	0,00%	0,05%	0,36%
	Sul	1,05%	0,55%	0,35%	0,00%	0,00%	0,39%
Otimista	Sudeste	1,10%	0,45%	0,40%	0,00%	0,05%	0,40%
	Sul	0,75%	0,45%	0,30%	0,20%	0,15%	0,37%
Pessimista	Sudeste	0,95%	0,35%	0,35%	0,00%	0,05%	0,34%
	Sul	0,80%	0,55%	0,45%	0,05%	0,05%	0,38%

Fonte: Elaboração própria

5.4

Geração Térmica

A geração térmica representa 26% da matriz elétrica brasileira (ANEEL, 2018), e é uma fonte de alta relevância e segurança na operação do SIN. Para as simulações realizadas nessa dissertação, ambos os casos apresentaram redução de geração de energia térmica em comparação à rodada oficial. A Figura 42 apresenta o total de geração térmica (MWmed) nos três cenários adotados em todo horizonte de estudo do caso sem ampliação do programa.

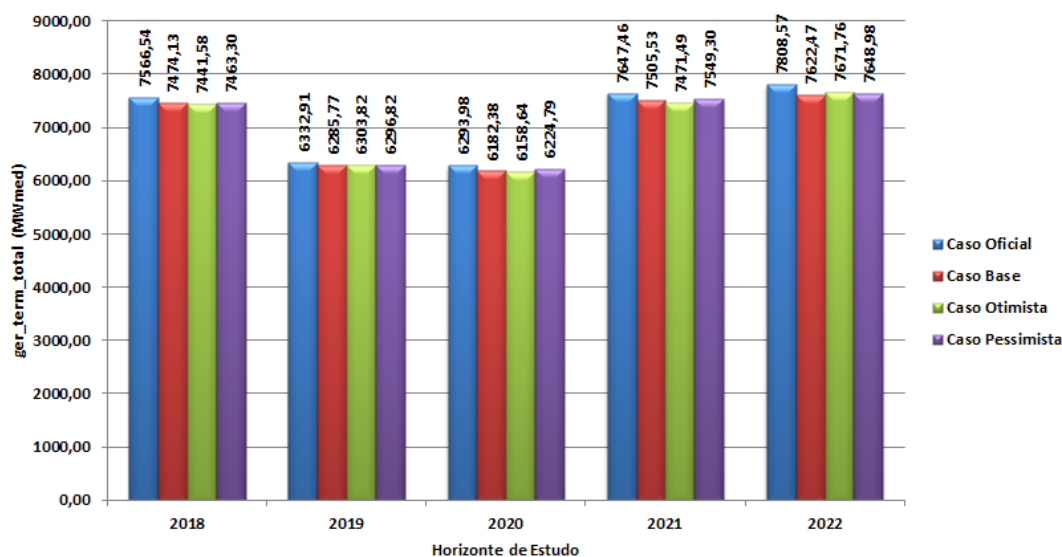


Figura 42 - Total geração térmica sem ampliação do programa MCMV
Fonte: Elaboração própria

A Figura 43 apresenta o percentual de redução de geração térmica nos três cenários considerados do caso sem ampliação do programa MCMV. O cenário otimista apresenta o maior percentual de redução no início do horizonte e a menor no final. Alternando o maior percentual de redução com o cenário base ao longo do horizonte.

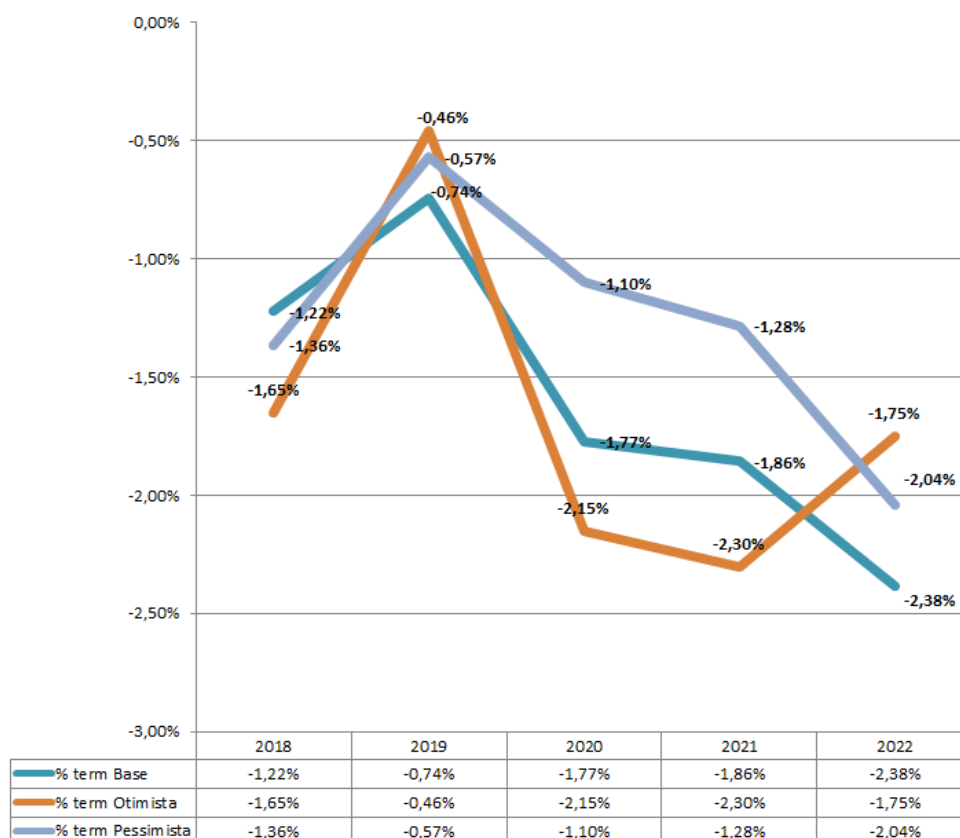


Figura 43 - Percentual de variação de geração térmica sem ampliação do programa MCMV

Fonte: Elaboração própria

A Figura 44 apresenta o total de geração térmica (MWmed) em ambos os cenários em todo horizonte de estudo do caso com ampliação do programa. Também se percebe a redução da geração térmica em todos os cenários simulados quando comparados ao caso oficial.

