



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Mecânica

JEFREY ANDERSON MORA MONTAÑEZ

Gerenciamento, Produção e Controle de Potência para um Sistema Híbrido de Energia Renovável

CAMPINAS
2020

JEFRY ANDERSON MORA MONTAÑEZ

Gerenciamento, Produção e Controle de Potência para um Sistema Híbrido de Energia Renovável

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área de Mecatrônica.

Orientador: Prof. Dr. João Maurício Rosário

Coorientador: Prof. Dra. Olga Lucia Ramos Sandoval

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO
FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO(A)
ALUNO JEFRY ANDERSON MORA MONTAÑEZ, E
ORIENTADA PELO(A) PROF. DR JOÃO MAURÍCIO
ROSÁRIO

**CAMPINAS
2020**

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

M79g Mora Montañez, Jefry Anderson, 1992-
Gerenciamiento, produção e controle de potência para um sistema híbrido de energia renovável / Jefry Anderson Mora Montañez. – Campinas, SP : [s.n.], 2020.

Orientador: João Maurício Rosário.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Algoritmos. 2. Geração distribuída de energia. 3. Energia solar. 4. Energia eólica. 5. Sustentabilidade. I. Rosário, João Maurício, 1959-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Management, production and power control for a hybrid renewable energy system

Palavras-chave em inglês:

Algorithms

Distributed power generation

Solar energy

Wind energy

Sustainability

Área de concentração: Mecatrônica

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora:

João Maurício Rosário [Orientador]

Francisco Carlos Parquet Bizarria

Ely Carneiro de Paiva

Data de defesa: 28-02-2020

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0001-8725-1643>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/3622325918165687>

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

Gerenciamento, Produção e Controle de Potência para um Sistema Híbrido de Energia Renovável

Autor: Jefry Anderson Mora Montañez

Orientador: Prof. Dr. João Maurício Rosário

Coorientador: Prof. Dra. Olga Lucia Ramos Sandoval

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

Prof. Dr. João Maurício Rosário, Presidente
Faculdade de Engenharia Mecânica-FEM/UNICAMP

Prof. Dr. Francisco Carlos Parquet Bizarria
Universidade de Taubaté

Prof. Dr. Ely Carneiro de Paiva
Faculdade de Engenharia Mecânica-FEM/UNICAMP

A Ata de Defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade

Campinas, 28 de Fevereiro de 2020.

Agradecimentos

Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de diversas pessoas às quais presto minha homenagem:

Ao Deus, por ser o meu guia na minha vida. Aos meus pais, Jose Agustín Mora Calderón e Nubia Esperanza Montañez Palomo, meu irmão, Erik Duvan Mora Montañez, minha namorada Julieth Andrea Cortes com seus conselhos e apoio, e pessoas que sempre me apoiaram até ao fim, como membros da casa onde eu moro.

Ao meu orientador, Prof. Dr. João Maurício Rosário pela confiança, pela orientação e o apoio ao longo do trabalho desenvolvido.

Aos Prof. Dario Amaya, Olga Ramos e meu colega Camilo Andrés Cáceres Flórez pela ajuda, apoio, orientação e confiança ao longo desta fase da minha vida.

Aos meus colegas e amigos por seu apoio e paciência para me oferecer o melhor conselho.

Aos professores e funcionários do Departamento de Sistemas Integrados da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP, com os que tive a oportunidade de trabalhar.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Resumo

A geração de energia elétrica é uma das atividades humanas mais importantes na operação de uma cidade moderna, pois tem conexão direta com a maioria das atividades de produção, devido a sua relevância, em muitos casos não é priorizada a questão ambiental, resultando na destruição de ecossistemas, no caso da energia hidráulica e a poluição do ar e da água, no caso de térmicas, para o qual surgiu a geração de energia limpa, mas com o inconveniente que isso tem um custo inicial mais elevado, além de outros problemas na qualidade da energia oferecida. Esta Dissertação de Mestrado tem como objetivo propor e modelar um sistema híbrido de geração de eletricidade com base na utilização de fontes de energias renováveis com controle de distribuição com a finalidade de gerenciar o uso de energia não utilizada, armazenando-a em um banco de baterias e/ou injetando-a na rede elétrica; melhorando assim a eficiência energética e a qualidade da energia do sistema. Para realizar este objetivo, na primeira parte deste trabalho é apresentado uma introdução às metodologias mais conhecidas de controle e distribuição de energia, para então definir a arquitetura de controle e seus modos de funcionamento, bem como a metodologia e as ferramentas utilizadas para implementação, para depois, por meio de um estudo de caso definir o tamanho e distribuição dos sistemas de geração e com os resultados obtidos da arquitetura fazer os análises energéticos, ambientais, econômicos e sociais ao redor de dois cenários, com sistemas de geração renováveis contra geração numa planta de ciclo combinado de gás para obter ao final como conclusão deste trabalho de pesquisa, as principais vantagens e desvantagens da arquitetura de controle proposta bem como dos sistemas de geração.

Palavras Chave: Algoritmo de distribuição, geração distribuída, microrredes, energia solar, energia eólica, bateria de chumbo-ácido, sustentabilidade, alterações ambientais, fontes de energias renováveis.

Abstract

Electric power generation is one of the most important human activities in the operation of a modern city, because it has a direct connection with most of the production activities, due to its relevance, in many cases the environmental issue is not prioritized, resulting in the destruction of ecosystems, in the case of hydraulic power and air and water pollution, in the case of thermal plants, for which the generation of clean power emerged, but with the inconvenience that this has a higher initial cost, besides other problems in the quality of energy offered. This master thesis has the purpose of propose and model a hybrid system of electricity generation, based on renewable energy with distribution control in order to manage the use of unused energy, storing it in a battery bank and/or injecting it into the electricity grid, thus improving energy efficiency and the quality of energy in the system. In order to achieve this objective, in the first part, there is an introduction to the best known methodologies of energy control and energy distribution, to then define the architecture and its operating modes as well as the methodology and implementation tools, and then, by means of a case study, define the size and distribution of the generation systems and with the results obtained from the architecture make the energy, environmental, economic and social analyses around two scenarios, with renewable generation systems versus generation in a combined cycle gas plant to ultimately obtain the advantages and disadvantages of the developed architecture as well as the generation systems.

Key Word: Distribution algorithm, distributed generation, microgrids, solar power, wind power, lead-acid battery, sustainability, environmental change, renewable energy.

Lista de Ilustrações

Figura 1. Impactos produzidos na Geração de Energia Elétrica.....	15
Figura 2. Sistemas de Energia Inteligente, tomada de (Connolly et al., 2016)	19
Figura 3. Diagrama da Microrrede, tirada em (Gomis-bellmunt et al., 2014).....	20
Figura 4. Esquema de geração distribuída, baseada em (Blaabjerg et al., 2006)	23
Figura 5. Arquitetura de conexão e operação proposta.	29
Figura 6. Configuração direta ou Inicial para o atendimento da demanda de energia.	31
Figura 7. Configuração de uso eficiente do excesso da energia.....	31
Figura 8. Configuração do uso da energia armazenada.....	32
Figura 9. Configuração do Backup parcial ou total da arquitetura proposta.....	32
Figura 10. Sistema de Comutação para Baterias (A) e Fontes de Geração (B).....	33
Figura 11. Definição das ferramentas do Simscape	36
Figura 12. Estrutura operacional do Stateflow®	37
Figura 13. Distribuição de Weibull para a Velocidade do vento em Barranquilla.....	39
Figura 14. Curva média de velocidade do vento por dia	40
Figura 15. Curva de Radiação Solar média durante o dia (24h)	41
Figura 16. Curva de Consumo Elétrico	41
Figura 17. Representação esquemática do Sistema Fotovoltaico.....	42
Figura 18. Modelo proposto de um painel fotovoltaico	46
Figura 19. Algoritmo Perturb & Observe.....	47
Figura 20. Conversor Boost.....	48
Figura 21. Sistema fotovoltaico de Geração Elétrica.	49
Figura 22. Esquema do Sistema Eólico.	50
Figura 23. Tipos de Geradores em turbinas eólicas	51
Figura 24. Curva de Potência da turbina AGW 110/2.1.....	53
Figura 25. Modelo Turbina Eólico	55
Figura 26. Controle de Tensão.	56
Figura 27. Sistema de Geração de Energia Eólica.....	56
Figura 28. Esquema do Sistema de Armazenamento numa Bateria.....	58
Figura 29. Modelo de Bateria.....	60
Figura 30. Sistema de Comutação	62
Figura 31. Sistema de Armazenamento de Baterias.....	63

Figura 32. Algoritmo de gerenciamento de energia	64
Figura 33. Esquema implementado do algoritmo de gerenciamento da energia.....	65
Figura 34. Potência gerada e Potência fornecida na rede através do Sistema Fotovoltaico.....	68
Figura 35. Potência gerada e Potência fornecida na rede através do Sistema Eólico.....	69
Figura 36. Potência gerada versus Potência fornecida pelo sistema de um banco de baterias.	70
Figura 37. Curva de Potência da rede.....	71
Figura 38. Funcionamento do algoritmo para os diferentes casos definidos.....	72
Figura 39. Curvas de potência com e sem algoritmo	73
Figura 40. Curvas de Tensão e Corrente com e sem algoritmo de distribuição	74
Figura 41. Funcionamento do algoritmo para as condições de geração mais baixas com $SOC_{min}=0.8$	75
Figura 42. Funcionamento do algoritmo para as condições de geração mais baixas com $SOC_{min}=0.6$	76
Figura 43. Curvas de Tensão (A), Corrente (B) e Potência (C) para condições de geração mais baixas com $SOC_{min}=0.6$	77
Figura 44. Funcionamento do algoritmo para as condições de geração máximas de potência.	77
Figura 45. Curvas de Tensão (A), Corrente (B) e Potência (C) para condições de geração de potência máxima.....	78
Figura 46. Emissões acumuladas de fontes renováveis em comparação com o sistema de gás de ciclo combinado.....	81
Figura 47. CO ₂ da Atmosfera v.s. temperatura nos últimos 60 anos	83
Figura 48. Relação entre Gton CO ₂ produzido e a Temperatura Atmosférica	84
Figura 49. Cashflow acumulado dos sistemas de geração.....	90

Lista de Tabelas

Tabela 1. Comparação Simulink com Simscape	35
Tabela 2. Potências acumuladas ao longo do dia em todas as condições estudadas	79
Tabela 3. Emissões de CO ₂ individuais e totais dos sistemas	81
Tabela 4. Impostos e incentivos das diferentes fontes de energia elétrica em 25 anos	82
Tabela 5. Custo social acumulado para os sistemas de geração relacionado com na produção de CO ₂ e o aumento do risco de mortalidade	85
Tabela 6. Custos dos sistemas de geração para uma vida útil de 25 anos	87
Tabela 7. Relação custo/potência gerada para a arquitetura desenvolvida.....	88

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. Apresentação do Problema.....	14
1.2. Objetivo do Trabalho	15
1.2.1. Objetivos Específicos	16
1.3. Descrição dos Capítulos	16
2. REVISÃO DA LITERATURA	18
2.1. Energia Inteligente	18
2.2. Microrrede.....	19
2.3. Geração Distribuída de Energia	22
2.4. Sistemas de Geração de Energia Renovável	24
2.4.1. Sistemas Fotovoltaicos	24
2.4.2. Sistemas Eólicos.....	26
2.5. Conclusão	27
3. METODOLOGIA.....	29
3.1. Proposta do Trabalho	29
3.2. Metodologia de Implementação	34
3.3. Conclusão	37
4. IMPLEMENTAÇÃO.....	38
4.1. Estudo de Caso	38
4.2. Sistema Fotovoltaico	42
4.2.1. Célula Solar	43
4.2.2. Regulador de Potência	46
4.3. Sistema Eólico.....	49
4.3.1. Gerador Eólico.....	50
4.3.2. Regulador de Potência	55
4.4. Sistema de Armazenamento	57
4.4.1. Bateria de Chumbo-Ácido	59
4.5. Algoritmo de Gerenciamento de Energia.....	63
4.6. Conclusão	66
5. RESULTADOS	67
5.1. Estudo Energético	67

5.2.	Estudo de Impacto Ambiental	80
5.3.	Estudo Social.....	82
5.4.	Estudo Econômico.....	86
5.5.	Conclusão	92
6.	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS	93

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos 50 anos, o consumo de energia elétrica dobrou como resultado da crescente demanda da população (Hastik et al., 2015), que ano após ano vem crescendo em ritmo acelerado, causando um aumento exponencial na produção de gases de efeito estufa alcançando níveis com a capacidade de gerar uma elevada mudança climática no planeta.

No início de 1990 foi atribuído um pouco mais de 60% dessas emissões unicamente à geração de energia elétrica, o que gerou no ano de 1997 o nascimento do protocolo de Kyoto no Japão, em 2010, a estratégia Europa 2020, e em 2015 o acordo Paris. Todos estes acordos foram elaborados com a finalidade de reduzir os níveis de poluição através do incentivo de geração de energia limpa, devido à sua capacidade de produção, onde reunindo diferentes fontes alternativas de energia são capazes de cobrir até 3078 vezes a energia consumida em todo o planeta (European Renewable Energy Council, 2011), que para o ano de 2018 foi de 161.248 PWh.

O acima pode ser visto no último relatório da REN21, onde o uso de energias renováveis para a geração de eletricidade aumentou 15.2% desde os últimos 6 anos, de 3% no final de 2008 para 18.2% no final do ano de 2017, mostrando um aumento significativo no uso de energia solar, onde sua capacidade de geração aumentou mais de 26 vezes, de 15 GW para 402 GW gerados e no caso da energia eólica foi mais de 4 vezes, de 121 GW para 539 GW. Estes dados denotam a importância e o potencial desta alternativa, já que o sol é a maior fonte de energia e a de maior capacidade que existe (REN21, 2018). Adicionalmente, a implementação destes acordos é baseada na utilização de energia renovável, promovendo o aumento da eficiência energética dos sistemas atuais, que apresentam como principal desvantagem, uma eficiência de produção e de energia intermitente, com uma conversão de energia inferior ao 30%, produzindo possíveis discrepâncias em relação ao dimensionamento e instalação destes sistemas.

Considerando os aspectos mostrados e visando o cumprimento dos critérios de dimensionamento e instalação desses sistemas, é necessário conceber um sistema de geração de energia renovável que satisfaça as deficiências descritas anteriormente, e consiga uma maior eficiência energética, diminuindo o dimensionamento do sistema para ser implementado.

Nesta Dissertação de Mestrado é proposto um estudo de caso que considera todos os aspectos descritos anteriormente, de forma a viabilizar a análise dos diferentes impactos gerados através de sua implementação.

1.1. Apresentação do Problema

Em geral, a geração de energia elétrica tem objetivo transformar alguma forma de energia, seja ela química, cinética, potencial, mecânica em eletricidade, onde dependendo do tipo de energia, também terá um processo de conversão diferente, que em particular resulta em diferentes sistemas de geração para atender uma demanda, que por sua vez, devido ao processo de conversão, produz uma série de impactos em diferentes áreas, que são específicos para cada caso e podem ser vistos detalhadamente na Figura 1.

A Figura 1 mostra a ocorrência de quatro impactos fundamentais, que podem ocorrer dependendo da fonte de energia utilizada que poderá ter um maior ou menor grau de impacto. Pode-se constatar que nos casos da:

- a) **Energia térmica:** O impacto ambiental é o mais relevante, onde a poluição pode ser produzida principalmente por resíduos tóxicos gerados, que podem ser tanto gases como metais pesados,
- b) **Hidroeleticidade:** Este sistema de geração tem um impacto ambiental e social concentrado na fase de construção.
- c) **Fontes renováveis:** Possuem maior impacto econômico e energético devido às desvantagens acima mencionadas.

Como pode ser evidenciado, a implementação de energias renováveis tem um efeito positivo na redução dos impactos ambientais e sociais, mas por outro lado um efeito negativo no aumento dos impactos econômicos e energéticos, que estão relacionados, já que poderá ocorrer o problema de intermitência na rede, diminuindo a qualidade da energia oferecida.

Dentro desse contexto será necessário um meio de armazenamento de alta capacidade desta energia, além de um sobredimensionamento dos sistemas de geração, o que muitas vezes leva ao desperdício dos excessos de energia e, portanto, a redução da eficiência de todo o sistema. Consequentemente, ambos os impactos (econômico e energético) aumentam os custos

iniciais de forma que a utilização desses sistemas de energia deixe de ser competitiva em relação aos sistemas tradicionais.

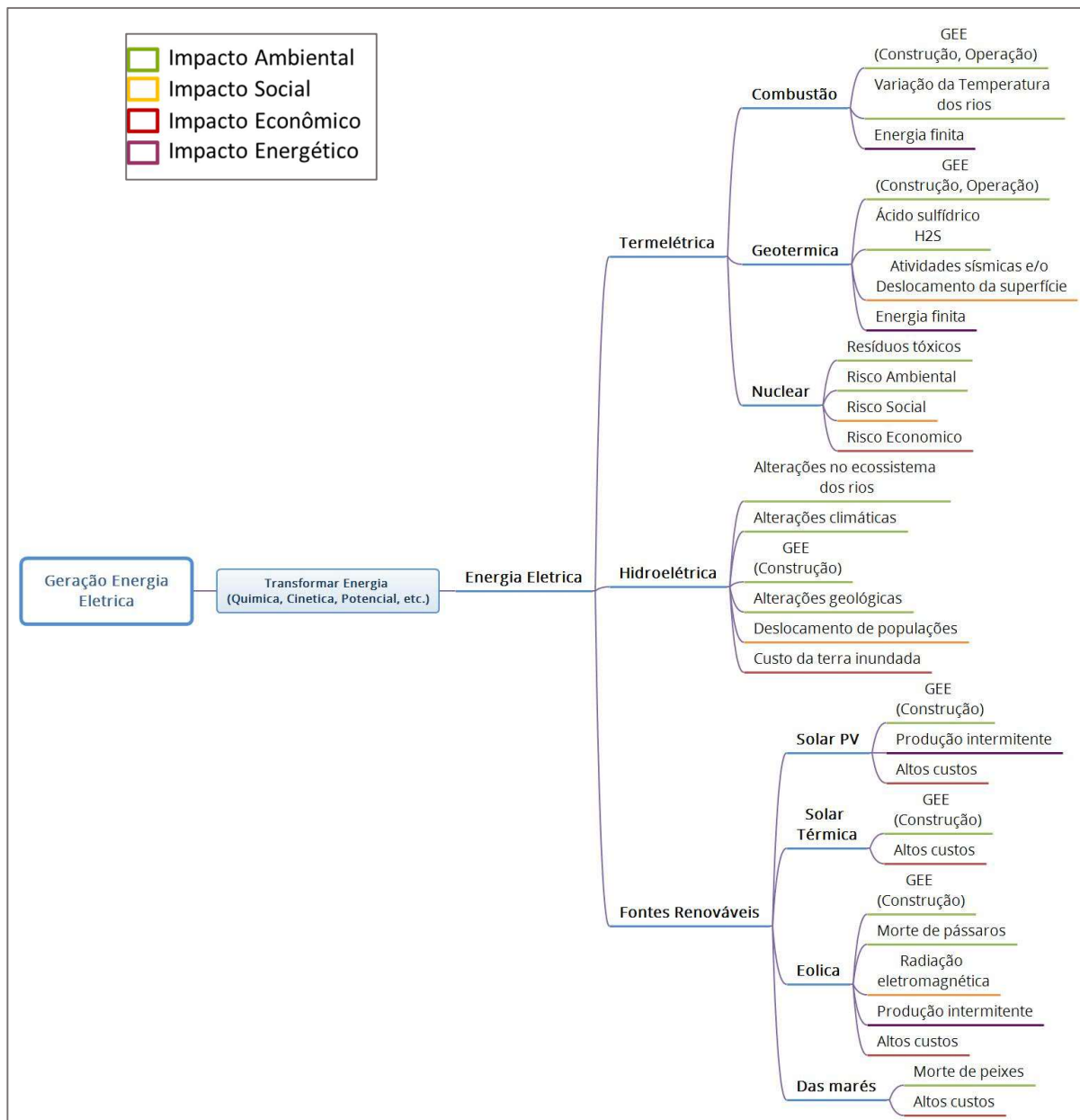


Figura 1. Impactos produzidos na Geração de Energia Elétrica

1.2. Objetivo do Trabalho

Modelar e simular um sistema de gerenciamento e distribuição de energia para uma arquitetura de geração híbrida baseada na utilização de fontes renováveis, permitindo o

aproveitamento da energia não utilizada, através do armazenamento em baterias e posterior injeção na rede. Deste jeito se obtém maior eficiência energética e energia de melhor qualidade no sistema com no propósito de atingir a demanda de uma população sob qualquer circunstância, e através da análise dos aspectos sociais, ambientais, econômicos e energéticos do sistema, identificar a melhor arquitetura para a produção de eletricidade para uma cidade.

1.2.1. Objetivos Específicos

- Modelar e simular os sistemas de geração e armazenamento propostos em torno de um cenário real com no propósito de obter um fluxo de energia sob umas condições ambientais variáveis, para assim desenvolver um algoritmo de distribuição com a habilidade de se adaptar as diferentes condições.
- Identificar a demanda elétrica de uma população, adaptando o fluxo de energia dos sistemas projetados, por meio da detecção dos excessos ou as quedas de energia na rede com a finalidade de gerenciá-los através dos sistemas de armazenamento e injeção na rede, atingindo deste modo a demanda para todo momento do dia e diminuindo as perdas de energia.
- Comparar os sistemas de geração projetados com que é utilizado pela população-alvo por meio de suas variáveis ambientais, sociais, econômicas e energéticas, com no propósito de obter as vantagens e desvantagens de cada um, identificando assim o melhor dos sistemas em todo caso.

1.3. Descrição dos Capítulos

A metodologia proposta para o desenvolvimento desta Dissertação de Mestrado está estruturada a partir dos seguintes capítulos.

- **Revisão Bibliográfica:** Neste capítulo é realizado a contextualização do problema abordado, apresentando soluções baseadas no desenvolvimento de um controle de

distribuição para um sistema de geração de energia híbrido baseado na utilização de fontes renováveis de energia.

- **Proposta do Trabalho e Metodologia de Implementação:** Neste capítulo é descrito a arquitetura de controle de distribuição para um sistema de geração de energia híbrido baseado na utilização de fontes renováveis de energia, a estrutura de funcionamento e as diferentes configurações para o desenvolvimento do sistema de gerenciamento de energia proposto.
- **Implementação:** Neste capítulo é apresentado as diferentes características do caso em estudo, o projeto de cada um dos sistemas de geração, armazenamento, controle de distribuição e os diferentes modelos para a avaliação da arquitetura proposta. Para a implementação deste sistema foi utilizado a plataforma Matlab® e bibliotecas disponíveis em Simulink®.
- **Resultados:** Neste capítulo são apresentados os principais resultados obtidos, através da aplicação do caso de estudo e os modelos nas configurações descritas para a avaliação da arquitetura proposta.
- **Conclusões Finais e Perspectivas Futuras:** Neste capítulo são apresentados comentários e considerações finais, e são apresentadas perspectivas futuras do trabalho implementado

2. REVISÃO DA LITERATURA

Nesta seção são descritos os conceitos mais relevantes no desenvolvimento deste trabalho, começando da geração de energia até o consumo descrevendo a distribuição desta em cada estrutura estudada, a partir do conceito e das características gerais da *Smart Energy*, descrevendo seus principais componentes, tais como as microrredes, suas estruturas, como são as redes integradas e isoladas; até a descrição dos sistemas de geração, destacando a relação entre todos os sistemas tratados.

2.1. Energia Inteligente

O conceito de energia inteligente é utilizado em sistemas de geração e distribuição que usam energia de maneira integral. O termo foi introduzido em 2011 no projeto CEESA (*Coherent Energy and Environmental System Analysis*) (Lund, Duic, Østergaard, & Mathiesen, 2016); (Mathiesen et al., 2015), sendo utilizado pela primeira vez num artigo científico em 2012, onde afirma-se que este conceito é sinônimo de rede inteligente, a qual pode ser entendida como o desenvolvimento e implementação de novas tecnologias e infraestruturas, produzindo novas arquiteturas de conversão de energia, o que é conseguido através da transformação de um modelo direto (etapa de produção direta e transporte até ao utilizador final) para um modelo multiponto, que pode ser entendido como a integração diretamente de vários modelos de geração de energia, tudo isso com o objetivo de usar essas fontes de maneira mais eficiente, conforme descrito em (Lund, 2014).

Pode-se descrever detalhadamente os sistemas de energia inteligente contemplando dois aspectos. O primeiro destes aspectos é focado no controle gerencial, centrado na geração de energia e sua distribuição, para esse grupo, e a definição de energia inteligente refere-se à integração dos componentes de geração, transporte e consumo de energia; e o segundo aspecto, refere-se à combinação do mercado das diferentes fontes de geração, sejam elas renováveis ou não renováveis (Lund, Østergaard, Connolly, & Mathiesen, 2017); (Connolly, Lund, & Mathiesen, 2016).

No trabalho apresentado por (Dincer & Acar, 2017), sistemas inteligentes de energia são estudados e avaliados com base em sua eficiência, desempenho ambiental e econômico e fontes de energia.

Como este conceito é relativamente novo, ao implementar as diferentes arquiteturas desenvolvidas, é necessário um estágio de transição para melhorar o desempenho energético, energético e ambiental. A Figura 2 representa o conceito dos futuros sistemas inteligentes de energia.

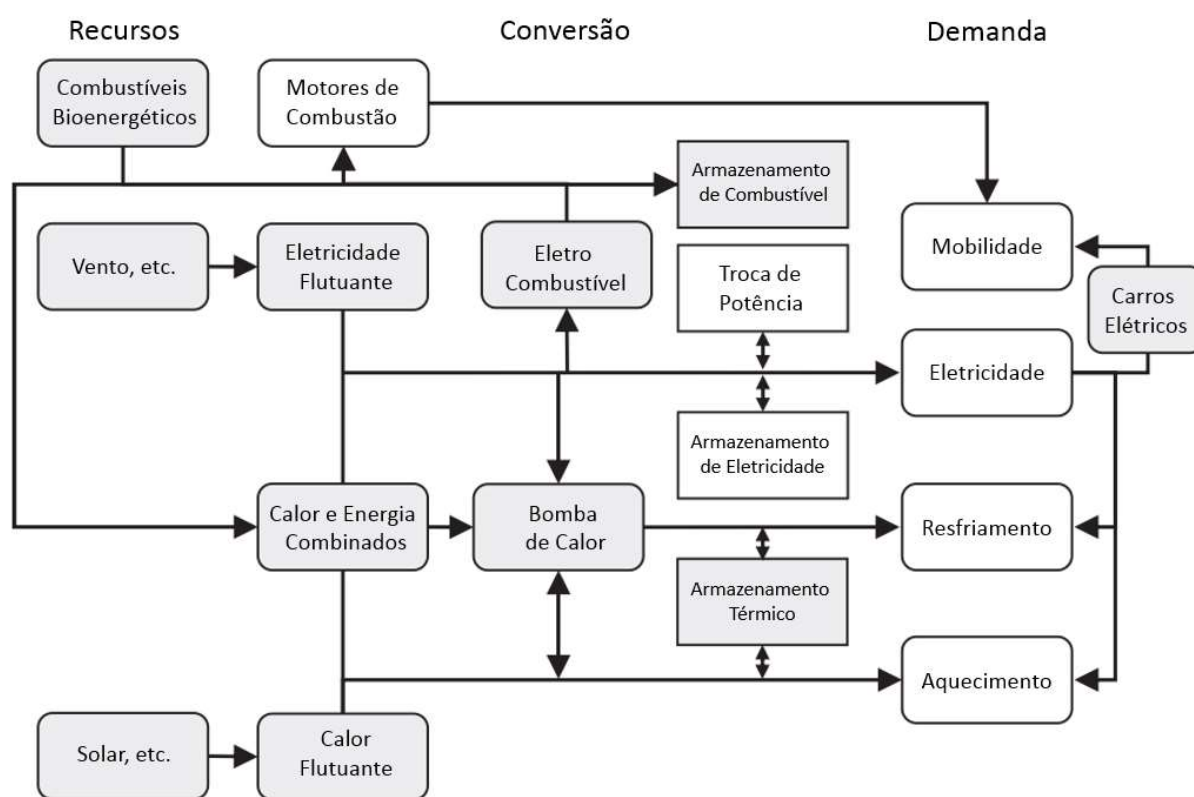


Figura 2. Sistemas de Energia Inteligente, tomada de (Connolly et al., 2016)

2.2. Microrrede

A Microrrede pode ser contextualizada como um meio de aplicar o conceito de sistemas de energia inteligente, podendo ser definido como um grupo local de fontes de geração de energia e cargas que são gerenciadas de forma autônoma e inteligente através de múltiplas

interfaces (Sabzehgar, 2017) e (Mariam, Basu, & Conlon, 2016). Este conceito enquadra um subsistema de gerenciamento organizado que inclui sistemas de geração distribuída (DG) (fontes convencionais, renováveis e não convencionais) e um conjunto de cargas. A Figura 3 mostra o esquema geral da Microrrede.

Um dos principais objetivos de uma microrrede é otimizar o fluxo de energia nas redes de distribuição e reduzir as perdas de energia nas linhas de transmissão interligando os sistemas de geração distribuída, de armazenamento de energia e as diferentes cargas dentro de uma rede elétrica. Esses sistemas de distribuição, que serão detalhados na próxima seção deste capítulo, constituem o ponto central de trabalho das microrredes devido ao potencial emergente, em que eles têm integrados diferentes fontes de geração.

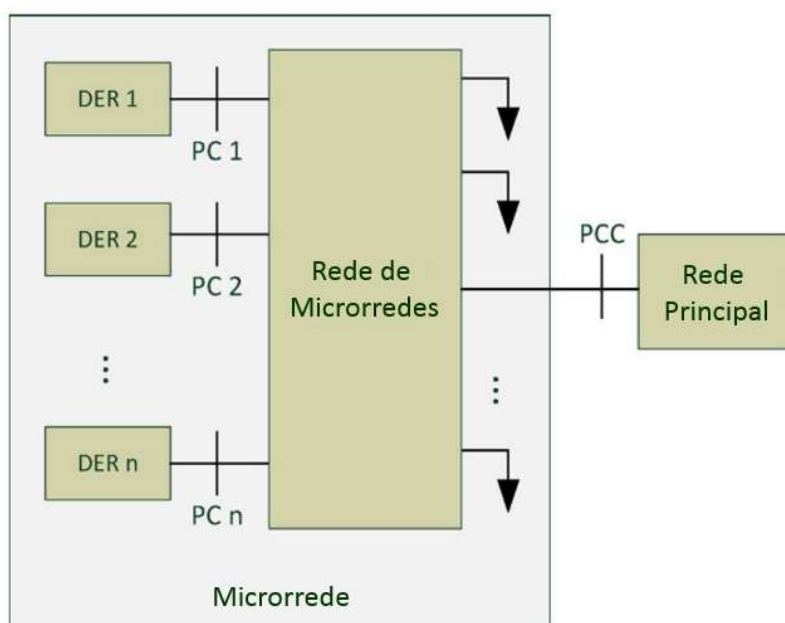


Figura 3. Diagrama da Microrrede, tirada em (Gomis-bellmunt et al., 2014)

As microrredes possuem dois modos de operação: o modo normal e o modo de emergência, também chamado de modo ilhado, e estes modos são geralmente gerenciados através de um controlador central (MGCC – *Microgrid Central Controller*). Este sistema de gerenciamento possui diferentes funcionalidades, tais como o gerenciamento e controle de recursos econômicos de todos os sistemas individualmente. (Jiayi, Chuanwen, & Rong, 2008)

No caso de (Martin-Martínez, Sánchez-Miralles, & Rivier, 2016) apresentam quatro camadas, definidas com base na utilização de redes inteligentes, que são: Camada física, Camada de comunicação, Camada de informação e funcionalidade e a Camada de negócios.

A camada física contém todos os elementos descritos anteriormente (cargas, geração distribuída, sistemas eletrônicos e sistemas de armazenamento); A segunda camada tem o objetivo de fornecer a camada de inteligência todos os dados da primeira camada que são armazenados e disponibilizados para a sua utilização.

Na terceira camada estão incluídos todos os sistemas de controle e decisão, tanto em nível local quanto centralizado. Estes sistemas processam as informações adquiridas na camada anterior e as conectam através de sensores, sistemas de medição e atuadores localizados na camada física. Finalmente, na última camada encontra-se o modelo de negócio, a qual é a última para ser implementada com a capacidade de gerenciar uma organização mais descentralizada de sistemas de energia, onde duas partes de uma empresa são identificadas concernente ao cliente e o produto (energia elétrica oferecida).

(Unamuno & Barrena, 2015) descrevem múltiplas topologias de utilização das microrredes, onde na tecnologia referente a fase de testes, são apresentados e testados de formas diferentes em todos os momentos, embora possam ser divididos em três grandes grupos, o AC, o DC e o Híbrido. O AC é o mais utilizado, pois oferece uma integração direta com as unidades de geração distribuída sem grandes modificações, ainda assim, apresenta alguns problemas, como a necessidade de sincronizar essas unidades ou a circulação de energia reativa, gerando perdas de energia nos sistemas de transmissão. No caso das redes de distribuição de corrente contínua, são utilizadas devido ao aumento de unidades de geração distribuída (DG), de armazenamento e do consumo de energia que utilizam voltagem DC; sua grande vantagem é que a eficiência geral desses sistemas é aumentada, devido que menos conversores de interface são usados e não há circulação de corrente reativa na rede, portanto não há necessidade de sincronização, mas, ao contrário do AC, é necessária uma modificação grande da rede de distribuição atual no caso em que ela já esteja construída, o que acrescenta os custos drasticamente.

Pelo contrário, as topologias híbridas AC-DC ou DC-AC podem ter a maior quantidade de vantagens pela combinação das características das topologias anteriores, mas, em contraste, existem poucos estudos sobre sua operação em um cenário real e requerem altos investimentos para sua implementação em comparação com a DC ou AC, o que gera desconfiança por parte dos pesquisadores e da própria indústria.

2.3. Geração Distribuída de Energia

Ao contrário dos métodos convencionais de geração de energia, a geração distribuída (DG), faz parte das microrredes, e estas por sua vez da rede inteligente, sendo definido como o método de produzir parte da energia elétrica próxima ao local de consumo, ou cidade através de pequenas unidades de geração, que também é chamada de geração dispersa, incorporada ou descentralizada, que abrange uma ampla gama de unidades de geração, que podem ser renováveis e não renováveis, conforme descrito por (Dulău, Abrudean, & Bică, 2014a, 2014b; Pesaran H.A, Huy, & Ramachandaramurthy, 2017).

Os objetivos fundamentais das unidades da DG estão divididos em três grupos; o primeiro grupo é onde estão incluídos os objetivos técnicos, como a minimização da perda de potência e a melhoria da qualidade de tensão oferecida; no segundo grupo, são descritos os objetivos de natureza financeira, como minimizar custos e aumentar a capacidade e a eficiência do sistema de DG e, no último grupo, concentram-se nos índices que serão estudados no caso específico, conforme descrito por (Pesaran H.A et al., 2017).

(Singh & Sharma, 2017) mostram que dependendo do tipo da geração distribuída (DG) utilizada, se apresenta a capacidade de lidar tanto com a potência reativa quanto com a potência real. As quais podem ser divididos em quatro categorias:

- a) Conhecido como T1, constituem as redes baseadas unicamente na produção de energia real, que podem ser obtidas por meio de células solares, usinas solares térmicas ou biogás;
- b) Conhecido como T2, onde são suportadas a potência reativa e a real, operando com um fator de potência de 0,8-0,99 por meio de sistemas eólicos, marés e geotérmicos, entre outros.
- c) Conhecido como T3, e constituído apenas do sistema reativo (fator de potência de 0.0), onde as unidades são agrupadas como banco de indutores ou capacitores
- d) Constituído da última potência reativa de entrega e absorve real (fator de 0,8-0,99), que pode ser exemplificado, através dos geradores de indução duplamente alimentado.

Os principais componentes de um sistema de geração distribuída são apresentados na Figura 4.

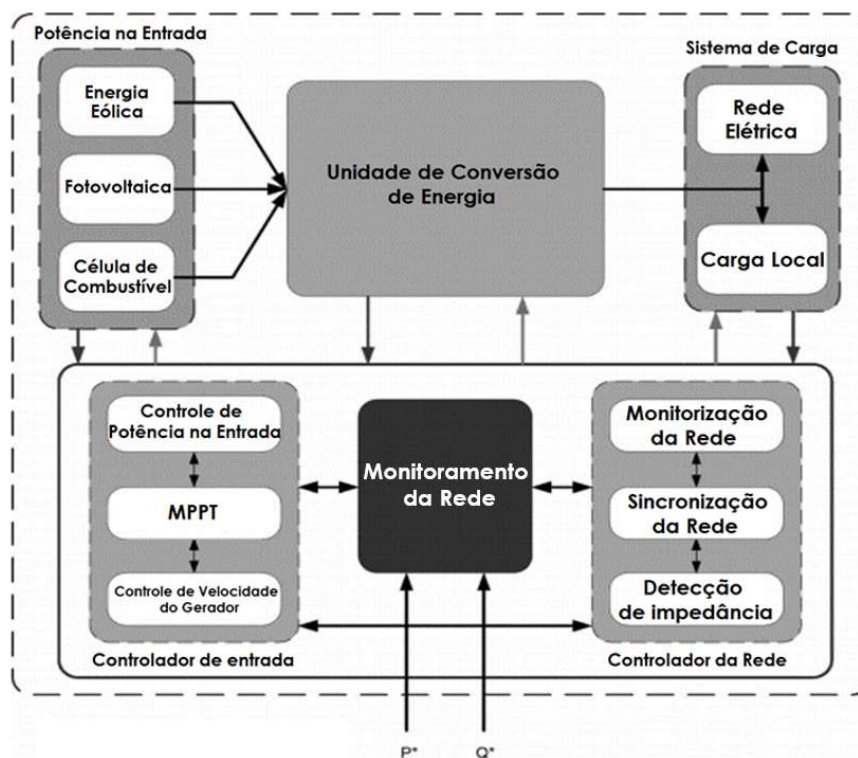


Figura 4. Esquema de geração distribuída, baseada em (Blaabjerg et al., 2006)

Diferentes trabalhos estudados são apresentados de forma detalhada por (Theo, Lim, Ho, Hashim, & Lee, 2017), mostrando a popularidade desta tecnologia e grande aumento de utilização nos últimos anos, devido principalmente, ao seu potencial e múltiplas vantagens na sua utilização, permitindo um gerenciamento de energia mais eficiente, usando técnicas de controle de pico de potência, oferecendo assim aos consumidores, mecanismos de geração localmente, no momento de necessidade de uma elevada demanda de utilização.