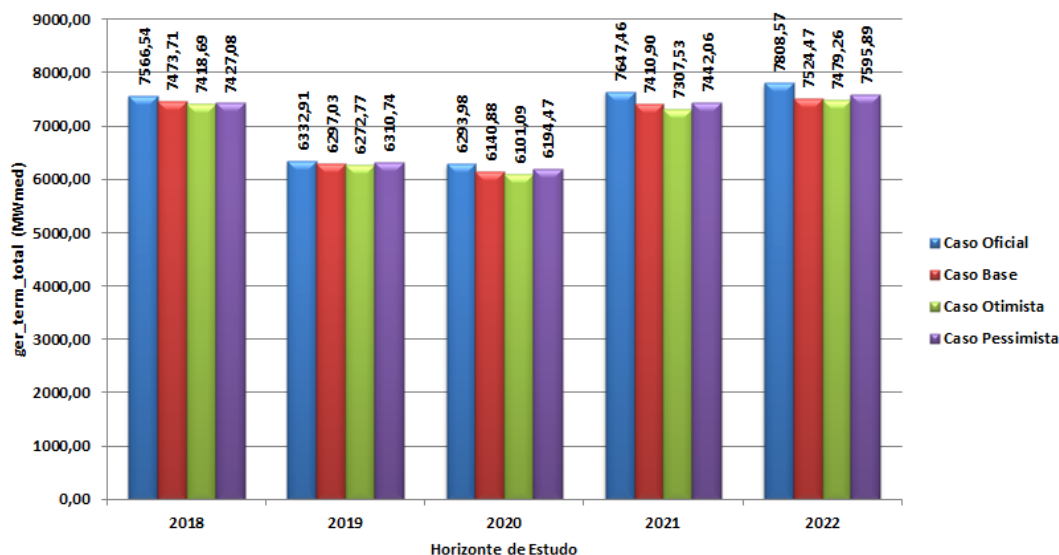


Figura 44 - Total geração térmica com ampliação do programa MCMV
Fonte: Elaboração própria

A Figura 45 apresenta o percentual de redução de geração térmica nos três cenários adotados do caso com ampliação do programa MCMV. O cenário otimista apresenta o maior percentual de redução em todo horizonte em comparação aos outros cenários.

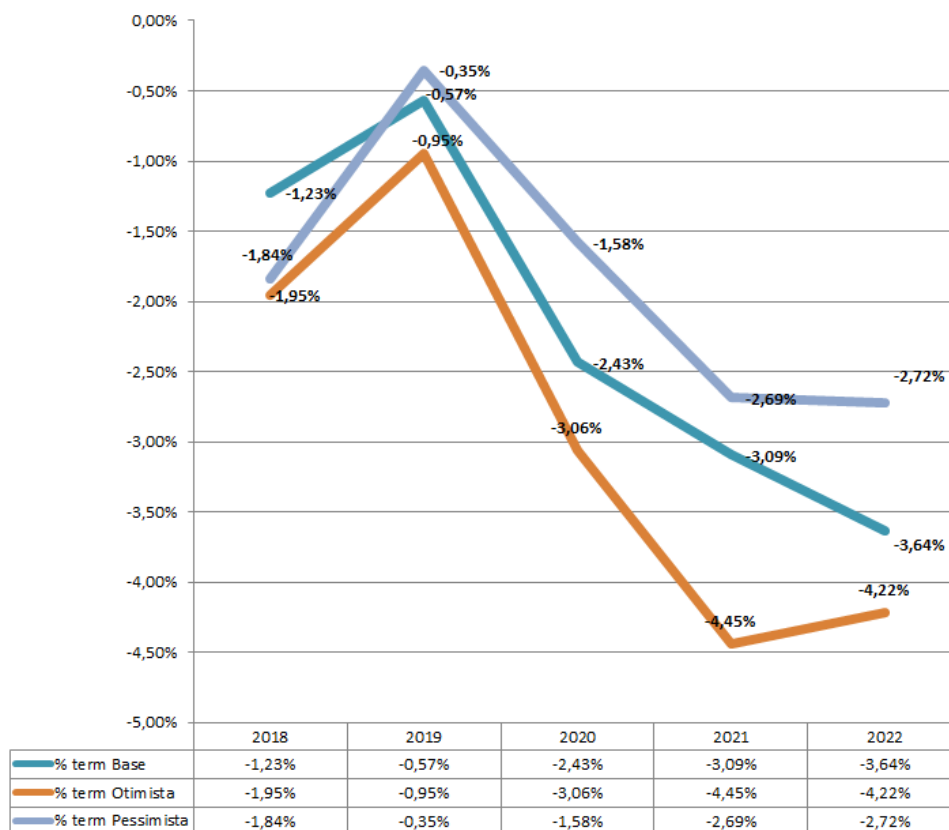


Figura 45 - Percentual de redução de geração térmica com ampliação do programa MCMV
Fonte: Elaboração própria

A Tabela 24 apresenta um comparativo do percentual médio de redução de geração térmica para ambos os casos, com e sem ampliação, para os três cenários simulados.

Tabela 24 - Percentual médio de redução de geração térmica

	Cenários	2018	2019	2020	2021	2022	Média
Sem Ampliação	Base	-1,22%	-0,74%	-1,77%	-1,86%	-2,38%	-1,60%
	Otimista	-1,65%	-0,46%	-2,15%	-2,30%	-1,75%	-1,66%
	Pessimista	-1,36%	-0,57%	-1,10%	-1,28%	-2,04%	-1,27%
Com Ampliação	Base	-1,23%	-0,57%	-2,43%	-3,09%	-3,64%	-2,19%
	Otimista	-1,95%	-0,95%	-3,06%	-4,45%	-4,22%	-2,93%
	Pessimista	-1,84%	-0,35%	-1,58%	-2,69%	-2,72%	-1,84%

Fonte: Elaboração própria.

5.5 Geração Hidráulica

A geração hidráulica corresponde mais 60% da matriz elétrica brasileira (ANEEL, 2018). Para o estudo realizado nesta dissertação, a entrada da geração fotovoltaica em ambos os casos, a diferença de aumento e redução de geração foi módica. A Figura 46 apresenta o total de geração hidráulica (MWmed) em ambos os cenários em todo horizonte de estudo do caso sem ampliação do programa.

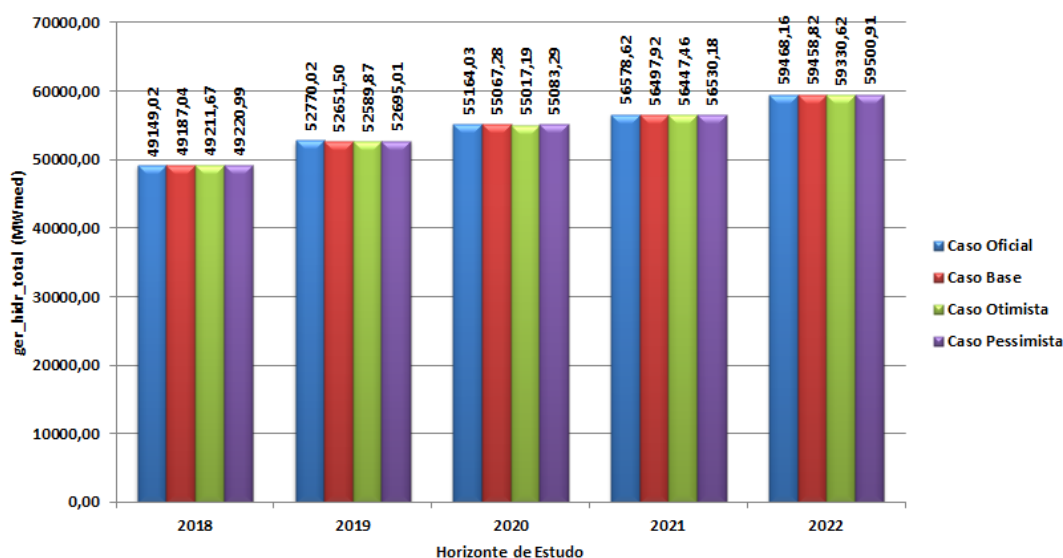


Figura 46 - Total geração hidráulica sem ampliação do programa MCMV
Fonte: Elaboração própria

A Figura 47 apresenta o percentual de aumento e redução de geração hidráulica em ambos os cenários do caso sem ampliação do programa MCMV. O cenário pessimista inicia o horizonte com o maior percentual de aumento de geração, sendo o cenário otimista com o maior percentual de redução de geração no restante do horizonte.

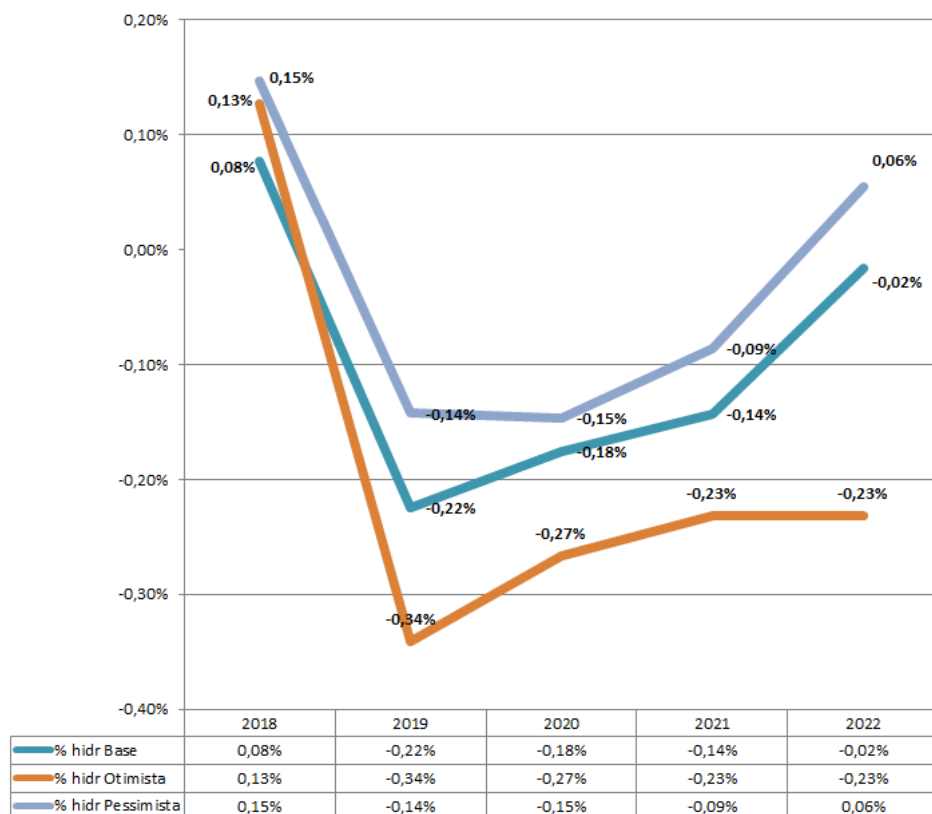


Figura 47 - Percentual de variação de geração hidráulica sem ampliação do programa MCMV

Fonte: Elaboração própria

A Figura 48 apresenta o total de geração hidráulica (MWmed) em ambos os cenários em todo horizonte de estudo do caso com ampliação do programa. Nota-se que o aumento da geração hidráulica em todo o horizonte de estudo também foi pequena para os três cenários considerados.