Dentre as principais vantagens do ponto de vista econômico, é importante notar a redução dos custos da expansão das redes de distribuição de eletricidade em regiões isoladas, ou de difícil acesso, tais como em ilhas, a partir da utilização de unidades locais da DG.

Dentre todos os casos expostos, dois podem ser apresentados com maior impacto, onde através de avaliação financeira apresentado em trabalho realizado por (Al-Masri & Ehsani, 2015) que mostra a eficiência econômica da implementação de um sistema híbrido de energia eólica-fotovoltaica na rede de energia da Jordânia e no lado costeiro da Argélia, onde a implementação do mesmo sistema híbrido alcançou uma redução de custo de aproximadamente 3 dólares por kWh em relação a um sistema convencional.

O benefício ambiental é explicado em vários casos de redução de emissão de poluentes alterando a fonte por um combinando renovável e não renovável. Em Jiangxi – China (Somma

et al., 2016) foi realizada uma implementação renovável de 0,16% do total, onde foram reduzidas 1,08 milhão de toneladas de CO₂ por ano, e da mesma forma em Shanghai (Q. Wu, Ren, Gao, & Ren, 2016) uma unidade de mistura DG de grande escala baseada na geração de gás e um sistema solar térmico foi implementado, resultando em uma redução de 22 a 33% na área total implementado, contendo residências, empresas e edifícios institucionais.

2.4. Sistemas de Geração de Energia Renovável

2.4.1. Sistemas Fotovoltaicos

Os sistemas fotovoltaicos são constituídos de um conjunto de células solares, que aproveitam o chamado princípio fotovoltaico gerando energia a partir da luz do sol. Este princípio foi utilizado em sua primeira vez no ano de 1839, quando o físico francês Edmond Becquerel gerou eletricidade ao iluminar um eletrodo de metal através de uma solução eletrolítica fraca (Iso, 2005).

No momento atual, o silício cristalino é o principal semicondutor utilizado comercialmente devido a seu preço e abundância na superfície da terra, onde mais de 90% da crosta terrestre é composta de minerais de silicato (Agustín Vázquez, 2000), entretanto a eficiência energética do sistema é considerada baixa (15-22%). Existem outros semicondutores que podem incrementar a eficiência energética, entretanto o preço deles ainda é considerado elevado e proibitivo em relação a outras fontes de energia disponíveis no mercado.

Em termos de operação, os painéis fotovoltaicos são ativados através da radiação solar, que produz uma excitação dos elétrons do material semicondutor, gerando uma pequena diferença de potencial. A conexão em série destes dispositivos permite obter maiores diferenças de potencial elétrico. (OLIVEROS, 2017).

Os painéis fotovoltaicos podem ser diferenciados em relação a sua tecnologia de fabricação. As tecnologias baseadas em silício (Si) podem ser categorizadas em silício cristalino e silício amorfo ou filme fino, que são as mais utilizados atualmente.

Os sistemas fotovoltaicos são compostos de uma unidade de aquisição ou painel fotovoltaico, a unidade de regulação de potência, o controle de potência para uma instalação centralizada em rede (grandes usinas) ou uma distribuída em rede (pequenas instalações). Para fora da rede (redes comerciais / aplicações isoladas) é necessário um sistema de armazenamento de energia (Akarslan, 2012).

Para o teste e viabilização deste sistema de geração, a indústria de produção de energia implementa inicialmente uma planta piloto e de acordo com os resultados são implementadas mais plantas gradativamente com no propósito de mudar a matriz energética sem alterar drasticamente o funcionamento da rede de abastecimento. Em (Santana-Rodriguez et al., 2013), é mostrado como na cidade de México foi feito um teste de conexão utilizando a configuração centralizada em rede, o qual gerou uma média anual de 10.8 MW/h de energia elétrica, equivalente à queima de 0.87 toneladas de óleo e portanto a emissão de aproximadamente 2.1 toneladas / ano de CO₂ para a atmosfera. Neste mesmo trabalho é feita uma comparação entre as diferentes tecnologias comerciais, que tem como resultado em termos de melhor desempenho, o observado para os módulos feitos de tecnologia de silício amorfo sob variações de temperatura típicas das condições ambientais da Cidade do México.

(Mondol, Yohanis, Smyth, & Norton, 2006) realizaram um trabalho de pesquisa na Irlanda do Norte durante um período de três anos, onde os efeitos da insolação e operação do inversor foram medidos, em diferentes faixas (mensais e anuais), que teve como resultados:

- a) A média mensal de eficiência do sistema PV, sistema e inversor que variou de 4.5% a 9.2%, 3.6% a 7.8% e 50% a 87%, respectivamente.
- b) As eficiências médias anuais do sistema PV, sistema e inversor foram de 7.6%, 6.4% e 75%, respectivamente.
- c) As médias diárias mensais dos índices de desempenho DC e AC variaram de 0.35 a 0.74 e 0.29 a 0.66, respectivamente.

Por outro lado (Akikur, Saidur, Ping, & Ullah, 2013) realizaram um estudo comparativo para eletrificação rural fora da rede onde diferentes tópicos foram estudados, tais como o custo da extensão da rede em relação ao tipo de sistema (em rede e híbrido) com faixas de \$100.000 até \$140.000 para uma distância entre os 0 km e 4 km para o sistema em rede, e valor constante \$130.000 para o sistema híbrido. Neste trabalho também foi estudado o preço da energia por kWh gerada, onde tem uma faixa entre os \$0.1/kWh a \$1/kWh, e em alguns casos pode ser maior que \$1/kWh.

2.4.2. Sistemas Eólicos

A energia eólica é gerada através da energia solar, e isto acontece devido ao fato, que o ar como qualquer gás é movido de uma área de alta para uma de baixa pressão. A radiação solar que afeta a superfície da parte da água a temperatura nas camadas superficiais dificilmente se altera, o mesmo acontecendo em relação a temperatura do ar, devido principalmente a capacidade de absorção de calor pela água.

Em nosso planeta, por outro lado, a radiação solar recebida eleva a temperatura tanto da crosta terrestre quanto do ar que envolve nossa atmosfera. O ar quente se expande, perde a pressão e é substituído pelo ar fresco que vem do mar, e durante a noite o ciclo se inverte, ou seja, aquele ar em movimento é o vento, que é capaz de produzir energia elétrica através de um dispositivo mecânico, o mais conhecido é a turbina eólica (Raquel Gálvez Román, 2005).

Em relação a porcentagem de energia que a população alvo precisa, a energia do vento pode gerar cerca de 200 vezes essa quantidade, representando somente 2% da energia que o sol gera no ano em nosso planeta, ou seja, esses números representam cerca de dois trilhões de toneladas de óleo equivalente por ano, o que mostra que a energia eólica se apresenta com uma forte possibilidade na geração de energia renovável (REN21, 2018).

Os principais componentes de turbina eólica são a torre, o rotor, as pás as quais são as responsáveis da transformação da energia cinética do vento em energia mecânica, a gôndola, o multiplicador de velocidade das pás, o gerador de energia elétrica, o controlador de potência e os sistemas de regulação e proteção mecânica (Álvarez, 2006). As turbinas eólicas são divididas em dois grupos: as de eixo horizontal e eixo vertical.

As turbinas de eixo horizontal são as mais comuns e são divididas de acordo com o seu número das pás (duas ou três), apresentando uma faixa de operação maior em relação a de eixo vertical, como também uma alta eficiência, e baixo torque de operação, acarretando assim numa boa confiabilidade (Al-Bahadly, 2011).

No caso das turbinas eólicas de eixo vertical as mesmas possuem uma produção de vento mais constante, devido ao fato que não depende da direção do vento para gerar energia. Apresentam também um design mais confortável para manutenção, e possuem também uma eficiência teoricamente maior, entretanto por causa do mesmo design, a eficiência atual destes sistemas é menor que as turbinas de eixo horizontal (Al-Bahadly, 2011).

Para a produção de energia em larga escala são utilizados dois sistemas: *Onshore* e *Offshore*.

O sistema conhecido como *Onshore* tem como principal vantagem seu baixo custo, a queda de tensão e baixa e a facilidade na instalação e manutenção. (Xu, Pang, Zhang, Poganietz, & Marathe, 2018) mostra que é possível observar o impacto que gera a troca de tecnologia de geração de energia, com uma redução das emissões do 99.2% para o caso das fontes baseadas na queima de carvão e 98.9% para as baseadas em gás para uma produção de 22,5 MW. No caso de (Y. K. Wu, Han, & Lee, 2013) mostra os resultados dos estudos feitos nestes sistemas, onde foi planejado a instalação de dez parques eólicos para transformar a energia de uma ilha de Penghu em Taiwan devido aos altos preços de transmissão da energia das fontes de geração tradicionais até as ilhas.

O sistema *Offshore* tem como a principal vantagem um maior aproveitamento da energia eólica nos Oceanos ao contrário do sistema *Onshore*, devido à facilidade da criação de turbinas eólicas maiores para aproveitar o maior fluxo de energia do vento, mas como mostra (Arshad & O'Kelly, 2013), tem como a principal desvantagem que o preço é 90% mais caro que uma central de queima de combustíveis, por causa da infraestrutura que estes sistemas precisam para gerar energia, mesmo assim este sistema pode ser melhorado e ainda precisa de mais pesquisa com o propósito de diminuir os preços, pelo que para países com um área limitada ainda é uma opção como é no caso de UK, Alemanha, França e Suécia também países com poder aquisitivo tem interesse como no caso dos Estados Unidos, China e Coreia do sul.

2.5. Conclusão

Neste capítulo foi realizado uma revisão bibliográfica abordando o conceito da Energia Inteligente, identificando três elementos principalmente, recursos ou fontes, a conversão do tipo de energia para outra utilizável de acordo com a necessidade e a última é a demanda ou carga. Depois foi explicado o conceito de microrredes, onde foram identificadas as diferentes arquiteturas de conexão, AC, DC ou Híbrido, e as camadas necessárias para o seu funcionamento dentro do contexto de energia inteligente. Posteriormente foram abordados os temas de geração distribuída, que é o esquema básico para o desenvolvimento da proposta e,

por fim, foram mostradas de maneira geral as principais características dos sistemas de geração de energia renovável e sua importância nesse contexto. No próximo capítulo será apresentada a arquitetura proposta para o desenvolvimento deste trabalho.

3. METODOLOGIA

Neste capítulo será apresentada a descrição detalhada da arquitetura da proposta de um sistema híbrido proposto para utilização de energias renováveis e metodologia para a sua implementação e operacionalidade, detalhando os principais componentes através de sua modelagem matemática, as diferentes configurações operacionais e as ferramentas necessárias para desenvolvê-lo, usando o software de simulação Simulink do Matlab® como base central, onde é possível obter em paralelo as curvas de comportamento dos sistemas de geração, armazenamento e carregamento de energia.

3.1. Proposta do Trabalho

Utilizando como base as diferentes topologias das microrredes explicadas no capítulo anterior, será proposta uma topologia, que une os benefícios de um sistema híbrido com uma arquitetura descentralizada baseada no esquema funcional da geração distribuída. Esta proposta pode ser visualizada na Figura 5.

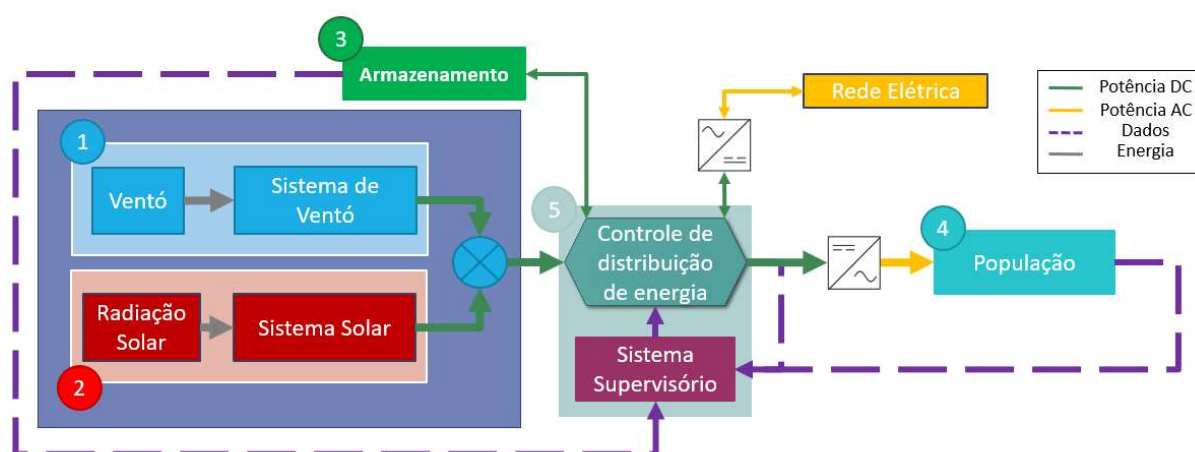


Figura 5. Arquitetura de conexão e operação proposta.

A Figura 5 representa os sistemas fundamentais para a operacionalidade da arquitetura proposta nesta dissertação, onde os diferentes blocos e sub-blocos são enumerados e descritos a seguir:

Primeiro bloco: representa o sistema de geração eólica que será modelado matematicamente no próximo capítulo desta dissertação, sendo o mesmo necessário devido ao seu alto potencial de extensão do terreno. A entrada do sistema é o perfil da produção eólica na área a ser estudada e a saída é corrente contínua (DC).

Segundo bloco: é representado o sistema de geração solar, que como explicado acima, é a fonte de maior potencial no mundo, razão pela qual é utilizado na proposta, onde o perfil de radiação da área estudar e a saída é corrente contínua (DC).

Terceiro bloco: é o sistema de armazenamento, que é proposto para ser constituído de um banco de baterias, devido ao seu alto potencial de armazenamento como um todo, apesar de ainda apresentar atualmente um alto custo de utilização. Mesmo assim, este sistema apresenta uma série de vantagens, como a sua resposta rápida e sua facilidade de configuração dependendo da necessidade da arquitetura. Tanto a entrada quanto a saída dependerão do modo de operação deste sistema será detalhado no próximo capítulo desta dissertação.

Quarto bloco: refere-se a demanda de utilização dessas energias, e o estudo de caso escolhido será direcionado a uma cidade de porte médio com uma rede de distribuição de corrente alternada (AC). Esta demanda varia ao longo do dia e do ano, tendo como entrada a potência proveniente do sistema e, como saída, os dados da demanda de energia instantânea.

Quinto bloco: mostra o sistema de controle de distribuição de energia proposto neste trabalho, que é subdividido em dois subsistemas

- **Primeiro subsistema:** responsável pelo controle de distribuição da energia através do algoritmo proposto para a operação da arquitetura apresentado.
- **Segundo subsistema:** responsável pela supervisão, que é usado para processar os dados das diferentes fontes de geração e demanda de energia para a tomada subsequente de decisões.

A entrada do primeiro subsistema são as potências geradas pelas fontes renováveis, a potência do sistema de armazenamento e a potência da rede tradicional da cidade. A entrada do segundo subsistema são os dados do estado de geração de energia em relação à demanda de energia do estudo de caso. A saída de todo o sistema de distribuição proposto é a potência em corrente contínua para os sistemas necessários, para os quais quatro configurações diferentes

foram propostas, que serão detalhadas posteriormente. Devido à variabilidade climática, que influencia diretamente as fontes de energia e a qualidade das mesmas, produzindo uma geração variável que em muitos casos não alcança satisfazer a demanda, é necessário desenvolver um sistema de suporte para isso, que produz na arquitetura proposta, diferentes modos de operação, neste trabalho são realizadas quatro diferentes configurações propostas para utilização. A primeira configuração proposta na Figura 6.

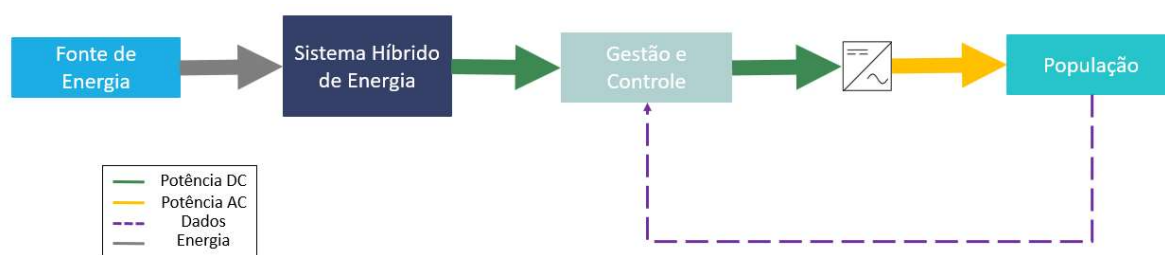


Figura 6. Configuração direta ou Inicial para o atendimento da demanda de energia.

A configuração da arquitetura apresentada na Figura 6 mostra o funcionamento fundamental do sistema, onde energia suficiente é produzida a partir de fontes de energias renováveis (energia eólica mais solar) para satisfazer a demanda de energia da população selecionada para o estudo de caso. Além disso, o sistema de armazenamento e a energia proveniente da rede estão inativos. A segunda configuração é mostrada na Figura 7.

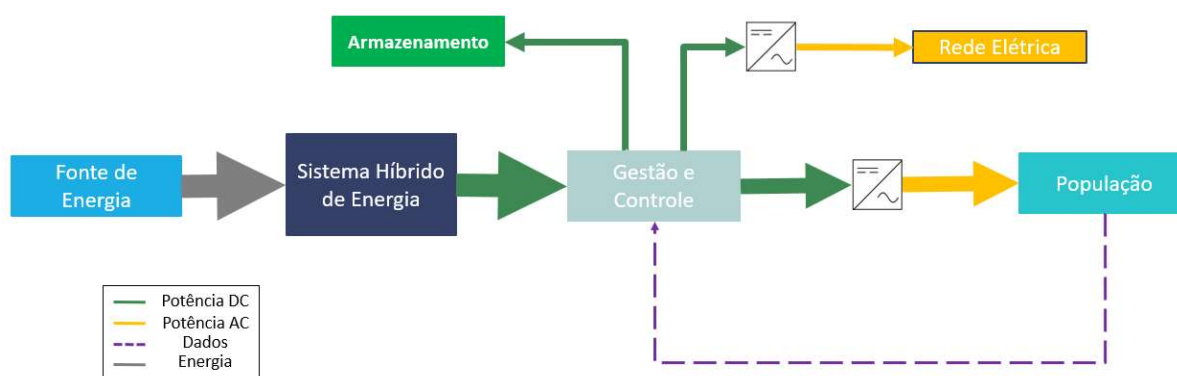


Figura 7. Configuração de uso eficiente do excesso da energia

A configuração dois, tem uma alta frequência de uso ao longo do ano, que é utilizada quando é gerada pelos dois sistemas de energia renovável (vento mais solar) quando eles

produzem mais energia do que a utilizada pela demanda, razão pela qual para não exceder a energia fornecida à carga, o excesso é desviado para o sistema de armazenamento se for inferior a 100% da capacidade, caso contrário o excedente é injetado diretamente na rede com o objetivo de aumentar o potencial deste. A terceira configuração é mostrada na Figura 8.