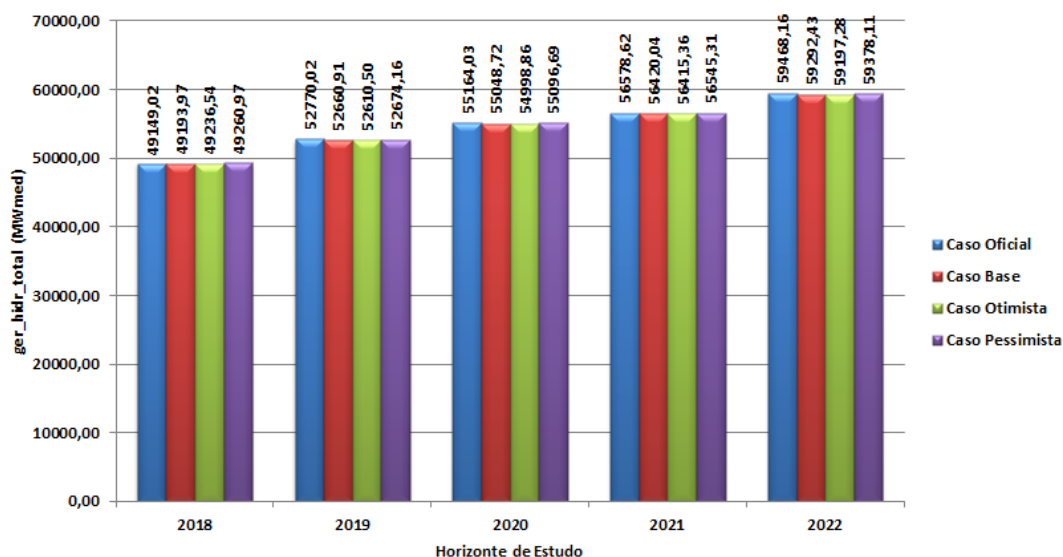


Figura 48 - Total geração hidráulica com ampliação do programa MCMV
Fonte: Elaboração própria

A Figura 49 apresenta o percentual de aumento e redução de geração hidráulica em ambos os cenários do caso com ampliação do programa MCMV. O caso com ampliação do programa MCMV repetiu o comportamento do caso sem ampliação. O cenário pessimista inicia o horizonte com o maior percentual de aumento de geração, sendo o cenário otimista com o maior percentual de redução de geração no restante do horizonte.



Figura 49 - Percentual de variação de geração hidráulica com ampliação do programa MCMV

Fonte: Elaboração própria

A Tabela 25 apresenta um comparativo do percentual médio de aumento e redução de geração hidráulica para ambos os casos.

Tabela 25 - Percentual médio de aumento e redução de geração hidráulica

	Cenários	2018	2019	2020	2021	2022	Média
Sem Ampliação	Base	0,08%	-0,22%	-0,18%	-0,14%	-0,02%	-0,10%
	Otimista	0,13%	-0,34%	-0,27%	-0,23%	-0,23%	-0,19%
	Pessimista	0,15%	-0,14%	-0,15%	-0,09%	-0,06%	-0,03%
Com Ampliação	Base	0,09%	-0,21%	-0,21%	-0,28%	-0,30%	-0,18%
	Otimista	0,18%	-0,30%	-0,30%	-0,29%	-0,46%	-0,23%
	Pessimista	0,23%	-0,18%	-0,12%	-0,06%	-0,15%	-0,06%

Fonte: Elaboração própria

5.6

Discussão dos Resultados

O presente trabalho foi dividido em dois casos. O primeiro sem ampliação do programa em que os projetos seriam concluídos nos dois primeiros anos do horizonte de estudo. E o segundo com ampliação do programa, que considera uma extensão do programa na mesma proporção dos dois primeiros anos até o final do horizonte de estudo do planejamento da operação (5 anos). Em ambos os casos a entrada de energia fotovoltaica na operação do sistema mostrou-se benéfica à operação do sistema elétrico brasileiro. O valor esperado do Custo Total de Operação do cenário pessimista do caso sem ampliação do programa geraria uma redução de custos de -4,14%, o que em termos financeiros resulta em uma economia de R\$ 1,3 bilhão em comparação a rodada oficial. O cenário otimista do caso com ampliação do programa geraria uma redução de custos de -6,38%, o que em termos financeiros resulta em uma economia de 1,8 bilhão em comparação a rodada oficial, mostrando-se viável para o sistema a concretização de qualquer cenário do estudo.

Os resultados do Custo Marginal de Operação (CMO) para o caso sem ampliação do programa em todos os três cenários apresentaram percentual médio de redução para ambos os subsistemas em comparação a rodada oficial. O que reflete também para o caso com ampliação que apresentaram percentual médio de redução de CMO ainda maior em todos os cenários em ambos os subsistemas. Isto acarreta uma redução do preço de energia para o sistema elétrico brasileiro, pois do CMO se extrai o Preço de Liquidação das Diferenças (PLD) que configura o preço da energia no mercado de curto prazo (*spot*). A redução também se verifica no mercado livre que tem como *proxy* o PLD.

Em relação aos resultados da rodada oficial para o Risco de Déficit, verificou-se que os subsistemas Nordeste e Norte não apresentaram riscos, mas apenas os subsistemas Sudeste e Sul. Com a entrada da energia fotovoltaica houve redução do Risco de Déficit nas médias percentuais, o que permite concluir que a entrada de energia fotovoltaica no sistema tende a diminuir o Risco de Déficit.

Para os resultados da geração hidráulica não houve alteração significativa, o que não é ruim, pois sua geração não é onerada, diferentemente da geração

térmica que em ambos os casos apresentaram redução de sua geração, significando economia para o subsistema que foi captada pelo CMO.

De maneira geral, a inserção da energia fotovoltaica advinda do Programa MCMV traria benefícios relevantes para o sistema brasileiro, reduzindo o custo da geração e o risco de um possível déficit. Além disso, é importante destacar a contribuição para a sustentabilidade, uma vez que esta fonte de energia é limpa e renovável, contribuindo socialmente para uma parcela da população que não teria dinheiro para investir em energia solar fotovoltaica.

Conclusão e Trabalhos Futuros

A energia fotovoltaica é uma fonte de energia em constante expansão. Atualmente corresponde apenas a 0,93 GW, ou seja, 0,59% de toda a matriz elétrica (ANEEL, 2018), mas sua projeção para 2024 aponta para um crescimento de 7 GW, sendo 3,3% (EPE, 2015b) de toda a matriz elétrica. O Brasil tende a se tornar mais competitivo no mercado de energia solar, uma vez que existe a tentativa de purificar o silício aqui no Brasil pela UNICAMP, ou seja, evitando exportar matéria prima para importar depois o silício purificado, além de possuir de acordo com o Atlas Brasileiro de Energia Solar (INPE, 2017) índice de irradiação solar superior a maioria dos países europeus.