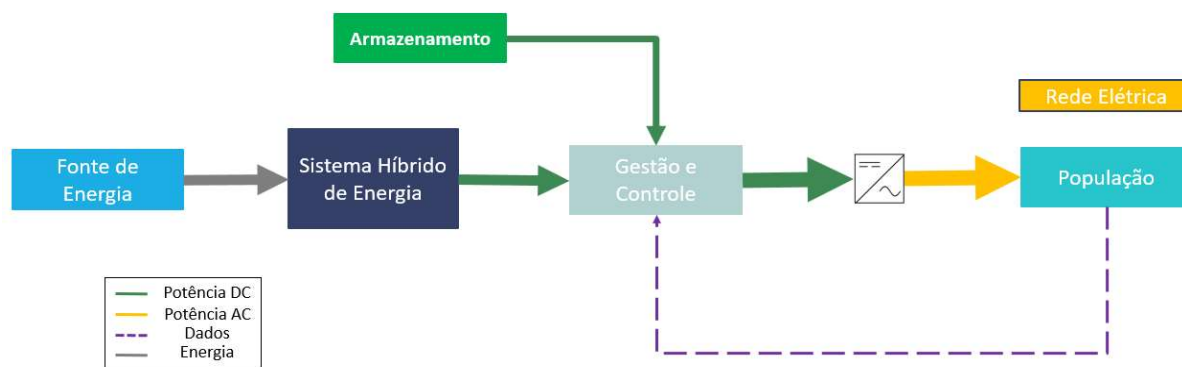


Figura 8. Configuração do uso da energia armazenada

A terceira configuração é usada com menos frequência que as duas anteriores, mas devido ao que foi explicado acima, que é a flutuação da geração de energia, nos casos em que as duas fontes não conseguem produzir energia suficiente para satisfazer a demanda, a energia armazenada nas baterias é usada para suprir essa falta. A quarta configuração é mostrada na Figura 9.

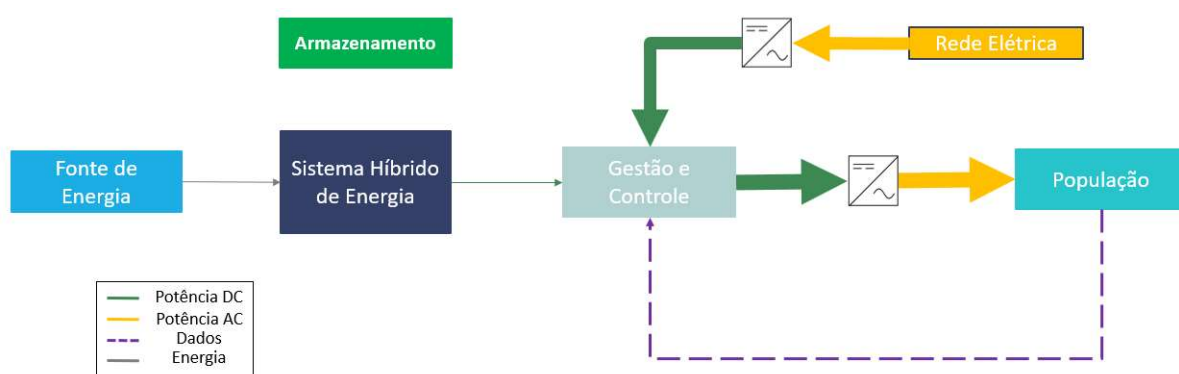


Figura 9. Configuração uso do Backup parcial ou total da arquitetura proposta

A última configuração, é necessária devido à demanda constante e à escala do sistema a ser projetado, é usada em caso de falha, corte, variabilidade climática ou descarga completa do

sistema de backup que produz a escassez total ou parcial de energia para a demanda, onde a energia proveniente da rede atua como backup de todo o sistema, como mostrado na Figura 9. Além disso, a geração de energia convencional em paralelo é usada para carregar o sistema de bateria para, conseqüentemente, usá-lo em vez do sistema de rede sempre que a carga seja superior a 80%.

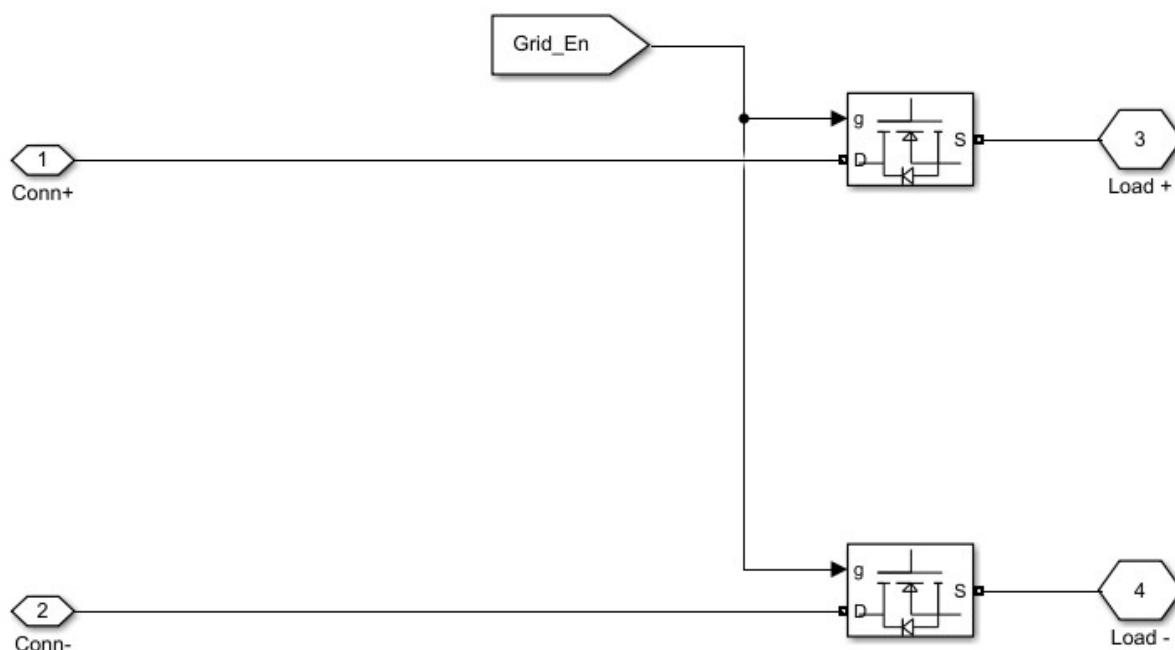


Figura 10. Sistema de Comutação para Baterias e as Fontes de Geração

Como foi mostrado em todas as configurações, tanto a energia produzida como o acoplamento e gestão de todas as fontes de geração, incluindo backup, é feita em corrente contínua e somente no momento de fornecer energia à cidade é que a inversão de tensão é realizado num esquema DC-DC-AC. Isto é feito com no propósito de reduzir o número de sistemas necessários para simular esta arquitetura e, portanto, a complexidade do sistema, garantindo ao mesmo tempo a potência demandada, evitando harmônicos, correntes transitórias e controlando, se necessário, tanto a queda de tensão como os picos de tensão através do sistema de armazenamento e do sistema de injeção na rede. Portanto, estes dois sistemas têm um esquema de comutação baseado em interruptores, bem como as principais fontes de geração (solar e eólica), a fim de controlar sua interconexão através do paralelismo e sincronizá-los mais facilmente em DC, precisando apenas de igualar a tensão da linha no momento da conexão, este sistema é mostrado na Figura 10.

3.2. Metodologia de Implementação

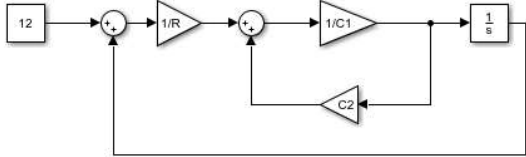
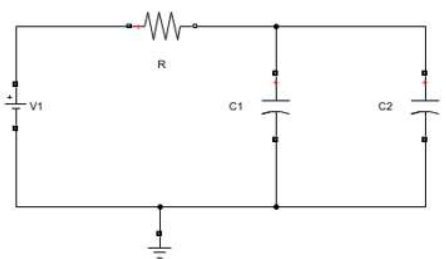
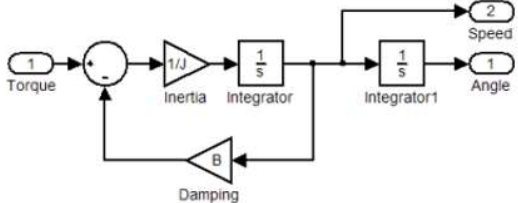
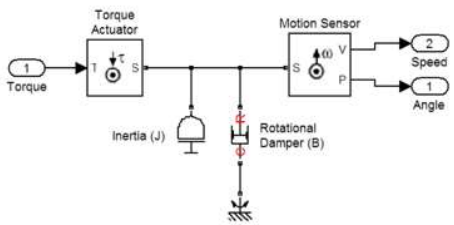
Para o desenvolvimento do trabalho é necessário utilizar um ambiente de simulação que possa trabalhar com componentes elétricos, eletrônicos ao mesmo tempo que possa implementar lógica de programação e modelagem matemático, devido à complexidade de simulação em conjunto dos sistemas de geração e gerenciamento. Em razão disso, o software de simulação selecionado é Matlab®, que tem diferentes complementos os quais ajudam na elaboração da proposta.

A primeira ferramenta é o Simulink®, que constitui uma parte principal para a simulação dos modelos matemáticos dos sistemas de geração e armazenamento, com no propósito de obter o comportamento dos sistemas e relacionando as variáveis climáticas específicas (vento e sol) com na energia produzida ou armazenada em cada caso, também para utilizar os dados obtidos de cada sistema e por meio dos blocos de programação de Matlab fazer a troca de informação entre os diferentes sistemas e com *Simscape*® e/ou *Stateflow*®.

O *Simscape* é um conjunto de bibliotecas e ferramentas criadas com o propósito de modelar sistemas físicos no ambiente Simulink, que, ao contrário do sistema tradicional de blocos, tem a capacidade de simular sistemas reais e mais complexos usando menos recursos de máquina.

Simulink utiliza a representação de operações matemáticas através de blocos onde, conforme o modelo é mais detalhado, sua implementação precisa de mais blocos e, portanto, de mais tempo de simulação, além disso, a interação desses blocos com outros, como os que simulam componentes elétricos ou mecânicos, é limitada, gerando restrições na simulação de todos os elementos em conjunto. Em contrapartida, *Simscape* oferece a possibilidade de construir modelos de componentes físicos baseados em conexões físicas que se integram diretamente com diagramas de blocos e outras ferramentas de modelagem, ao mesmo tempo que proporciona componentes de maior complexidade otimizados para uso em simulação, simplificando a representação dos sistemas e a possibilidade de simular sistemas físicos com maior grau de complexidade. A Tabela 1 mostra a comparação entre estes dois métodos.

Tabela 1. Comparação Simulink com Simscape

Simulink - Representação de Blocos	Simscape
 Representação de Circuito RCC	
 Representação de um Sistema Mecânico	

Como pode ser visto na Tabela 1, há uma diferença no background e estrutura entre as duas representações, onde no primeiro (Representação de Blocos) é vista uma sequência fechada, onde cada um dos elementos do sistema precisa de blocos adicionais como operadores matemáticos ou blocos de soma para poderem interagir uns com os outros.

Para definição do sistema, é necessária uma modelagem matemática prévia, que de acordo com a complexidade do sistema pode ser uma limitação, enquanto para o Simscape o esquema é mais compacto devido que se tem uma forma de integração mais direta e otimizada, diminuindo carga e complexidade no ambiente de simulação.

Além do exposto acima, Simscape tem ferramentas específicas para cada tipo de sistema, seja ele mecânico, térmico, hidráulico, eletrônico ou elétrico, conforme mostrado na Figura 11.

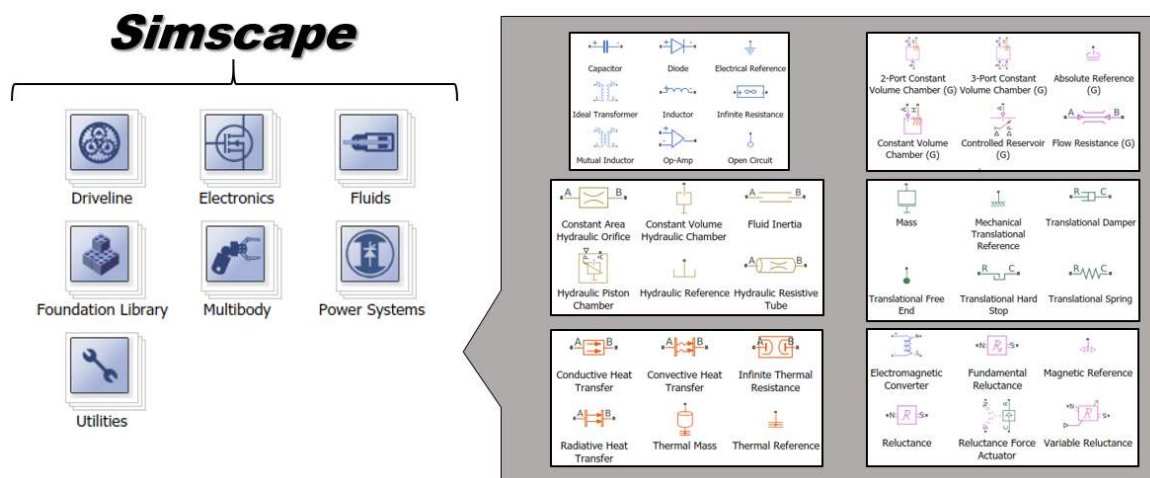


Figura 11. Definição das ferramentas do Simscape

O Simscape Power System foi selecionado com o objetivo de desenvolver a arquitetura proposta, a qual é necessária para a simulação elétrica do sistema, que por meio de seus componentes é possível obter o fluxo de energia elétrica da arquitetura proposta e de cada sistema individual, ao mesmo tempo que a tensão elétrica e a corrente. Adicionalmente tem diferentes itens para o controle de comutação e ao contrário de *Simscape Electrical*, tem mais facilidade para a troca de informação entre Simscape e os blocos de *Simulink*®.

A última ferramenta é Stateflow o qual é um ambiente gráfico para modelagem e simulação de lógica de decisão tanto do tipo combinatória quanto sequencial, que é baseado na operação de máquinas de estados e fluxogramas, o que permite a representação da operação de sistemas complexos por estados, alcançando uma melhor compreensão destes. O acima é descrito em (MathWorks, 2018).

O Stateflow tem elementos diferentes para sua operação, como estados, que descrevem um modo de um sistema controlado por eventos, no caso das transições, quanto condicionais como padrão unem os objetos mencionados nesta seção, os eventos, que são responsáveis por endereçar o esquema de acordo com a configuração feita, os dados, responsáveis por salvar os valores numéricos para referência no diagrama, as ações, que fazem parte da execução do esquema e as conexões de união, as quais têm um papel para simplificar a elaboração do diagrama, conforme mostrado na Figura 12.

4. IMPLEMENTAÇÃO

Neste capítulo são apresentadas as etapas de desenvolvimento da arquitetura de controle de um sistema híbrido de armazenamento e distribuição de energia detalhado no capítulo anterior desta Dissertação, envolvendo as fases de dimensionamento e projeto, e captação das fontes de alternativas de geração de energia e seu armazenamento; levando ainda em consideração as etapas de transformação de energia, regulação de potência, interação entre os sistemas, o algoritmo de distribuição da energia e fluxo de potência associado. Também será descrito um estudo de caso, cujo principal objetivo é a geração de curvas de radiação solar, vento e demanda requerida para uma determinada população escolhida; sendo finalizado com a apresentação de modelos propostos para validação do trabalho.

4.1. Estudo de Caso

Para desenvolver o trabalho proposto, foi selecionada uma cidade com as seguintes características:

- Ventos constantes ao longo do ano apresentando uma velocidade superior a 6 m/s
- Incidência de luz solar durante os 365 dias do ano
- Geração de energia elétrica através de fontes fósseis
- Elevado custo de geração de energia em comparação com outras cidades de mesmo porte.

Atendendo essas características foi escolhida a cidade costeira de Barranquilla, Colômbia, que está localizada no vértice nordeste do Departamento do Atlântico, na costa ocidental do rio Magdalena, a 7,5 km de sua foz no mar Caraíbas, que apresenta uma extensão geográfica de 154 km² equivalente a 4,5% da superfície do Departamento do Atlântico (Alcaldia de Barranquilla, 2019; Instituto Geografico Agustin Codazzi, 2019).

A cidade está localizada na linha do Equador, se beneficiando do recebimento dos ventos alísios durante praticamente todo o ano, com o seu ponto máximo no primeiro trimestre do ano e seu ponto mínimo no penúltimo trimestre do outono (CIOH, 2010).

De acordo com os dados registrados nesta área a 10, 50, 80 e 100 metros acima da superfície (IDEAM, Ruiz Murcia, Serna Cuenca, & Al., 2015), com velocidades médias de 8 m/s, 12 m/s, 14 m/s e maior que 15 m/s, respectivamente, com uma rugosidade de superfície entre 0.18 m e 0.21 m. Além disso, foram feitos mapas do potencial de energia eólica em toda Colômbia, com dados na cidade de Barranquilla de 1800 w / m², com uma densidade do ar entre 1.15 e 1.2 kg/m³. A partir da utilização destes dados, a representação das velocidades mais frequentes nesta cidade é obtida a partir da distribuição de probabilidade de Weibull apresentada na Figura 13.

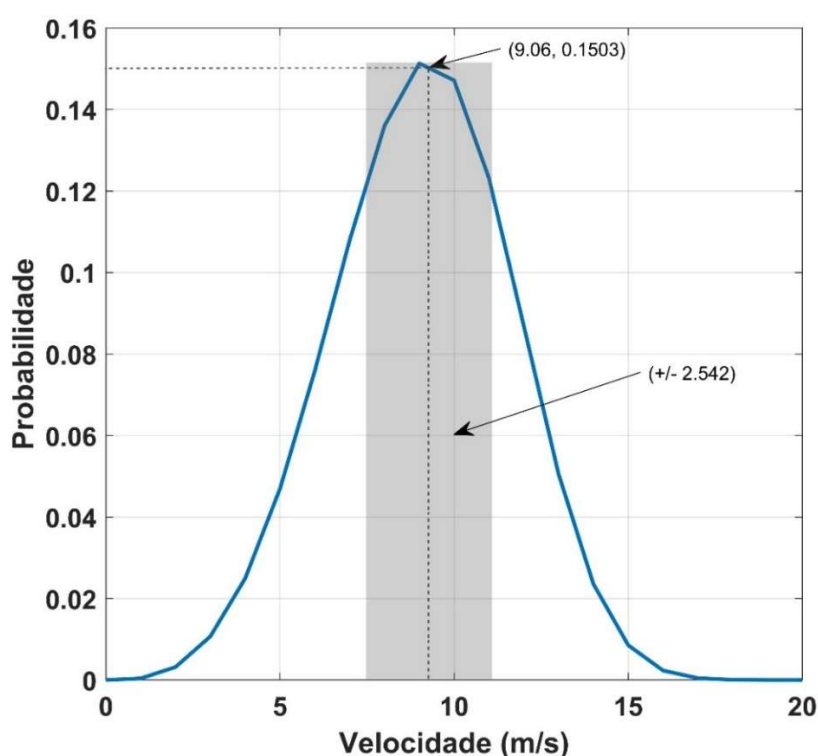


Figura 13. Distribuição de Weibull para a Velocidade do vento em Barranquilla

A partir desta distribuição de velocidades, observamos a ocorrência da velocidade média de 9.06 m/s para a probabilidade de 15%, apresentando uma variação de ± 2.542 , consequentemente, para a simulação da arquitetura proposta neste trabalho, é necessário obter os dados da velocidade média do vento por hora na cidade de Barranquilla, com base nos dados armazenados em (Diebel James; Norda Jacob; Kretchmer Orna;, 2019; NASA; Pawson Steven;, 2019), os quais foram tomados a uma altura 10 metros, e para serem utilizados no projeto do sistema de geração eólica, foi necessário extrapolar os dados obtidos, levando em consideração a rugosidade da superfície e aplicando a seguinte equação.

A partir da Figura 13, é mostrada que para uma velocidade média de 9,06 m / s com uma ocorrência de 15% e uma variação de:

$$V(h) = V_o * \left(\frac{h}{h_o}\right)^\alpha \quad (4.1)$$

Onde

$V(h)$ é a velocidade do vento a ser estimada na altura h do solo

h_o , que é a altura de referência

V_o é a velocidade do vento conhecida a uma altura h_o

α é o fator que depende da aspereza do solo

Uma vez que os dados são obtidos, a curva de velocidade do vento por hora é mostrada na Figura 14.

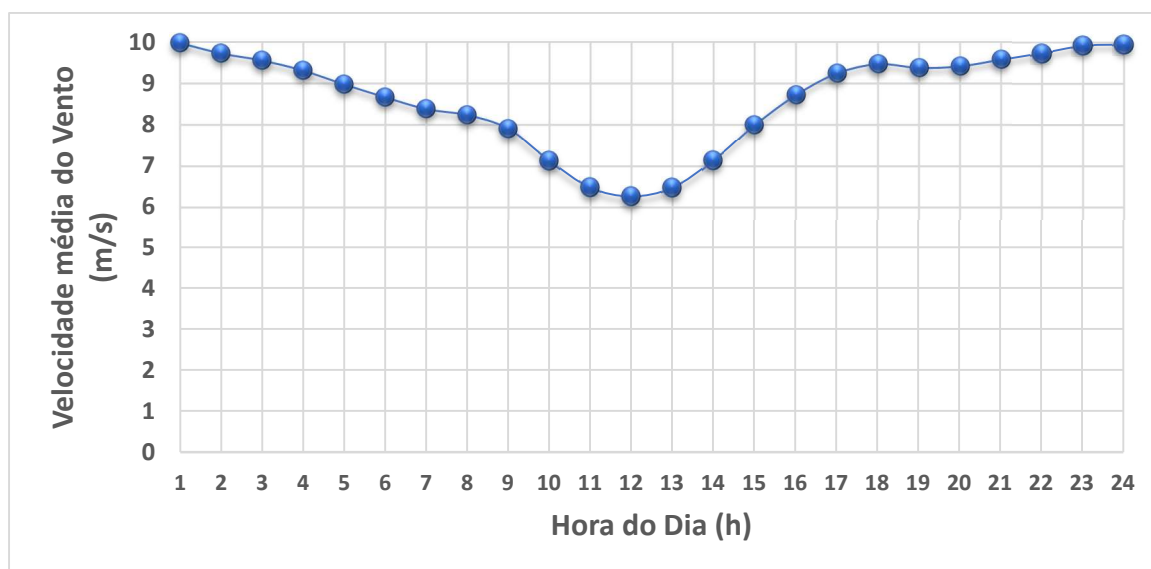


Figura 14. Curva média de velocidade do vento por dia

Para dimensionar um sistema de geração de energia solar, na cidade de Barranquilla os dados necessários são registrados em (IDEAM; Simbaqueva Ovidio, Ayala Leonardo, 2015), mostrando uma radiação global máxima por dia de 6800 Wh/m², uma mínima de 5300 Wh/m² e uma média de 5980 Wh/m² onde são registradas 7.1 horas de pico de sol por dia. Neste caso, os mapas obtidos possuem informações detalhadas dos últimos 20 anos da radiação diária, mensal e anual, que foi contrastada com a apresentada em (Diebel James; Norda Jacob; Kretchmer Orna;, 2019), com o qual a curva de radiação média da cidade foi obtida como mostra a Figura 15.



Figura 15. Curva de Radiação Solar média durante o dia (24h)

A partir da caracterização das condições climáticas necessárias para implementar os sistemas de geração de energia renovável, o próximo passo é caracterizar a curva de demanda de energia elétrica para projetar os sistemas descritos anteriormente (UPME; Ramírez Carrero, 2017) registrou-se um consumo anual de 6018 GWh e diário de 16.716 GWh, um valor que excede 16 vezes a maior usina solar e eólica do mundo, as quais tem 1.5 GWh cada uma conforme registrado em (REN21, 2018), que somente a fazenda solar tem uma área de 1200 km², portanto, devido às limitações do terreno em que a cidade está localizada, a geração conjunta dos sistemas é limitada a 350 MWh e destinada a uso residencial.

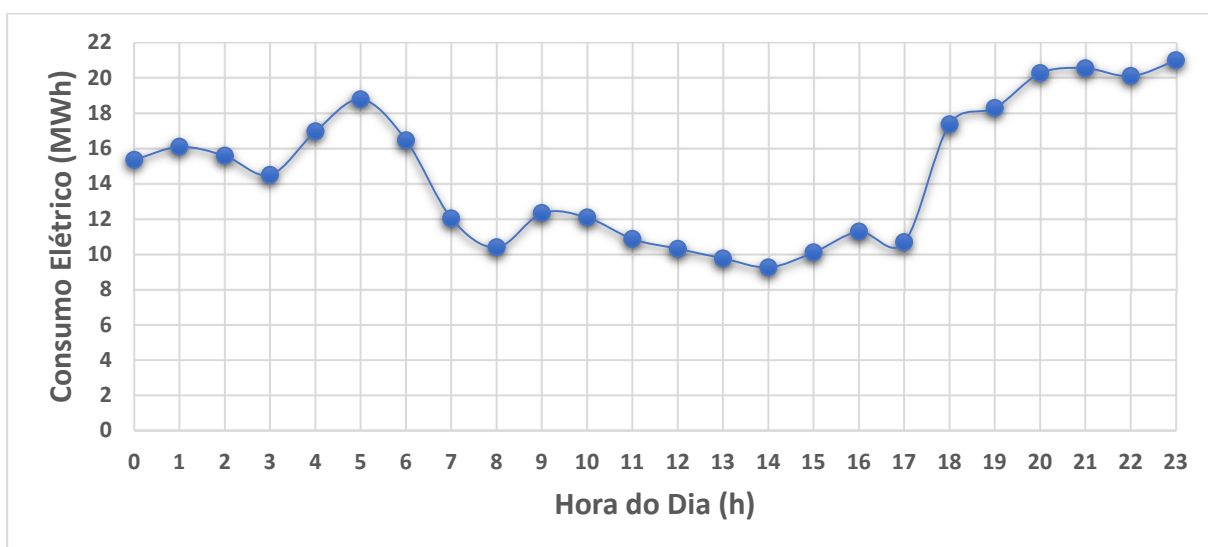


Figura 16. Curva de Consumo Elétrico

Com a capacidade de geração definida em 350 MWh e uma tensão de linha de 11.200V para todos os sistemas, são tomados como referência os dados obtidos do consumo residencial mostrado em (Estrada Ocampo, Medrano Ahumada, & Quintero González, 2018), gerando a curva de demanda apresentada na Figura 16.

4.2. Sistema Fotovoltaico

Atualmente, os sistemas fotovoltaicos funcionam de duas maneiras: a primeira é como um sistema de geração isolado, onde a energia coletada é armazenada em banco de baterias para ser disponibilizado a qualquer momento através de um controlador de carga/descarga, produzindo energia a qualquer hora do dia. O segundo método é através da injeção direta na rede, onde uma vez que a energia solar é gerada, ela é usada para ser introduzida na rede, seja para aumentar a energia produzida combinada com os métodos tradicionais, ou como parte de um conjunto de sistemas de energia renovável (Ugena, 2014).

Neste trabalho a arquitetura proposta, é uma combinação destes sistemas apresentados anteriormente, onde a energia da fonte combinada com um sistema eólico é usada diretamente tendo ao mesmo tempo dois sistemas de backup, um banco de baterias e outro através de fontes convencionais de energia. A arquitetura do sistema de energia solar proposto neste trabalho é apresentada na Figura 17.

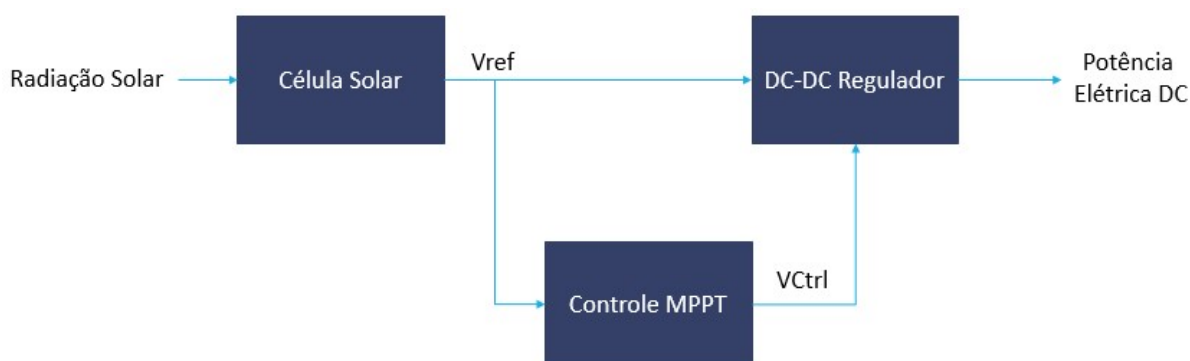


Figura 17. Representação esquemática do Sistema Fotovoltaico

4.2.1. Célula Solar

Considerando como entrada do sistema a curva apresentada na Figura 15, o conjunto de células fotovoltaicas constituem o elemento de conversão de fótons em energia elétrica, e são representado pelo seu modelo matemático através da seguinte equação:

$$I = I_{ph} - I_d \quad (4.2)$$

onde

I é a corrente da célula,

I_{ph} é a corrente gerada pela luz incidente a qual é proporcional à radiação solar, e

I_d que é a corrente do diodo semicondutor

A corrente da célula pode ser modelada como uma fonte de corrente, que em condições reais é afetada por uma resistência intrínseca denominada R_s e uma resistência de curto-circuito R_p , modificando o modelo como é mostrado através da equação:

$$I = I_{ph} - I_d - I_{Rp} \quad (4.3)$$

onde

I_{Rp} é a corrente da célula, corrente parasita causada pela resistência de curto-circuito R_p

Através da equação 4.2, notamos que R_s afeta diretamente o valor atual do diodo I_d , como mostrado através da equação:

$$I_d = I_o \left[e^{\left(\frac{V + IR_s}{AN_s V_T} \right)} - 1 \right] \quad (4.4)$$

onde

I_o é definido como a corrente de fuga,

V é a tensão do diodo,

A é o fator de idealidade que depende da tecnologia de fabricação da célula,

N_s é o número de células conectadas em série e

V_T é a tensão térmica que é descrito através da equação:

$$V_T = \frac{KT_c}{q} \quad (4.5)$$

onde

$K = 1.380 \times 10^{-23}$ J/K é a constante de Boltzman,

T_c é a temperatura atual calculada em Kelvin e

$q = 1.602 \times 10^{-19}$ C é a constante de carga de um elétron.

Considerando as equações 4.4 e 4.5, e substituindo-as em 4.3, o modelo generalizado da célula fotovoltaica é definido através da equação 4.6, onde os valores de R_s e R_p são calculados pelo método descrito em (Bellia, Youcef, & Fatima, 2014). As equações 4.7 e 4.8, obtidas através da equação 4.6 são utilizadas para cálculo dos valores I_{ph} e I_o

$$I = I_{ph} - I_o \left[e^{\left(\frac{V + IR_s}{AN_s V_T} \right)} - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (4.6)$$

$$I_{ph} = \frac{(I_{ph,ref} + \mu \Delta T) * G}{G_n} \quad (4.7)$$

$$I_o = I_{sc,ref} \left(\frac{T_c}{T_{c,ref}} \right)^3 e^{\left(\frac{-V_{oc,ref}}{AN_s V_T} \right)} e^{\left[\left(\frac{qE_g}{AK} \right) \left(\frac{1}{T_{c,ref}} - \frac{1}{T_c} \right) \right]} \quad (4.8)$$

onde

$I_{sc,ref}$ é a corrente de saturação nominal do diodo determinada pelo fabricante

G é a radiação de corrente no local de estudo

$G_n = 1000 \text{ W/m}^2$, é a radiação nominal estabelecida

ΔT é a diferença entre a temperatura atual T_c e a temperatura de referência $T_{c,ref} = 298^\circ \text{ K}$, e

μ é o coeficiente de temperatura atual que é mostrado na folha de dados.

Conforme foi mostrado anteriormente, o sistema de painéis fotovoltaicos foi dimensionado, baseado no painel monocristalino TSH-S510 com uma capacidade de geração pico de 510 Watts como indicado em (TopSun, 2018).

A energia necessária para ser gerada por fontes renovável, é dimensionada uma capacidade de geração de 210 MWh/dia, portanto, para calcular o número exato de painéis solares, é necessário quantificar a quantidade mínima de energia a ser produzida, que será calculada através da equação:

$$E_{need} = \frac{E_{avg} * F_{Sec}}{\eta_{batt} * \eta_{inv}} = \frac{210MWh * 1,2}{0,85 * 0,9} = 329411764.705 Wh \quad (4.9)$$

onde

E_{avg} é o consumo médio de energia,

F_{Sec} o fator de segurança para garantir pelo menos a quantidade de energia projetada,

η_{batt} é a eficiência da célula de baterias

η_{inv} é a eficiência do inversor

O cálculo da eficiência do sistema de bateria é apresentado em (Díaz-González, Sumper, Gomis-Bellmunt, & Villafáfila-Robles, 2012; Likit-Anurak, Uthaichana, Punyawudho, & Khunatorn, 2017) e a eficiência do investidor em (Scarabelot, Rambo, & Rampinelli, 2018). O número de painéis e sua configuração é determinada através da equação:

$$N_{Total} = \frac{E_{need}}{P_{MPP} * HPS_{crit} * PR} = \frac{329411.765Wh}{510 * 7,1 * 0,9} = 101081 \text{ Painéis} \quad (a)$$

$$N_{series} = \frac{V_{line} * L}{V_{OC}} = \frac{11200V * 1.06}{66.31V} = 179.03 \cong 180 \text{ Painéis} \quad (b) \quad (4.10)$$

$$N_{parallel} = \frac{N_{Total}}{N_{serie}} = \frac{101081}{180} = 561.56 \cong 562 \text{ Painéis} \quad (c)$$

onde

P_{MPP} é a potência máxima por célula do modelo selecionado

HPS_{crit} são os horários de pico do sol (detalhamento na seção 4.1)

PR é o fator de desempenho global considerando as perdas de transmissão e conversão de energia

V_{line} é a tensão de linha definida para o sistema

L são as perdas ao longo da transmissão de potência para garantir a tensão de linha definida e

V_{OC} é a tensão em circuito aberto

Através deste procedimento foi obtido um conjunto de 180 painéis em série por 562 painéis em paralelo, totalizando 101160 painéis solares de 510 Wp. A representação esquemática para implementação no Simulink® é apresentado na Figura 18.

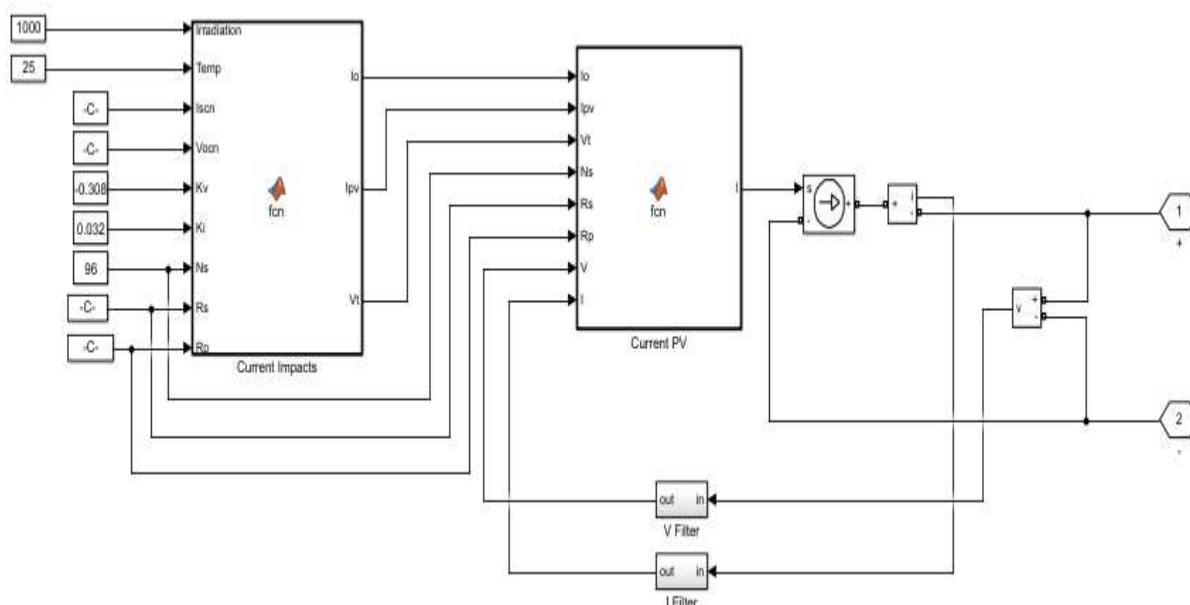


Figura 18. Modelo proposto de um painel fotovoltaico

4.2.2. Regulador de Potência

Uma vez gerada a energia elétrica, onde a fonte a luz solar é captada através de células solares baseadas em semicondutores, sua produção de energia não é constante, podendo ocorrer assim, conforme foi mostrado anteriormente (**Figura 15**) períodos de sobrecargas e possíveis interrupções de fornecimento de energia, associado tanto ao comportamento físico da célula como também pela radiação de energia solar. Consequentemente, isto acarretará num problema de abastecimento de uma cidade, devido das possíveis variações da tensão da linha, degradando assim a qualidade da energia produzida, implicando que é necessário utilizar diferentes mecanismos para resolver estes problemas, tais como os algoritmos de controle MPPT (*Maximum Power Point Tracking*, ou rastreador de ponto de potência máxima) e os conversores *buck*, *boost* e *buck-boost*.

Os algoritmos de controle MPPT têm a função principal de obter e manter a energia máxima possível da curva de operação da célula em todos os momentos, o que normalmente varia de acordo com a carga e a radiação incidente. Existem diferentes tipos de algoritmos de controle MPPT, que podem ser implementados utilizando lógica booleana até inteligência artificial. Em nosso estudo foi implementado o algoritmo *Perturb & Observe*, que consiste em

criar um distúrbio na entrada de tensão e observar a saída de tensão adaptando a saída de tensão conforme necessário, como pode ser visto em detalhes em (Kanagachidambaresan, Anand, & Kalam, 2017). O fluxograma correspondente a este algoritmo é mostrado na **Figura 19**.