Paralelo a esse crescimento de energia fotovoltaica, o Brasil conta com o programa MCMV que tem por objetivo facilitar as condições de acesso ao imóvel próprio de classes menos abastadas da sociedade, o programa já entregou desde seu lançamento mais de 2,5 milhões de moradias e estima a contratação de mais dois milhões. O presente trabalho vislumbrou a possibilidade de incluir em seu escopo um programa de geração de energia limpa com diretrizes ambientalmente sustentáveis.

Com os resultados do estudo do impacto do potencial de geração fotovoltaica nos projetos Minha Casa Minha Vida na operação do sistema elétrico brasileiro a inserção de energia fotovoltaica foi benéfica ao sistema, em ambos cenários estudados. Realizando um simples comparativo entre o cenário pessimista do caso sem ampliação e o cenário otimista do caso com ampliação, percebe-se a economia gerada com o resultado do Custo Total de Operação. O cenário pessimista do caso sem ampliação em termos financeiros resulta para o sistema uma economia de R\$ 1,3 bilhão em comparação a rodada oficial, enquanto o cenário otimista do caso com ampliação resulta em uma economia de 1,8 bilhão em comparação a rodada oficial, mostrando-se viável para o sistema a concretização de qualquer cenário do estudo.

Comparando apenas o subsistema Sudeste, o percentual médio de redução do Custo Marginal de Operação do cenário pessimista do caso sem ampliação foi de 3,75% enquanto o cenário otimista do caso com ampliação apresentou redução de 9,53%, significando redução do preço de energia no mercado de curto prazo.

Com a redução do Risco de Déficit e a redução de Geração Térmica, não há dúvida da sinergia que se pode ter em aliar um programa que atenda o déficit habitacional a programas ambientais geradores de energia limpa para expansão do sistema elétrico brasileiro. A inserção da energia solar fotovoltaica na matriz elétrica brasileira além de contribuir com a sustentabilidade, uma vez que esta fonte de energia é limpa e renovável, contribuiria socialmente para uma parcela da população que não teria dinheiro para investir em painéis fotovoltaicos.

É preciso ter em conta que todo planejamento de inserção de energia fotovoltaica no sistema elétrico brasileiro tem um viés de complementariedade ao sistema e nunca de substituição. É importante destacar que nossa matriz dispõe de energia despachável em que há controle dos momentos de geração, independente das condições climáticas locais, fator que a energia solar não dispõe.

Podem-se erguer vozes contra a implantação dos painéis fotovoltaicos nas habitações sob égide de onerar muito o programa e esse custo não poder ser repassado aos compradores das moradias. Mediante a economia gerada do Valor esperado do Custo Total de Operação em qualquer cenário estudado pode-se propor estudos futuros à Caixa Econômica Federal, Ministério de Minas Energia e Ministério das Cidades comparando o valor desses módulos fotovoltaicos adicionados às moradias e a economia obtida da inserção da energia fotovoltaica na operação do sistema elétrico brasileiro.

Para o presente estudo foi utilizado apenas uma área do telhado nas residências, com instalação dos painéis ocupando uma área de 4,95 m², simulando uma geração de 5% a mais da demanda. Como indicação para trabalhos futuros pode-se simular um aumento de 10% a mais da demanda, pois há espaço no telhado das residências, para uma possível dobra de área ocupada com os módulos fotovoltaicos. Além das residências, é possível simular também estudos para edifícios e conjuntos habitacionais, que possam ter fontes de energias oriundas de eólicas, realizando integração eólica e solar.

Referências bibliográficas

Aigbavboa, C. **Low-income housing residents' challenges with their government install solar water heaters: A case of south Africa.** Johannesburg. Energy Procedia, Elsevier, v. 75, p. 495-501, 2015.

AMBIENTE ENERGIA – Meio ambiente, sustentabilidade e inovação. **21 estados já aderiram o convênio que isenta geração distribuída de ICMS.** Disponível em: <<http://minhaenergiasolar.com.br/incentivos-governamentais-energia-solar/>>. Acesso em: 24 out. 2017.

Andrade, V. F; Assis, E. S.; Pinheiro, R. B. **Consumo de energia em edificações de baixa renda no Brasil.** Brasil. XIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído - ENTAC, 2010. Outubro 2010.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica (2008). **Atlas de energia Elétrica do Brasil.** Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas3ed.pdf>>. Acesso em: 16 nov. 2017.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Banco de Informações de Geração (BIG).** 2018. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 23 jan. 2018.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa nº 109, 26 de outubro de 2004.** Institui a Convenção de Comercialização de Energia Elétrica. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2004109.pdf>>. Acesso em: 11 jan. 2018.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa nº 482, 17 de abril de 2012.** Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia

elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 17 out. 2017.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa nº 687, 24 de novembro de 2015**. Altera a Resolução Normativa nº 482, e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 17 out. 2017.

Bartleet, M; Gounder, R. **Energy consumption and economic growth in New Zeland: Results of trivariate and multivariate models**. Nova Zelândia. Energy Policy, Elsevier, v. 38, p. 3508-3517, 2010.

BRASIL. **Decreto de 27 de Dezembro de 1994**. Cria o Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios – PRODEEM, e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.planalto.gov.br>>. Acesso em: 20 out. 2017.

BRASIL. **Decreto nº 5.163 de 30 de julho de 2004**. Regulamenta a Comercialização de Energia Elétrica e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.planalto.gov.br>>. Acesso em: 20 nov. 2017.

BRASIL. **Lei nº 10.848 de 15 de março de 2004**. Dispõe sobre a comercialização de energia elétrica, altera as Leis 5.655/71, 8.631/93, 9.074/95, 9.427/96, 9.478/97, 9.648/98, 9.991/00, 10.438/02 e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.planalto.gov.br>>. Acesso em: 20 nov. 2017.

BRASIL, 2017. **Entenda as novas regras do Minha Casa Minha Vida**. Disponível em: <<http://www2.planalto.gov.br/acompanhe-planalto/noticias/2017/02/entenda-as-novas-regras-do-minha-casa-minha-vida>>. Acesso em: 28 nov. 2017.