No esquema projetado no Simulink®, o algoritmo é programado usando a ferramenta *Matlab Function*, com os seguintes parâmetros iniciais:

- Ciclo de trabalho inicial (D_{init}) = 0.76
- Limite máximo de ciclo de trabalho (D_{max}) = 0.9
- Limite mínimo de ciclo de trabalho (D_{min}) = 0.1
- Aumento / diminuição de delta do ciclo de trabalho (ΔD) = 20e-6

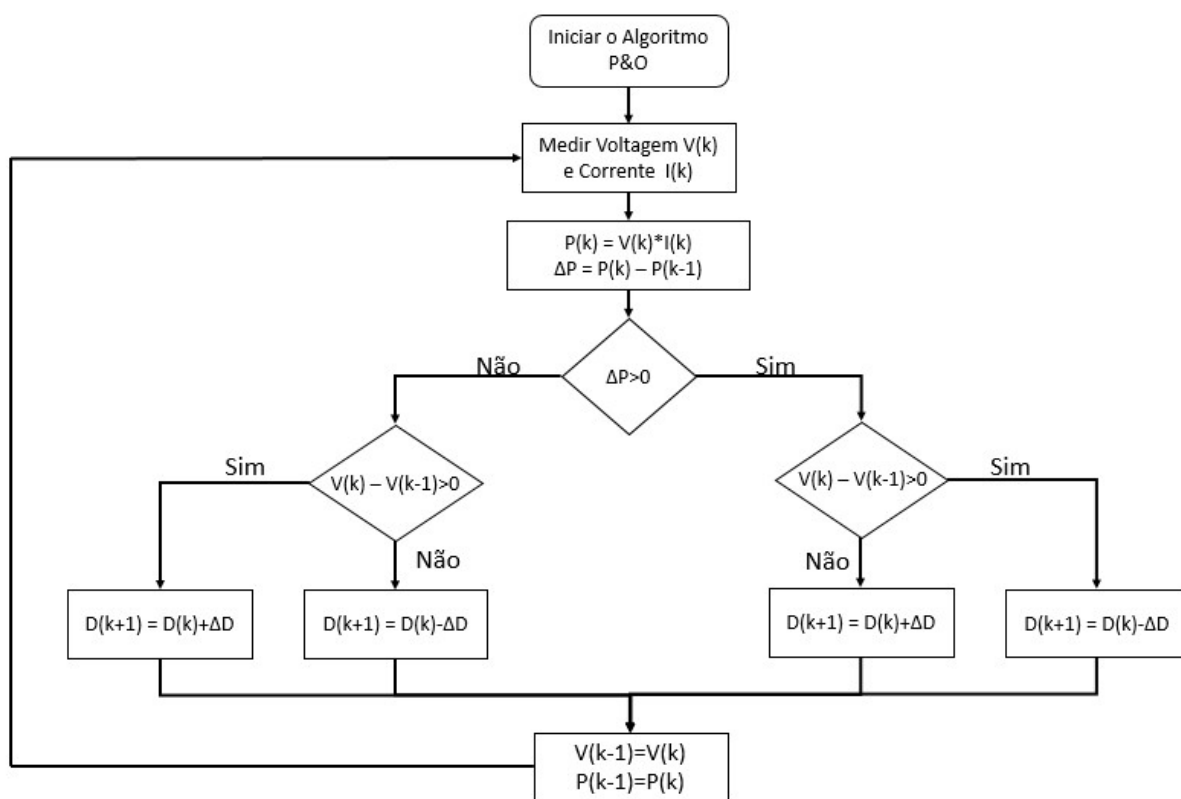


Figura 19. Algoritmo Perturb & Observe

Como complemento ao algoritmo MPPT, é adicionado o estágio de regulação de potência, onde através de um conversor tipo *boost*, a tensão de saída da matriz de células solares é aumentada, e por meio da variação do ciclo de trabalho do algoritmo a saída será regulado para a tensão de linha definida. Com este objetivo, os valores dos elementos do conversor são calculados como é mostrado a seguir:

1. O primeiro passo é obter o ciclo de trabalho inicial, que deve ser menor ou igual ao ciclo de trabalho definido no algoritmo, para o qual a seguinte equação é aplicada.

$$D = 1 - \frac{V_{min}}{V_o} = 1 - \frac{3000}{11200} = 0.732 \quad (4.11)$$

Onde:

V_{min} é a tensão mínima a partir da qual a tensão de linha V_o será obtida como saída do conversor

D é o ciclo de trabalho inicial que atende ao requisito de ser menor que o definido no algoritmo MPPT.

2. Uma vez que o ciclo de trabalho é obtido, o valor da bobina é calculado aplicando a seguinte equação:

$$L \geq \frac{V_{min} * D(1 - D)}{\Delta I_L * f} = \frac{3000 * 0.732(1 - 0.732)}{105.094 * 25kHz} = 2.2e^{-6}H \quad (4.12)$$

A partir desta equação é definido que o valor da bobina pode ser maior ou igual a $2.2e^{-6}H$ (dependendo do critério de projeto), onde ΔI_L é a variação máxima atual, definida em 2% da corrente máxima produzida pela matriz de células.

3. Como última etapa, aplica-se a seguinte equação para obter o valor do capacitor do conversor *boost*:

$$C \geq \frac{V_{min} * 0.732(1 - 0.732)}{8Lf^2\Delta V_C} = \frac{3000 * 0.732(1 - 0.732)}{8 * 2.2e^{-6} * (25kHz)^2 * 336} = 159\mu f \quad (4.13)$$

Como na equação anterior, o valor do capacitor pode ser maior ou igual a $159\mu f$, portanto foi escolhido um de $45mf$, o ΔV_C é a variação máxima de tensão, definida em 3% da tensão de saída V_o . O design do conversor é mostrado na **Figura 20**.

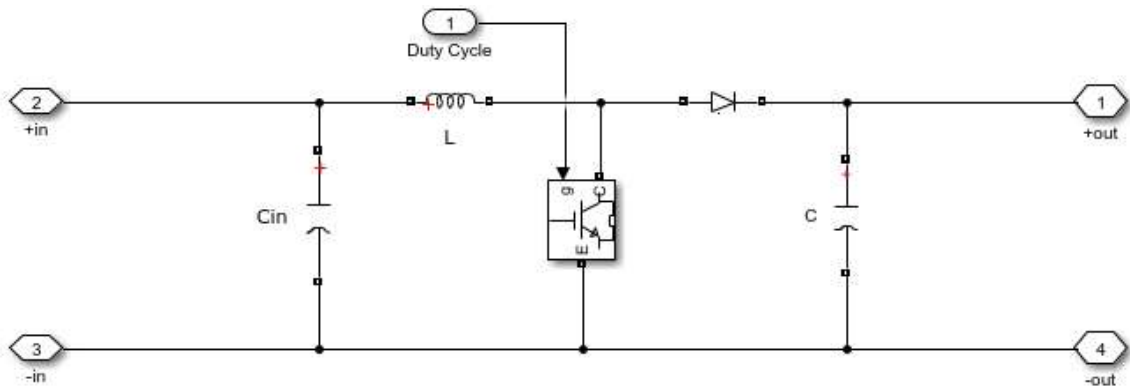


Figura 20. Conversor Boost

Uma vez implementado o sistema solar apresentado anteriormente (Figura 18), evidenciou-se a necessidade de utilizar um tempo de amostragem abaixo do valor de $1\ \mu\text{s}$ para uma operação adequada deste, aumentando assim o tempo de simulação e os requisitos de processamento e portanto, hardware mais robusto, que acarretou em limitações no modelo proposto, considerando que ainda são necessários no ambiente de simulação dois sistemas (Eólico e Baterias) com características semelhantes.

Consequentemente, para gerar um ambiente de simulação acessível que atenda aos objetivos propostos, foi utilizado o bloco *PV Array* da biblioteca *Simscape®* do grupo de *Specialized Technology*, que é um bloco otimizado, que utiliza diferentes ferramentas do Simulink®, para sua implementação em ambientes de simulação mais complexos. Consequentemente, a arquitetura final do sistema de geração solar é apresentada na Figura 21.

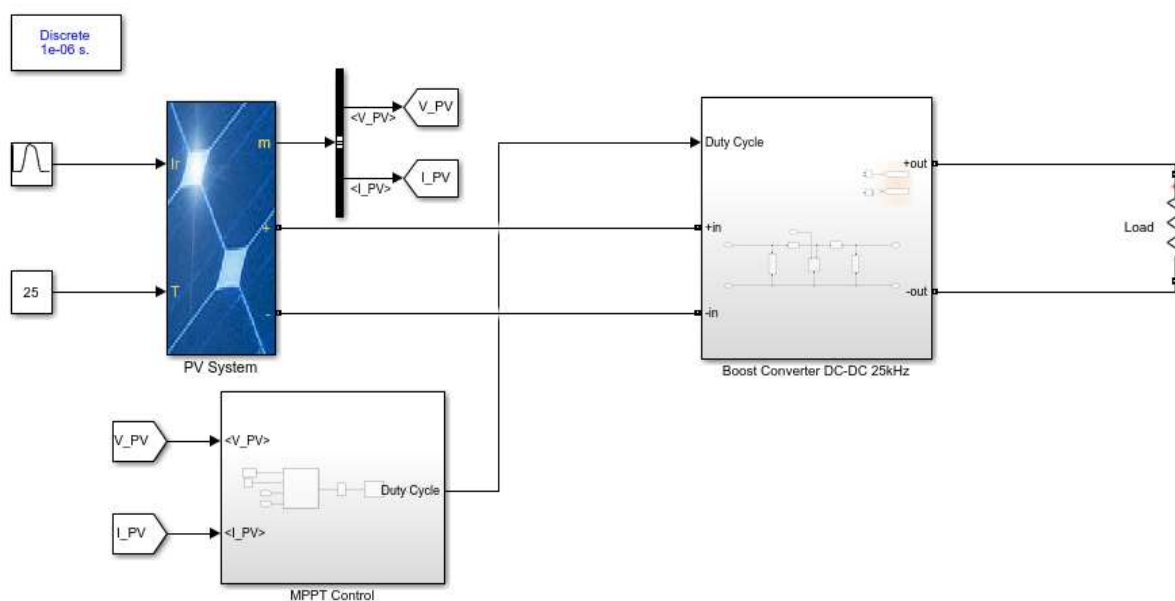


Figura 21. Sistema fotovoltaico de Geração Elétrica.

4.3. Sistema Eólico

Normalmente, os sistemas eólicos são implementados de duas maneiras distintas, a primeira, nos chamados parques eólicos *offshore*, onde a energia do vento em mar aberto é utilizada, onde já existe tecnologia apropriada para que a instalação dessas fazendas tenha o

alcance de até 50 metros. Para um alcance superior a 50m e inferior a 120 m, existem desenvolvimentos em estudos realizados por (Adedipe, Abolarin, & Mamman, 2018; Arshad & O’Kelly, 2013), onde são mostrados os diferentes vantagens desta tecnologia, como a geração de energia duas vezes superior em comparação com a mesma torre eólica em terra, entretanto estes sistemas apresentam algumas desvantagens, tais como o seu alto custo de instalação devido à inovação tecnológica e infraestrutura necessária para a sua implementação.

Entretanto, a tecnologia mais utilizada atualmente são as fazendas do tipo *onshore*, que é a instalação no solo, (REN21, 2018), tendo em consideração a capacidade de geração para *offshore* é 18.8 GW e 520.2 GW para *onshore*. Portanto, neste estudo o sistema simulado é baseado na instalação *onshore*, e o esquema do sistema eólico é apresentado na Figura 22.

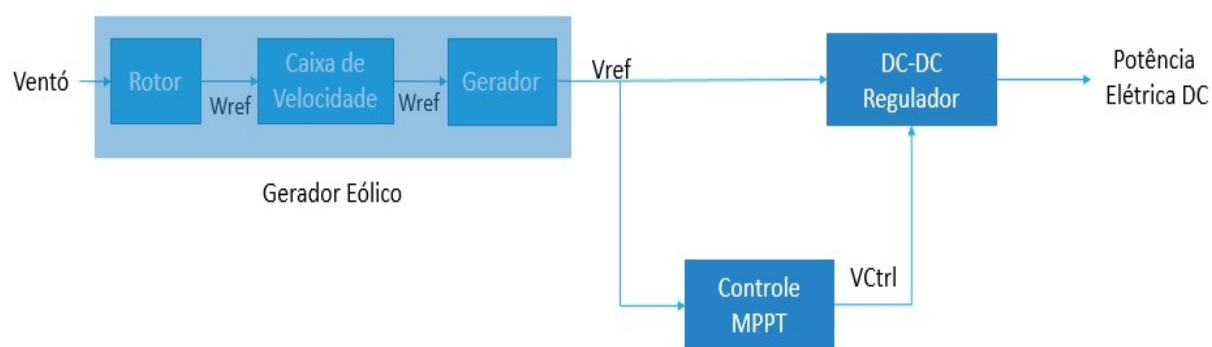


Figura 22. Esquema do Sistema Eólico.

4.3.1. Gerador Eólico

A turbina eólica é responsável pela conversão da energia cinética proveniente do vento em energia elétrica, sendo que para seu desenvolvimento é utilizado o projeto de múltiplas pás, sendo este o mecanismo de maior relevância na eficiência de uma turbina. Posteriormente a energia é transmitida pelo rotor para a caixa de multiplicação de velocidades, responsável pelo aumento de velocidade e diminuição do torque mecânico (conservação da potência do sistema), para finalmente, através de um gerador, transformar a quantidade de energia mecânica disponível em energia elétrica. (Martander, 2002).

Assim, devido a existência de diferentes tecnologias e mecanismos que compõem um gerador eólico e sobretudo seu gerador elétrico, o modelo matemático associado a uma turbina

eólica pode variar para cada fabricante. A Figura 23 mostra uma variedade de tipos de geradores elétricos disponíveis no mercado.

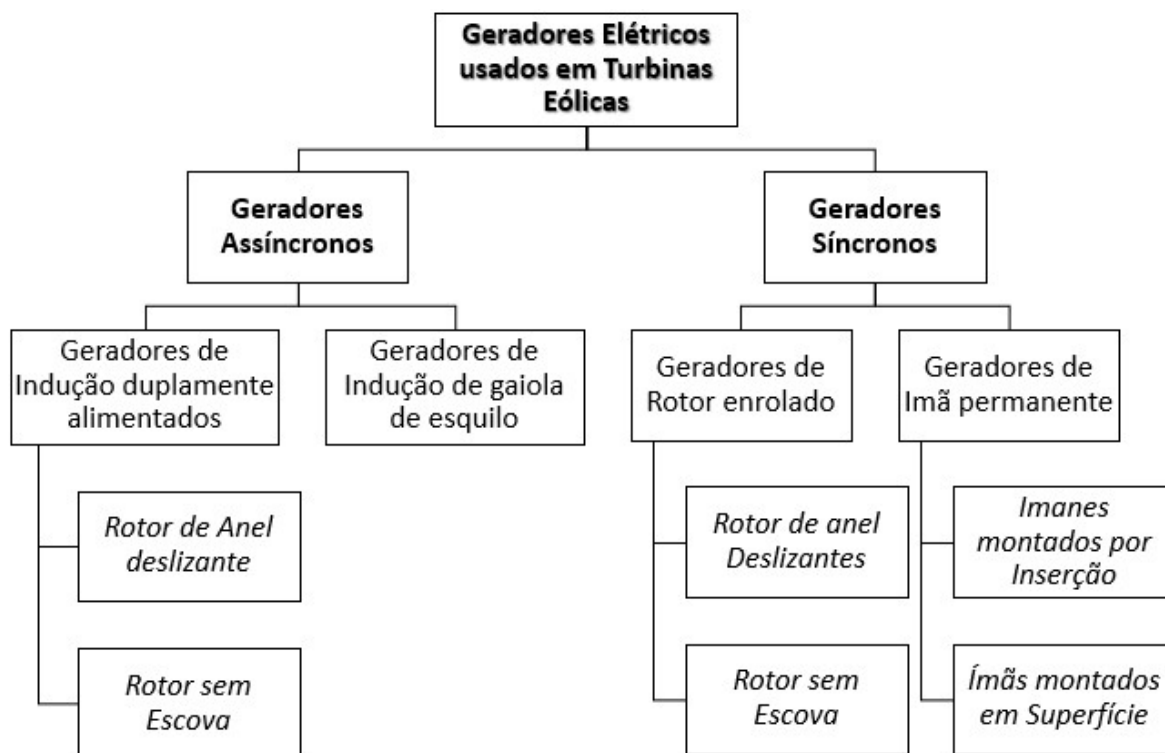


Figura 23. Tipos de Geradores em turbinas eólicas

O desenvolvimento de um simulador que contemple os diferentes tipos de geradores disponíveis no mercado, a turbina foi modelada a partir de suas características físicas e sua relação potência, torque e velocidade angular, sendo utilizada uma equação que descreve o comportamento aerodinâmico de qualquer tipo de turbina disponível no mercado (Sumathi, Ashok Kumar, & Surekha, 2015).

$$P_m = \frac{C_p(\lambda, \beta) * \rho * A * v^3}{2} \quad (4.14)$$

A potência mecânica máxima obtida do vento, conhecida como P_m , depende do coeficiente de desempenho da turbina C_p , que por sua vez depende do ângulo de inclinação da pá β e da relação de velocidade da ponta da asa do rotor com a velocidade do vento λ , dito coeficiente é definido na seguinte equação (Sarkar, Julai, Tong, Chao, & Rahman, 2015).

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5(116 * \frac{1}{\gamma} - 5\beta - 5)e^{-21*\frac{1}{\gamma}} \quad (a) \quad (4.15)$$

$$\frac{1}{\gamma} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{1 + \beta^3} \quad (b)$$

Geralmente, o comportamento do coeficiente de desempenho de uma turbina eólica é inversamente proporcional ao ângulo β , de modo que o máximo coeficiente de desempenho C_p é obtido para um ângulo de inclinação $\beta = 0$, simplificando a equação 4.15a na equação descrita a seguir (Bhayo, Yatim, Khokhar, Aziz, & Idris, 2015):

$$C_p(\lambda) = 0.00044\lambda^3 - 0.012\lambda^3 + 0.097\lambda^2 - 0.2\lambda + 0.11 \quad (a)$$

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \quad (b) \quad (4.16)$$

Consequentemente, a relação entre a velocidade da extremidade da pá do rotor e a velocidade do vento λ dependerá da velocidade angular da turbina ω , do raio do rotor R e da velocidade do vento v . Essa relação poderá ser generalizada para todos os projetos de turbina com três lâminas, para o valor $\beta = 0$.

Além do coeficiente de performance C_p , a potência mecânica depende da densidade do ar ρ , da área da superfície da pá A , e da velocidade do vento v (elevada ao cubo), sendo assim, o parâmetro físico mais relevante, e principal razão da viabilidade desse sistema de geração em termos de energia. Portanto, a relação torque / velocidade angular é dada através da equação:

$$T = \frac{Pm}{\omega} \quad (4.17)$$

Considerando a equação que define a potência mecânica Pm , o torque é definido através da seguinte equação.

$$T = \frac{0.5C_p(\lambda, \beta) * \rho * A * v^3}{\omega} \quad (4.18)$$

Uma vez que a velocidade do vento atua diretamente sobre a turbina, inclinando em um ângulo ϑ ao longo do eixo horizontal devido à ação do enrolamento, isso gera uma mudança na velocidade do vento em relação ao plano do rotor de $v \cos \vartheta$ e isto, por sua vez, é definido através da equação:

$$\vartheta = -0.00017327v^5 + 0.0085008v^4 - 0.12034v^3 + 0.4501v^2 + 1.0592v + 0.38972 \quad (4.19)$$

onde ϑ é o ângulo de enrolamento, modificando a equação 4.18.