CAIXA – Caixa Econômica Federal. **Construcard**. Disponível em: <<http://www.caixa.gov.br/voce/cartoes/casa/construcard/Paginas/default.aspx>>. Acesso em: 24 out. 2017.

CAIXA – Caixa Econômica Federal. **Minha Casa Minha Vida – Recursos FAR**. Disponível em: <<http://www.caixa.gov.br/poder-publico/programas->

uniao/habitacao/minha-casa-minha-vida/Paginas/default.aspx/saiba_mais.asp >. Acesso em: 29 nov. 2017.

Calili, R. F. et al. **Estimating the cost savings and avoided CO₂ emissions in Brazil by implementing energy efficient policies**. Energy Policy, v. 67, p. 4-15, 2014.

Calili, R. F. (2013). **Políticas de Eficiência Energética no Brasil: uma Abordagem em um Ambiente Econômico sob Incerteza**. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Elétrica, PUC-Rio.

CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. **Panorama CCEE 2014**. Disponível em: <<https://www.ccee.org.br>>. Acesso em: 14 nov. 2017.

CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. **Visão Geral das Operações na CCEE**. Disponível em: <<https://www.ccee.org.br>>. Acesso em: 13 nov. 2017.

CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (2003). **Manual de Referência do Modelo DESSEM – Versão 8.2ª (GTRD)**. 2003

CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (2004). **Projeto NEWAVE – Modelo Estratégico de Geração Hidrotérmica a Subsistemas Equivalentes – Manual do usuário – Versão 12**. 2004

CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (2017). **PREVMERCADO – Previsão de Mercado**. Disponível em: <<http://www.cepel.br/produtos/prevmmercado-previsao-de-mercado.htm>>. Acesso em: 01 set. 2018.

Costa, L. **Operação do sistema elétrico mudará com expansão eólica e solar, diz ONS**. Reuters Brasil, São Paulo, 2017. Disponível em: <<https://br.reuters.com/article/businessNews/idBRKBN1942TB-OBRBS>>. Acesso em: 14 nov. 2017.

ENGIE – ENGIE Solar. **Incentivos governamentais para quem usa energia solar**. Disponível em: <<http://minhaenergiasolar.com.br/incentivos-governamentais-energia-solar/>>. Acesso em: 24 out. 2017.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética (2014). **Leilão de Energia de Reserva de 2014**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/>>. Acesso em: 20 nov. 2017.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética (2015a). **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2015**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/>>. Acesso em: 16 nov. 2017.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética (2015b). **Plano Decenal de Expansão de Energia 2024**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/>>. Acesso em: 10 out. 2017.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética (2015c). **Projeção da Demanda de Energia Elétrica para os próximos 5 anos (2016-2020)**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/>>. Acesso em: 08 out. 2017.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética (2016). **O Compromisso do Brasil no Combate às Mudanças Climáticas: Produção e Uso de Energia**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/>>. Acesso em: 27 ago. 2018.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética (2017a). **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2017**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/>>. Acesso em: 16 nov. 2017.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética (2017b). **Estudos de Planejamento da Expansão da Geração – Avaliação da Geração de Usinas Híbridas Eólico-Fotovoltaicas**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/>>. Acesso em: 14 nov. 2017.

Gonçalves, S. R. S. (2017). **Metodologia para mensuração do impacto do potencial de geração fotovoltaica no planejamento da operação energética de médio prazo**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Metrologia, PUC-Rio.

Gorenstin, B. G. et al. **Power System Expansion Planning Under Uncertainty**. IEEE Transactions on Power Systems, v. 8, n. 1 (Fev), p. 129-136, 1993.

GREENBRAS. **Global Horizontal Irradiation Sistema de Compensação de Energia Elétrica: O que é e como funciona**. Disponível em:

<<http://greenbras.com/energia-fotovoltaica/sistema-de-compensacao-de-energia-eletrica/>>. Acesso em: 17 out. 2017.

Hirst, L. C. **Hot Carriers in Quantum Wells for Photovoltaic Efficiency Enhancement**. IEEE Journal of Photovoltaics, v. 4, n. 1, p. 244-252, 2015.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Next Generation Wind and Solar Power**. 2016.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2018). **Power Tracking Clean Energy Progress**. Disponível em: < <http://www.iea.org/tcep/power/>>. Acesso em: 28 ago. 2018.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Outlook**. 2016.

INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. 2ª Edição. São José dos Campos, 2017.

Julian, T. M. P; Karen, J. A.; Paulo, R. J. **Deployment of photovoltaics in Brazil: Scenarios, perspectives and policies for low-income housing**. Solar Energy, Elsevier, v. 133, p. 73-84, 2016.

Leonard, A. **A história das coisas: da natureza ao lixo, o que acontece com tudo que consumimos**. Rio de Janeiro: Editora Zahar, 2011.

Lopes, J. E. G. (2007). **Modelo de Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos de Produção de Energia Elétrica**. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, USP-SP.

Maceira, M. E. P; Melo, A. C. G; Zimmermann, M. P. **Application of Stochastic Programming and Probabilistic Analyses as Key Parameters for Real Decision Making regarding Implementing or Not Energy Rationing – A Case Study for the Brazilian Hydrothermal Interconnected System**. Power Systems Computation Conference, p. 1-7, 2016.

MERCADO LIVRE DE ENERGIA. **Visão Geral – Mercado Livre (ACL) x Mercado Cativo (ACR)**. Disponível em: < <http://www.mercadolivredeenergia.com.br/>>. Acesso em: 26 out. 2017.

MINHA CASA MINHA VIDA. **Minha Casa Minha Vida – Plantas de Casas.** Disponível em: <<http://www.minhavidaminhacasa.com/minha-casa-minha-vida-plantas-de-casas/>>. Acesso em: 29 nov. 2017.

MINISTÉRIO DO PLANEJAMENTO. **PAC 5º. Balanço 2015 – 2018.** Brasília: Governo Federal, 2017. Disponível em: <<http://www.pac.gov.br/noticia/3cda3a2e>>. Acesso em: 08 dez. 2017.

MMA – Ministério do Meio Ambiente (2015). **iNDC brasileira: versão em português.** Disponível em: <http://www.mma.gov.br/images/arquivos/clima/convencao/indc/BRASIL_iNDC_portugues.pdf>. Acesso em: 16 nov. 2017.

MME – Ministério de Minas Energia (2015a). **Brasil lança Programa de Geração Distribuída com destaque para energia solar.** Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>>. Acesso em: 24 out. 2017.

MME – Ministério de Minas Energia (2015b). **Energia solar fotovoltaica cresceu quase 30% no mundo em 2014.** Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>>. Acesso em: 23 out. 2017.

MME – Ministério de Minas Energia (2016a). **Capacidade Instalada de Geração Elétrica Brasil e Mundo (2016).** Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>>. Acesso em: 21 nov. 2017.

MME – Ministério de Minas Energia (2016b). **Hidrelétrica Balbina inicia projeto com flutuadores para gerar energia solar.** Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>>. Acesso em: 8 nov. 2017.

MME – Ministério de Minas Energia (2017a). **Geração distribuída mantém crescimento com quase 8 mil conexões.** Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>>. Acesso em: 24 out. 2017.

MME – Ministério de Minas Energia (2017b). **MME publica chamada pública sobre doação de bens remanescentes do PRODEEM.** Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>>. Acesso em: 17 out. 2017.

Montenegro, S. **Sistemas de energia fotovoltaica serão incluídos nos projetos do Minha Casa, Minha Vida**. Canal Energia. 2017.

Morgan, A. (2014). **Análise do consumo energético em habitação de interesse social (HIS) visando a economia de energia nas edificações**. Trabalho de Conclusão de Curso de Especialização, Curso de Pós-Graduação em Eficiência Energética Aplicada aos Processos Produtivos, Universidade Federal de Santa Maria - UFSM.

Motta, M. L. A; Quinto, S. C. B. S; Correia, A. E. S. C. **O Projeto Geração de Renda e Energia**. Brasil. Case Studies, FGV Management, v. 117, p. 53-30, 2016.

PORTAL BRASIL, 2015. **Moradias são equipadas com aquecimento solar**. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/editoria/infraestrutura/2015/07/moradias-sao-equipadas-com-aquecimento-solar>>. Acesso em: 23 ago. 2018.

PORTAL BRASIL, 2016. **Acordo de Paris sobre o clima entra em vigor nesta sexta**. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/meio-ambiente/2016/11/acordo-de-paris-sobre-o-clima-entra-em-vigor-nesta-sexta-4>>. Acesso em: 10 out. 2017.

PORTAL BRASIL, 2016. **Brasil estará entre os 20 países com maior geração solar em 2018**. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2016/01/brasil-estara-entre-os-20-paises-com-maior-geracao-solar-em-2018>>. Acesso em: 10 out. 2017.

PORTAL BRASIL, 2016. **Governo vai contratar mais 2 milhões de moradias no Minha Casa Minha Vida**. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2016/03/governo-vai-lancar-mais-2-milhoes-de-moradias-no-minha-casa-minha-vida>>. Acesso em: 10 out. 2017.

PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. **Saiba mais sobre o PROCEL**. ELETROBRAS – Centrais Elétricas Brasileiras S.A. Disponível em: <<http://eletrobras.com/pt/Paginas/Procel.aspx>>. Acesso em: 24 ago. 2018.

Reis, L. B. **Geração de Energia Elétrica**. 2º ed. São Paulo: Editora Manole, 2011.

REW – RENEWABLE ENERGY WORLD. **Funding the Risks of New Solar PV Technology and Recycling**. Disponível em: <<http://www.renewableenergyworld.com/articles/2016/03/funding-the-risks-of-new-solar-pv-technology-and-recycling.html>>. Acesso em: 11 out. 2017.

Santana, L. **Placa de Energia Solar: O que é, Como Funciona, Preço e Área**. BlueSol. 2017. Disponível em: <<http://blog.bluesol.com.br/placa-de-energia-solar-guia-completo/>>. Acesso em: 30 dez. 2017.

SÃO PAULO – Governo do Estado de São Paulo. **Alckimin entrega 2.190 moradias em São Carlos, Leme e Itanhaém**. São Paulo, 2015. Disponível em: <<http://www.saopaulo.sp.gov.br/sala-de-imprensa/release/alckmin-entrega-2-190-moradias-em-sao-carlos-leme-e-itanhaem/>>. Acesso em: 08 dez. 2017.

SOLAR POWER EUROPE. **Global Market Outlook for Solar Power 2016-2020**. 2016.

Souza, R. C. et al. **Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos no Brasil – Geração de Cenários e Otimização**. 1 ed. Rio de Janeiro: Editora PUC-Rio, 2014.

Taboada, M. E. et al. **Solar water heating system and photovoltaic floating cover to reduce evaporation: Experimental results and modeling**. Renewable Energy, Elsevier, v. 105, p. 601-615, 2017.

Tommasi, A. et al. **Proposal for Policies and Practices for the Appropriate Disposal of Photovoltaic Residue in Brazil**. Brasil. Civil Engineering Research Journal, Juniper Publishers, v. 1, 2017.

UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas. **Grupo purifica silício para fabricação de células solares**. Disponível em: <<http://www.unicamp.br/unicamp/ju/530/grupo-purifica-silicio-para-fabricacao-de-celulas-solares>>. Acesso em: 17 out. 2017.

Vale, A. M. et al. **Analysis of the economic viability of a photovoltaic generation Project applied to the Brazilian housing program “Minha Casa Minha Vida”**. Energy Policy, Elsevier, v. 108, p. 292-298, 2017.

Vergara, S. C. (2007). **Projetos e relatórios de pesquisa em administração (9ª ed.)**. São Paulo: Atlas.

WRI – WORLD RESOURCES INSTITUTE (2015). **Infographic: What Do Your Country’s Emissions Look Like?**. Disponível em: <<http://www.wri.org/blog/2015/06/infographic-what-do-your-countrys-emissions-look>>. Acesso em: 16 out. 2017.

Zhang, Y; Song, J.; Hamori, S. **Impact of subsidy policies on diffusion of photovoltaic power generation**. Japão. Energy Policy, Elsevier, v. 39, p. 1958-1964, 2011.