Consequentemente, a velocidade angular de uma turbina dada uma velocidade de vento superior a 0 é dada pela equação:

$$\omega = \frac{0.5C_p(\lambda, \beta) * \rho * A * (v \cos \vartheta)^3}{T} \quad (4.20)$$

A velocidade angular é a entrada do gerador, e como foi apresentado anteriormente, dependerá da tecnologia utilizada, de modo que, para projetar um sistema eólico, foi utilizada a seguinte equação descrita em (Santos, Cabrera, & López, 2014):

$$P_T = \frac{E_{need}}{C_p * \eta_{inv} * 8760h} = \frac{51100MWh}{0.45 * 0.9 * 8760h} = 14,403MW \quad (4.21)$$

Para selecionar uma turbina eólica, com capacidade para gerar a potência total do sistema por dia P_T , a energia necessária foi quantificada E_{need} durante o intervalo de em um ano inteiro ($8760h$), considerando que, dos 350MW projetados para cada dia, 210 MW são produzidos pelo sistema solar e 140 MW através do sistema eólico, para o qual foi definido um coeficiente de desempenho de 0.45, onde foi considerado o limite máximo de eficiência definido com o critério de Betz é 0.593, e também foi definida uma eficiência do inversor de 0.9.

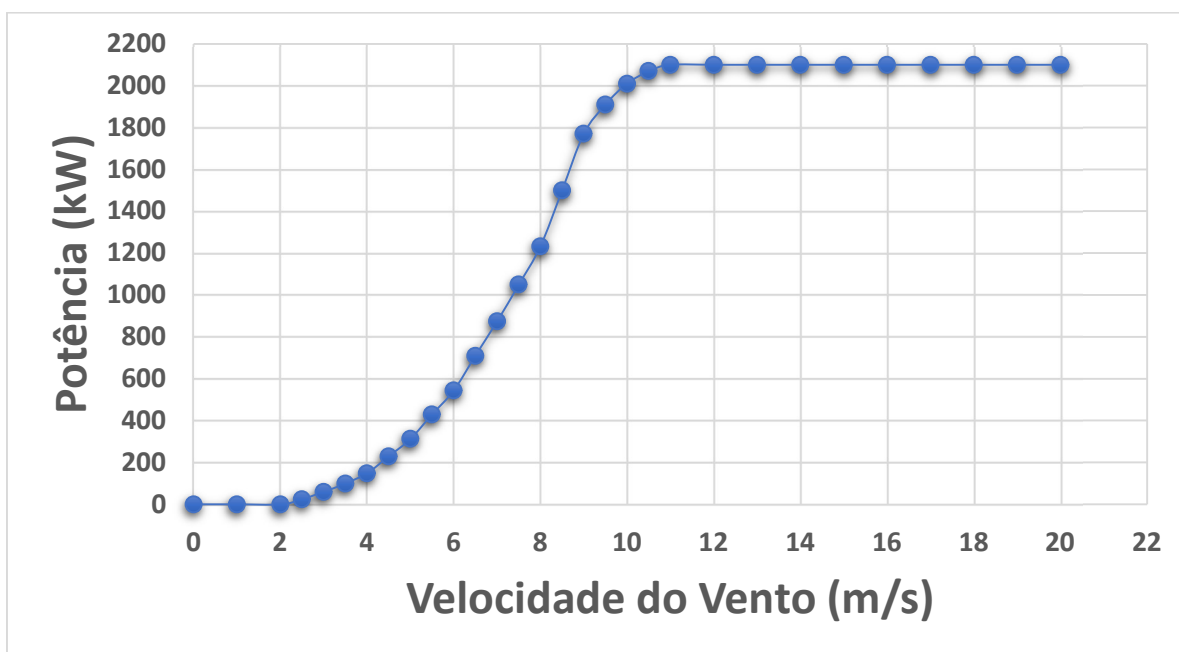


Figura 24. Curva de Potência da turbina AGW 110/2.1

Como resultado, foi obtida uma potência total necessária no valor de 14.403 MW por dia e, de acordo com as informações obtidas nos relatórios apresentados em (REN21, 2018;

Wind Europe, 2019), a turbina com a maior capacidade atualmente é de 8MW. Através da relação preço / capacidade, e conforme informações publicadas em (The Wind Power & PIERROT, 2019), foi escolhido o modelo AGW 110/2.1 (torre de 110 m de altura e com capacidade para gerar 2.1 MW de energia), fabricado pela empresa brasileira WEG. Segundo as informações técnicas dessa turbina (WEG, 2017), a curva apresentada na Figura 24, mostra o comportamento da geração elétrica desta turbina em relação à velocidade incidente.

Através das informações fornecidas pelo fabricante (Figura 24), obtém-se a relação direta da velocidade do vento com a energia gerada a partir da turbina eólica, conforme detalhado em (Araujo, 2015; Dalla Riva, Hethy, & Vitiña, 2017; RODRIGUES JUNIOR & MICHELS RIBEIRO, 2018; Zarza Ríos, 2015). A identificação do modelo característico da turbina é realizado através da regressão polinomial dos dados obtidos através dessa curva (Botero, Isaza C, & Valencia, 2010), expresso através da equação:

$$P_W = 0,007195v^7 - 0,2824v^6 + 4,265v^5 - 31,66v^4 + 122,7v^3 - 214,1v^2 + 129,4v - 1,924 \quad (4.22)$$

O coeficiente de determinação do modelo é dado por $R^2 = 0.9995$. E finalmente, a eficiência da turbina é determinada, no ponto de potência máxima para uma velocidade do vento de 12 m/s, através da seguinte equação:

$$P_{max} = \frac{0.593 * 1.175 \frac{kg}{m^3} * 9503m^2 * (12 \frac{m}{s})^3}{2} = 5.716MW \quad (a) \quad (4.23)$$

$$\eta_{max} = \frac{P_{Wmax}}{P_{max}} = \frac{2,1MW}{5,716MW} * 100\% = 36.73\% \quad (b)$$

Relacionando a potência máxima fornecida pela turbina com o resultado obtido através da equação 4.23a, obtém-se a máxima eficiência possível de conversão η_{max} para a turbina AGW 110/2.1. A representação esquemática realizada em Simulink é mostrada na Figura 25.

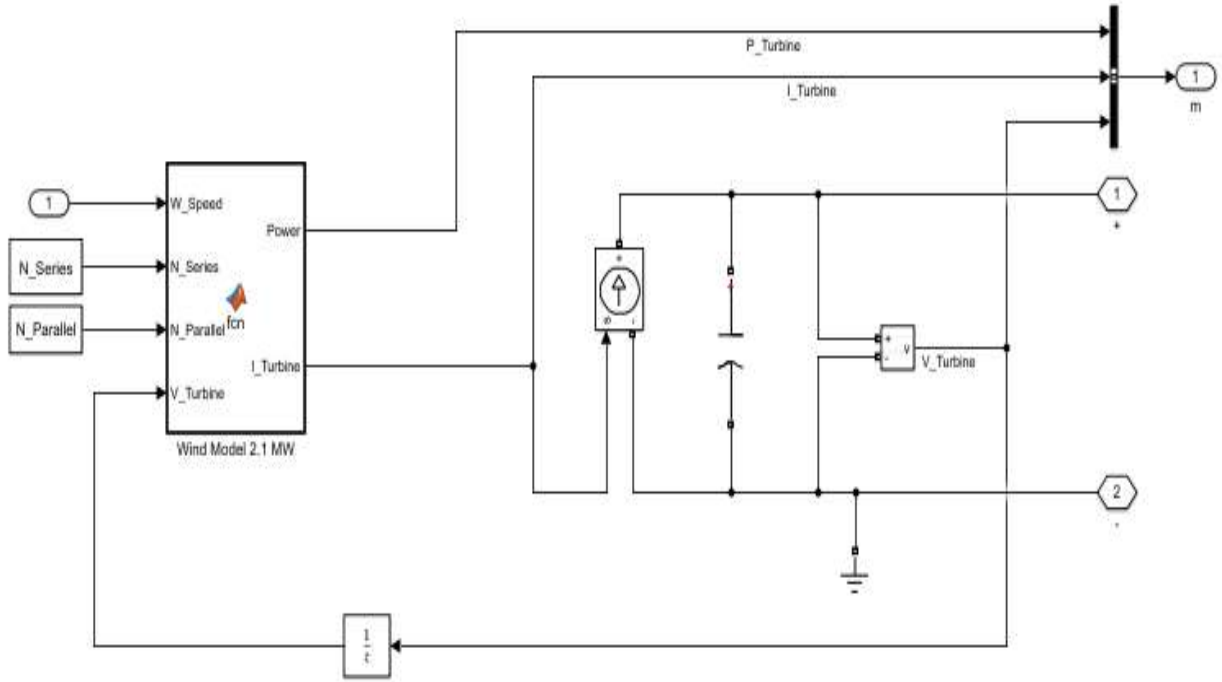


Figura 25. Modelo Turbina Eólico

4.3.2. Regulador de Potência

O sistema eólico, ao contrário de energia solar, funciona como fonte de geração direta de energia, de modo que o estágio de controle de tensão tem como única finalidade a de controlar o ciclo útil do conversor DC - DC, que é o mesmo implementado no sistema solar. Consequentemente, o ciclo de trabalho útil do conversor DC - DC será representado através da equação:

$$D = 1 - \left(K_p + K_i * \frac{T_s z}{z - 1} \right) (V_{Vref} - V_V) \quad (4.24)$$

D é um valor entre 0 e 1 obtido com uma taxa de amostragem de 25 kHz, com a arquitetura de controle PI no domínio de tempo discreto, com as constantes de ganho: proporcional ($K_p = 1$), integral ($K_i = 1$) e tendo dois componentes que é o limite superior da ação de controle integral ($Control_{max} = 0,9$) e o limite inferior da ação de controle integral ($Control_{min}$), que é o valor da constante K_i varia para evitar sua saturação ou maximizá-lo ($K_i = 1$). O tempo de amostragem utilizado foi de $T_s = 1 \mu s$.

A saída deste controlador foi multiplicada pela diferença entre a tensão atual no sistema eólico V_V e a tensão de referência V_{Vref} , que é igual a duas vezes a tensão de linha (valor máximo a ser utilizado para uma ação de controle saturada). A representação esquemática de sua implementação em Simulink é mostrada na Figura 26. A arquitetura final do sistema de geração eólica é apresentada na Figura 27.

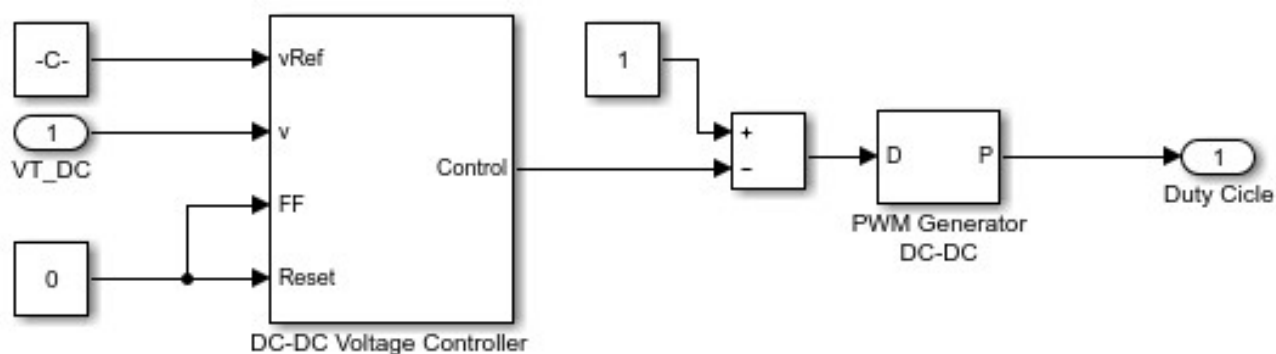


Figura 26. Controle de Tensão.

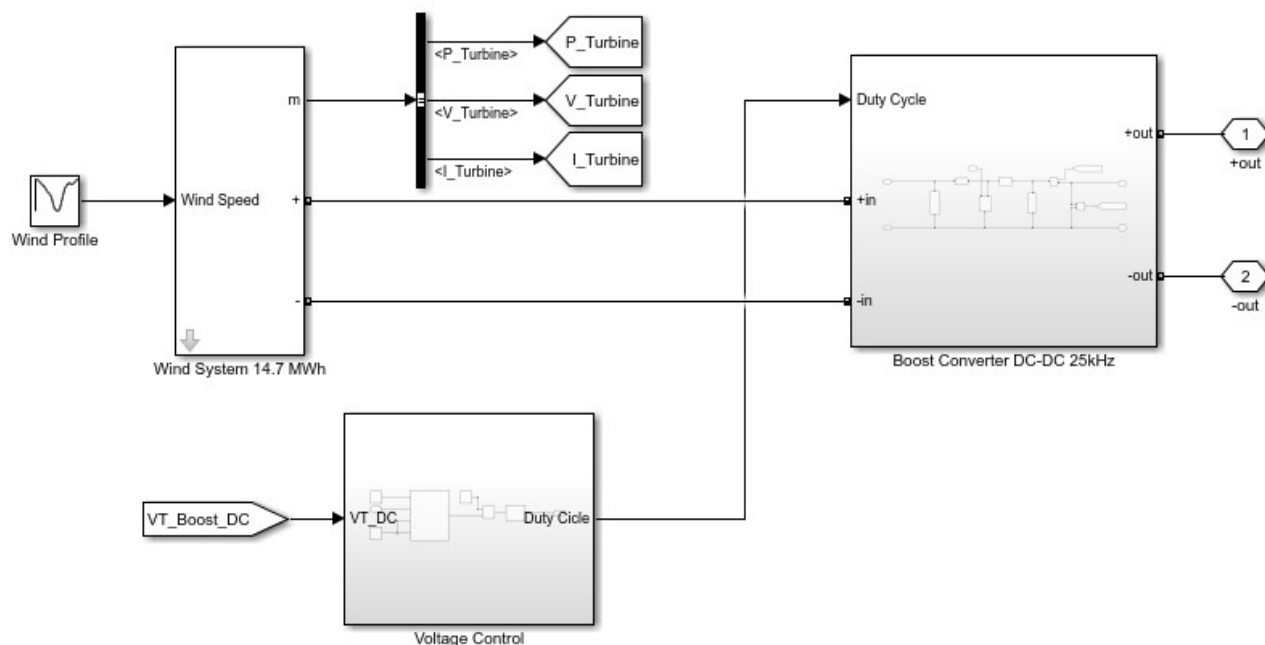


Figura 27. Sistema de Geração de Energia Eólica

4.4. Sistema de Armazenamento

O comportamento observado através das Figura 14 e Figura 15, mostra que a geração de energia apresentado nestes sistemas é irregular, o que produziria cortes ou interrupções de energia ao comparar este comportamento apresentado na Figura 16, consequentemente, é necessário implementar um sistema de backup com o qual seja possível manter a curva de demanda para qualquer condição.

Existem diversas tecnologias de armazenamento de energia, que podem ser divididas em três grupos, as baterias eléctricas, as células de hidrogénio e os supercapacitores, os quais ainda tem uma densidade energética baixa em comparação aos outros dois grupos. Os primeiros convertem energia química em energia eléctrica e são diferenciados de acordo com os materiais de fabricação e são os mais comumente utilizados devido a seu preço e densidade energética, onde a duas tecnologias mais utilizadas na atualidade são as baterias de Li-ion e de chumbo-acido.

Por outro lado, as células de hidrogénio apresentam uma melhoria em relação às primeiras devido que se utiliza o hidrogénio como componente principal para o armazenamento de energia, o que permite armazenar grandes quantidades de energia ao ter uma densidade energética quase três vezes superior à dos combustíveis fósseis, como se detalha em (Chi & Yu, 2018), sem perder capacidade de carga ao longo do tempo, o que é essencial para sistemas de energias renováveis como o fotovoltaico ou eólico, devido ao seu comportamento variável. Infelizmente seu principal problema é a eficiência no processo de obtenção, onde por eletrólise sua eficiência total está entre 20% e 40% (Pellow, Emmott, Barnhart, & Benson, 2015) em comparação com as baterias que tem eficiências entre 70% e 90%; existem outros métodos de obtenção com maior eficiência, mas ou geram gases de efeito estufa ou estão em fase experimental e, portanto, não são economicamente viáveis (Dincer & Acar, 2014; Suleman, Dincer, & Agelin-Chaab, 2016).

No entanto, uma das principais vantagem de uma bateria chumbo-ácido é a sua capacidade de instalação, que é calculada para uma faixa compreendida até o valor de carga máxima de 30 MW, diferentemente da Li-íon que varia até o valor de carga máxima de 2.5 MW (IRENA, 2017), e a capacidade instalada compreendida entre a faixa de valores de 1 MW a 100 MW para chumbo ácido e entre 5 kW e 2.5 MW para o Li-íon (Tagare, 2011). Outra vantagem

é o seu custo, onde estudo realizado em (Anuphappharadorn, Sukchai, Sirisamphanwong, & Ketjoy, 2014) mostra que o custo para a bateria chumbo-ácido é de 120 \$/kWh, enquanto que o custo da bateria Li-íon é cerca de 600 \$/kWh.

Analisando a relação custo do investimento, benefício e custo do ciclo de vida, valor atual simples líquido, valor presente líquido, custo da energia, chega-se a uma relação custo / benefício onde foi possível constatar o índice de 0,19 para a bateria chumbo-ácido e 0,13 para a bateria Li-íon.

Mesmo com as vantagens descritas anteriormente, dentre os principais critérios de seleção é a quantidade de carbono concentrado que as baterias de íons de lítio possuem em relação às baterias de chumbo-ácido (Zou, 2012), pois a exploração de carbono em alguns países do mundo ocorre em céu aberto, o que poderia produzir um ciclo de dependência energética, como ocorre com o petróleo.

Portanto, foi introduzido neste modelo um sistema de bateria de chumbo-ácido, que apesar de ter diversos impactos ambientais em suas fases de extração, fabricação e transporte, como mostrado por (J. Zhang, Chen, Zhang, & Liu, 2016), mais de 80% desses impactos são gerados em sua fase de extração (Chen et al., 2017).

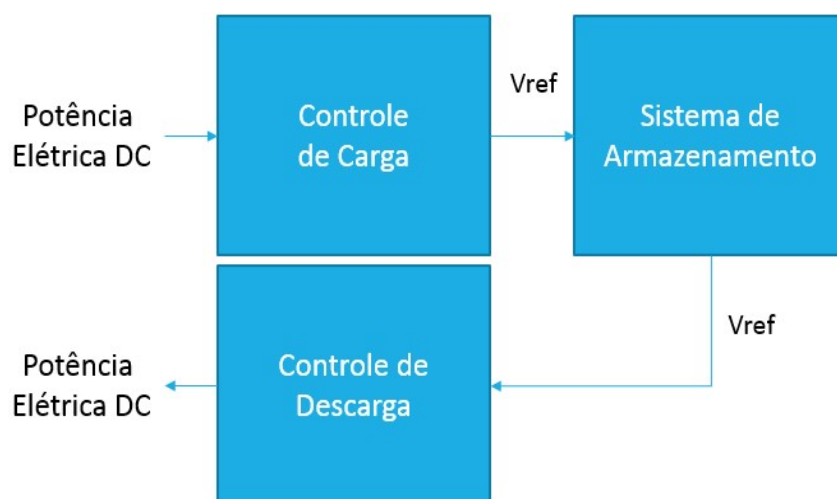


Figura 28. Esquema do Sistema de Armazenamento numa Bateria

Adicionalmente, devido que bateria de chumbo-ácido é amplamente utilizada em diferentes sectores, é a que tem a cadeia mais completa de reciclagem e reutilização em comparação com as outras tecnologias de armazenamento existentes, com cerca de 97% contra

3% nas baterias de Li-íon, onde os diferentes componentes da bateria são utilizados quase na sua totalidade, tanto para a criação de uma nova, como para a utilização dos mesmos em diferentes sectores da indústria (W. Zhang et al., 2016). A Figura 28 apresenta a arquitetura de armazenamento correspondente ao modo de operação de uma bateria do tipo chumbo-ácido.