Apêndice A

Este apêndice apresenta o problema de operação hidrotérmica em sistemas equivalentes de energia que é resolvido a cada estágio descrito a seguir (Gonçalves, 2017).

$$Z_t = \text{Min} \left[\sum_{k=1}^{NS} \sum_{j=1}^{NUT_k} CT_j \cdot GT_{t,j} + \frac{1}{1+\beta} \alpha_{t+1} \right] \quad (6)$$

(a)

Equação de balanço hídrico

$$EA_{t+1}(k) = FDIN_t(k)EA_t(k) + FC_t(k)EC_t(k) - GH_t(k) - EVT_t(k) - EVM_t(k) - EVP_t(k) - EM_t(k) - EDVC_t(k); k = 1, \dots, NS \quad (b)$$

Equação de atendimento à demanda

$$GH_t + \sum_{j=1}^{NUT_k} GT_{t,j} + \sum_{j=1}^{\Omega_k} (F_{t,i,k} - F_{t,k,i}) + DEF_{t,k} - EXC_t(k) = D_{t,k} - EVM_t(k) - EFIO_t(k) - \sum_{j=1}^{NUT_k} GTMIN_{t,j} - EDVF_t(k); k = 1, \dots, NS \quad (c)$$

Limites na geração térmica

$$0 \leq GT_{t,j} \leq \overline{GT}_{t,j}, \quad \forall j \in NUT_k, k = 1, \dots, NS \quad (d)$$

Limites na capacidade de intercâmbio

$$\left| F_{t,i,k} \right| \leq \bar{F}_{t,i,k} \quad , \quad i = 1, \dots, NS \text{ e } k = 1, \dots, NS \quad (e)$$

Limites na capacidade de armazenamento

$$0 \leq FDIN_{t+1}(k).EA_{t+1}(k) \leq EAMAX_{t+1}(k) \quad , \quad k = 1, \dots, NS \quad (f)$$

Geração hidráulica máxima

$$GH_t(k) + EFIO_t(k) + EVM_t(k) \leq GHMAX_t(k) \quad , \quad k = 1, \dots, NS \quad (g)$$

Limites operativos

$$EAMIN_{t+1}(k) + FDIN_{t+1}(k).EARM_{t+1}(k) \leq EAVEMAX_{t+1}(k), \quad (h)$$

$$k = 1, \dots, NS$$

Função de custo futuro

$$\alpha_{t+1} - \sum_{k=1}^{NS} \pi.EA_{1,t+1}(k).EA_{t+1}(k) \geq \delta_{1,t+1} \quad (i)$$

$$\dots$$

$$\alpha_{t+1} - \sum_{k=1}^{NS} \pi.EA_{q,t+1}(k).EA_{t+1}(k) \geq \delta_{q,t+1}$$

Equação de subsistemas fictícios

$$\sum_{j=1}^{\Omega_k} (F_{t,i,k} - F_{t,k,i}) = 0 \quad , \quad k = 1, \dots, NFIC \quad (j)$$

Onde:

Z_t	valor esperado do custo total de operação do estágio t até o final do período de planejamento;
β	taxa de desconto;
α_{t+1}	variável escalar que representa o valor esperado do custo futuro associado a decisão tomada no instante t ;
$EA_t(i)$	energia armazenada no subsistema i no início do estágio t ;
$EAMAX_t(i)$	limite máximo de armazenamento do subsistema i no início do estágio t ;
$GH_t(i)$	energia hidráulica controlável gerada pelo subsistema i no estágio t ;
$GHMAX_t(i)$	limite máximo de geração hidráulica do subsistema i no estágio t ;
$EVT_t(i)$	energia vertida no subsistema i no estágio t ;
$EXC_t(i)$	excesso de energia a fio d'água, energia de vazão mínima, geração térmica mínima, geração de pequenas usinas e energia de submotorização no subsistema i durante o estágio t ;
$EC_t(i)$	energia controlável afluyente ao sistema i durante o estágio t (está incluída a energia de vazão mínima);
$EFIO_t(i)$	energia fio d'água afluyente ao sistema i durante o estágio t ;
$EVP_t(i)$	energia evaporada no subsistema i durante o estágio t ;
$EM_t(i)$	energia de enchimento de volume morto no subsistema i durante o estágio t ;
$EV_t(i)$	energia de vazão mínima afluyente ao subsistema i durante o estágio t ;
$GT_t(j)$	energia gerada pela usina térmica j do subsistema i , no estágio t ;
$\overline{GT}_t(j)$	limite máximo de geração térmica da usina j no estágio t , descontando-se o limite mínimo de geração térmica dessa usina;
$GTMIN_t(j)$	limite mínimo de geração térmica da usina j no estágio t ;

$F_t(i, k)$	intercâmbio de energia do subsistema i para o subsistema k , no estágio t ;
$\bar{F}_t(i, k)$	capacidade de intercâmbio de energia do subsistema i para o subsistema k , no estágio t ;
$EDVC_t(i)$	energia de desvio de água a ser abatida da energia controlável no subsistema i durante o estágio t ;
$EDVF_t(i)$	energia de desvio de água a ser abatida da energia fio d'água no subsistema i durante o estágio t ;
$D_t(i)$	demanda de energia do subsistema i no estágio t , descontadas a geração de pequenas usinas e a energia de submotorização;
$DEF_{t,i}$	déficit de energia do subsistema i no estágio t ;
$CT(j)$	custo de geração associado a usina térmica j ;
Ω_j	conjunto de subsistemas diretamente conectados ao subsistema j ;
NS	número de subsistemas reais;
$NFIC$	número de subsistemas fictícios;
$EAMIN_t(i)$	limite mínimo de armazenamento do subsistema i no início do estágio t ;
$EAVEMAX_t(i)$	limite máximo de armazenamento do subsistema i no início do estágio t por restrição de volume de espera;
$FDIN_t(i)$	correção da energia armazenada no sistema i devido a mudança de configuração no estágio t ;
$FC_t(i)$	fator de correção da energia controlável do sistema i durante o estágio t ;
q	número de segmentos da função de custo futuro;
$\pi.EA_{t+1}(i)$	derivada da função objetivo Z_t com relação à energia armazenada no subsistema i no início do estágio $t+1$;
δ_{t+1}	termo constante da restrição linear.