4.4.1. Bateria de Chumbo-Ácido

A operação de baterias de chumbo-ácido são baseadas na sua operação na célula eletroquímica, onde existem dois diodos de carga oposta, um eletrodo positivo baseado em placas de chumbo e outro eletrodo negativo de esponja de chumbo, que quando estão conectados a uma carga elétrica libera elétrons de um para o outro, portanto o modelo que define o sistema de armazenamento mostrado no esquema da Figura 28, é definido através da equação.

$$V_B = E_m \pm I_B R_B \quad (4.25)$$

O fenómeno eletroquímico da bateria, possui dois estados de operação, a carga e a descarga, onde, de acordo com a equação apresentada, é representada pela variação de seu sinal + para carga e - para a descarga, onde V_B é a tensão corrente da bateria, E_m é a tensão de circuito aberto como descrito na equação 25, I_B é a corrente atual, que varia de acordo com a carga, e R_B é a resistência interna da bateria, que é detalhada na folha de dados da bateria.

$$E_m = E_{m0} - K_e(273 + T_e)(1 - SOC) \quad (4.26)$$

Onde

E_{m0} é a tensão do circuito dado pela carga máxima possível da bateria,

K_e é uma constante fornecida pelo fabricante,

T_e é a temperatura do eletrólito e

SOC é o estado da carga da bateria, que varia de 0 a 1

O parâmetro SOC (Leng & Rajkumar, 2017) possui o valor 0 (sem carga) e 1 (totalmente carregada) e é definido através da equação:

$$SOC(t) = \frac{InitialCapacity\ at\ t_0 + C(t)}{Rated\ capacity} * 100\% \quad (4.27)$$

Uma maneira simplificada de representar essa equação é dada por (Achaibou, Haddadi, & Malek, 2012):

$$SOC(t) = SOC_0 + \frac{\eta_c Q(t)}{C} \quad (4.28)$$

Onde

SOC_0 é o estado inicial de carga para $t=0$,

Q é a carga entregue ou liberada (dependendo do estado operacional)

Para um determinado instante de tempo $Q(t) = I_B * t$, onde C é a capacidade da bateria, e η_c é a eficiência da bateria, definida através da seguinte equação.

$$\eta_c = 1 - e^{\left(\frac{20.73}{\frac{T_B}{I_{10}} + 0.55} (SOC - 1) \right)} \quad (4.29)$$

Esta equação depende de I_{10} , que é definida como a corrente com uma capacidade de descarga completa em 10 horas, e C_{10} , é o valor obtido através da curva característica da bateria, descrita na especificação da bateria fornecida pelo fabricante. Essa equação mostra que à medida que a bateria é descarregada, sua eficiência é diminuída.

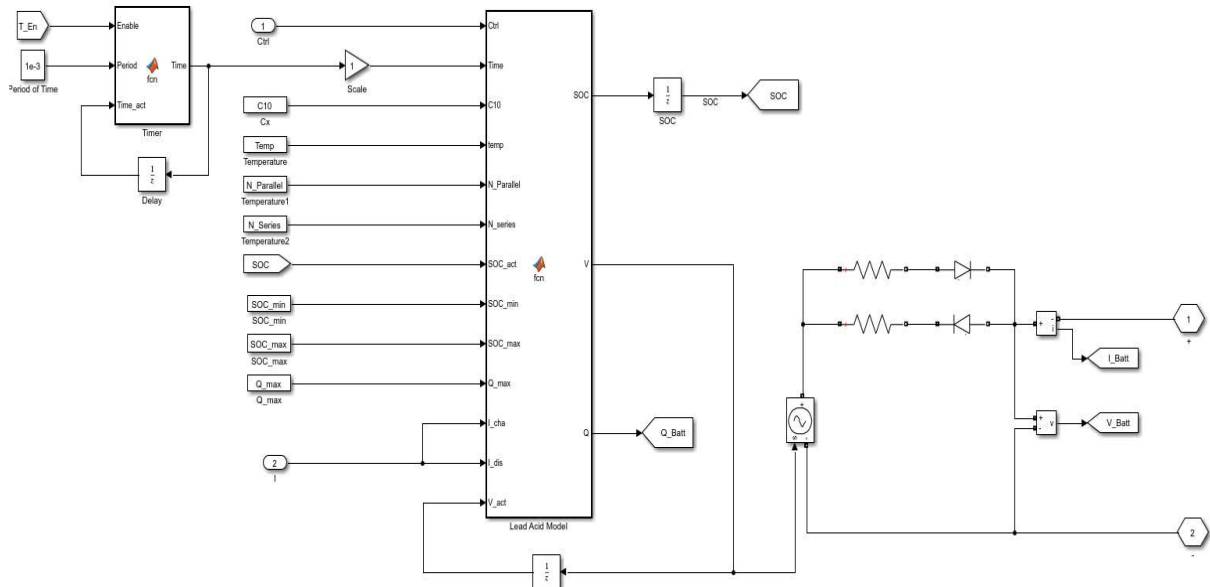


Figura 29. Modelo de Bateria

Uma vez obtido o estado SOC de carga, é calculada a tensão atual, que dependerá do modo de operação da bateria, seja carregando ou descarregando; no primeiro caso, a equação é a seguinte.

$$V_B = [2 - 0.16SOC] + \frac{I}{C_{10}} \left(\frac{6}{1 + I^{0.86}} + \frac{0.48}{(1 - SOC)^{1.2}} + 0.036 \right) * (1 - 0.025\Delta T_B) \quad (4.30)$$

Onde, ΔT_B é a variação entre as temperaturas ambiente e atual da bateria. No caso em que a bateria entra no modo de descarregamento, a tensão pode ser definida através da equação:

$$V_B = [2.085 - 0.12(1 - SOC)] - \frac{I}{C_{10}} \left(\frac{4}{1 + I_B^{1.3}} + \frac{0.27}{SOC^{1.5}} + 0.02 \right) * (1 - 0.007\Delta T) \quad (4.31)$$

Nestas duas equações apresentadas anteriormente, o primeiro termo compreendido pelos parênteses representa a variação da tensão em relação ao estado de carga e o segundo termo representa o valor da resistência interna da bateria. O esquema implementado em Simulink é apresentado na Figura 29.

Para dimensionamento do modelo implementado, o valor da potência máxima que todo o sistema deve fornecer é calculado, de acordo com as curvas de radiação, curvas de vento e dados mostrados na especificação técnica da bateria (EUROPOWER, 2015), conforme mostra a equação:

$$P_{Bneed} = \frac{350MW}{24h} * 10h = 143.833MWh \quad (4.32)$$

Inicialmente é calculado a energia requerida por hora, a partir da informação que no período correspondente a um dia são necessários 350MW. Definindo o número de horas que este sistema estará ativo, onde para o problema em estudo foi considerado que o sistema solar só gerará energia durante o período máximo de 7.1 horas, e que o sistema de vento só trabalhará com um coeficiente de desempenho do sistema de 45% ou seja, o seu desempenho máximo terá seu funcionamento durante o tempo de 10,8 horas do dia, definindo-se assim a partir desses dados, um tempo de operação de 10 horas, chegando-se assim a equação de energia necessária disponibilizada:

$$C_{ne} = \frac{\frac{E_{need} * Day_{Dep}}{P_{DeepMax}}}{V_{BattL}} = \frac{\frac{143.833MWh}{0.2}}{11200V} = 65104.166Ah \quad (4.33)$$

Onde C_{ne} é a capacidade nominal da bateria dependendo da profundidade máxima de descarregamento $P_{DeepMax}$, que neste caso é 20%, ou seja, a bateria pode ser descarregada até o valor de 80% de sua carga máxima, com o propósito para aumentar sua vida útil e ter um maior espaço de trabalho sobre a energia gerada versus a demanda, e V_{BattL} é a tensão de linha do banco de baterias que é igual à do sistema de geração;

Para definir sua distribuição a seguinte equação é aplicada.

$$B_{Parallel} = \frac{C_{ne}}{P_n} = \frac{65104.166Ah}{3000Ah} = 21.701 \cong 22 \text{ Baterias} \quad (a)$$

$$B_{Series} = \frac{V_{BattL}}{V_{batt}} = \frac{11200V}{2V} = 5600 \text{ Baterias} \quad (b)$$

As baterias de chumbo-ácido requerem o controle em dois modos, carregamento e descarregamento, conforme indicado na Figura 28, já que a densidade de energia por litro é inferior a 100 Wh/L ; no ciclo de descarregamento deve-se controlar o limite definido acima, e no ciclo de carregamento para que a bateria que não esteja em um estado de sobrecarga, foi implementado um sistema de comutação, que é regulado por um controle de monitoramento é apresentado na Figura 30.

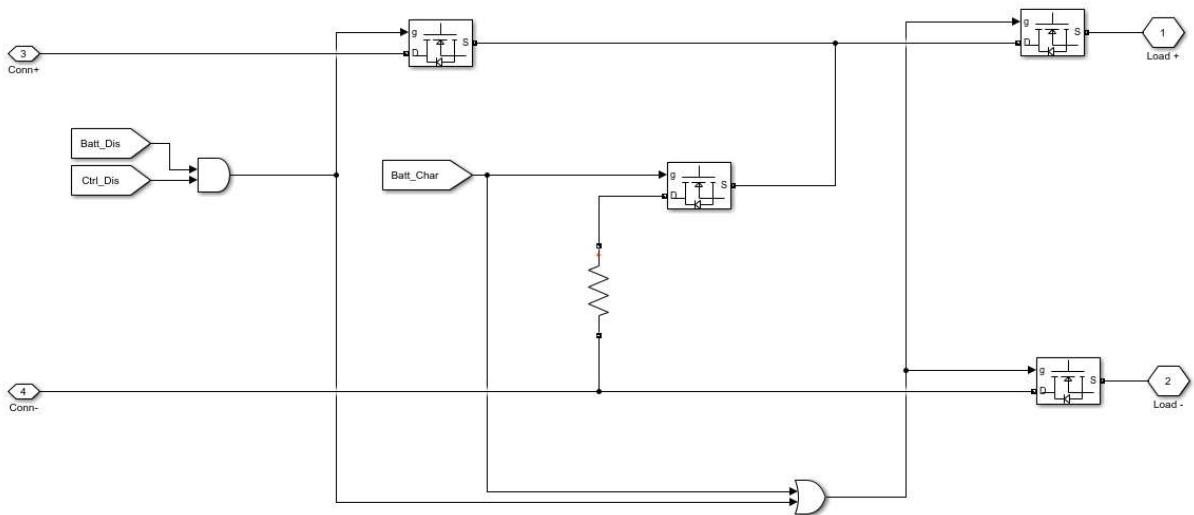


Figura 30. Sistema de Comutação

Em geral, o sistema de chaveamento apresentado funciona através de instruções lógicas, onde existem duas situações para o controle de descarregamento, o primeiro é onde o sistema

principal (Solar-Eólico) precisa da energia das baterias, e outro onde se o nível de descarregamento das baterias for superior a 80%. Por outro lado, no caso de carregar as baterias é necessário apenas que haja um mínimo de energia indicada na folha de dados, para que o fluxo de energia seja ativado na direção oposta à descarga.

A Figura 31 apresenta o sistema de bateria implementado a partir do modelo apresentado anteriormente com o sistema de comutação e um controle de carga, que depende do estado atual das baterias e controla diretamente o fluxo de energia através dos transistores implementados.

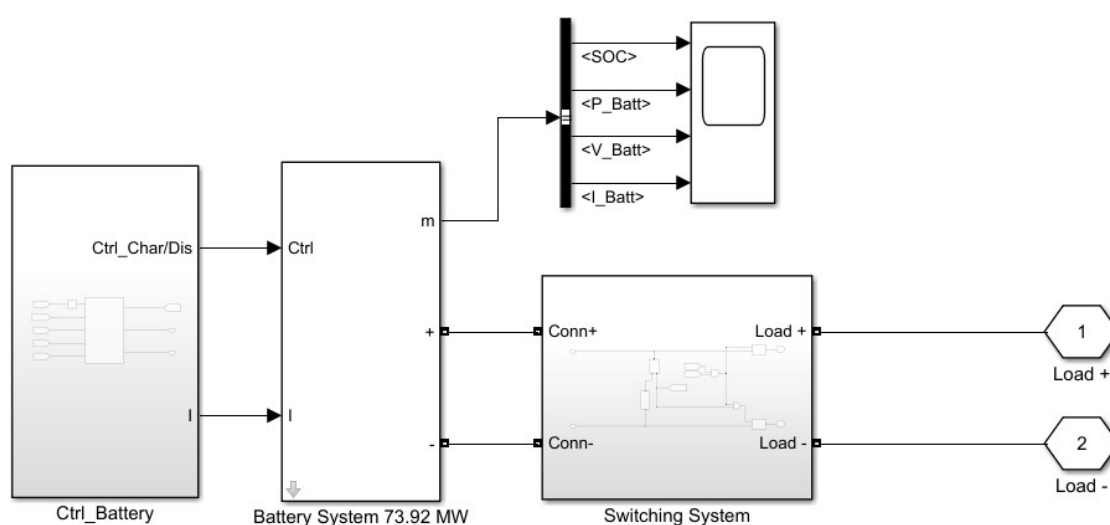


Figura 31. Sistema de Armazenamento de Baterias

4.5. Algoritmo de Gerenciamento de Energia

A energia gerada e a armazenada descritas anteriormente requerem um algoritmo de distribuição com a finalidade de gerenciar o fluxo disso, seja para demanda, para carregar a bateria ou para usar a energia da rede; para esta finalidade, a variação máxima de tensão é de $\pm 6\%$ (ANEEL, 2001; Ausgrid, 2017; Ministerio de Minas e Energía, 2013; Suarez, 2003).

Para a modelagem e identificação do algoritmo é necessário representar cada um dos diferentes componentes do mesmo constituído pelos sistema de geração renovável (RS), bateria (BS) que possui dois modos de ação, como sistema de armazenamento e como fonte de backup, por outro lado, outro componente é a geração convencional (CS), que para o caso da cidade de

Barranquilla é diesel como indicado em (Electricaribe, 2012), e a carga (PL) então a equação característica que representa este sistema dada por (Conteh, Tobaru, Howlader, Yona, & Senjyu, 2017; Shivarama Krishna & Sathish Kumar, 2015) é a seguinte:

$$P_{MG}(t) = P_{RS}(t) + P_{CS}(t) \pm P_{BS}(t) - P_L(t) \quad (4.35)$$

Com base nesta equação e considerando a variação existente no comportamento individual de cada um dos elementos apresentados, se tem as seguintes condições:

- $P_{GN}(t) = P_{RS}(t) = P_{SOLAR}(t) + P_{WIND}(t)$ para qualquer caso em que $P_{RS}(t) \geq P_L(t)$
- $P_{GN}(t) = P_{SOLAR}(t) + P_{WIND}(t) + P_{CS}(t)$ no caso de $P_{RS}(t) < \frac{P_L(t)}{1.06}$ y $SOC(t) < 0.8$
- $P_{GN}(t) = P_{SOLAR}(t) + P_{WIND}(t) + P_{BS}(t)$ no caso de $P_{RS}(t) < \frac{P_L(t)}{1.06}$ y $SOC(t) > 0.8$

Considerando essas condições, onde P_{GN} é a potência gerada, o algoritmo implementado é mostrado na Figura 32.

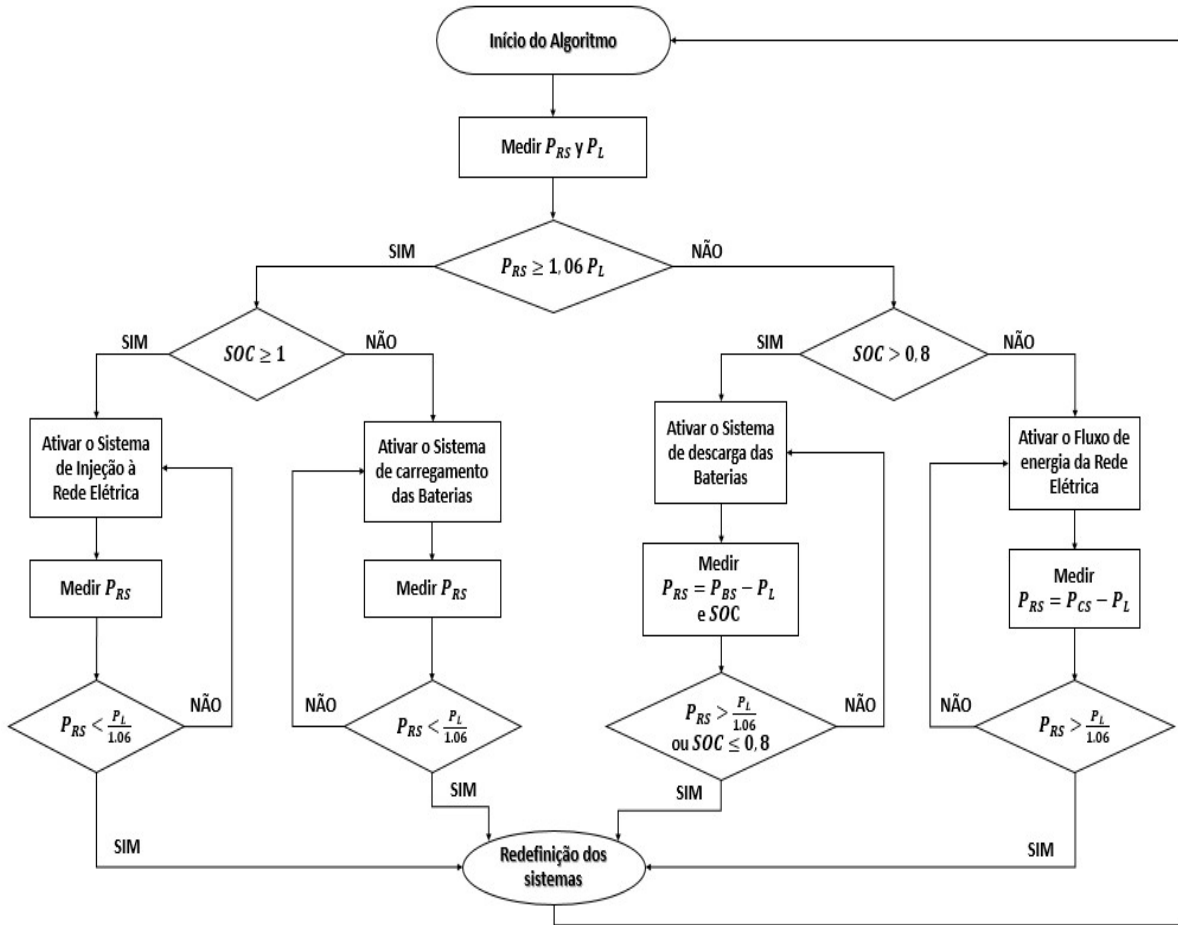


Figura 32. Algoritmo de gerenciamento de energia

O algoritmo descrito é baseado na operação dos quatro casos descritos na seção anterior e nos esquemas mostrados em (BOYNUEGRI, YAGCITEKIN, BAYSAL, KARAKAS, & UZUNOGLU, 2013; Torres-Moreno, Gimenez-Fernandez, Perez-Garcia, & Rodriguez, 2018). Com o objetivo de gerenciar todas as situações possíveis, representando os modos de operação do sistema em estudo. Este fluxograma foi implementado em Simulink® usando a ferramenta Stateflow®, onde a lógica apresentada foi adaptada para uma linguagem representativa utilizando os diferentes sistemas de potência descritos anteriormente, conforme mostra representação esquemática apresentada na Figura 33.

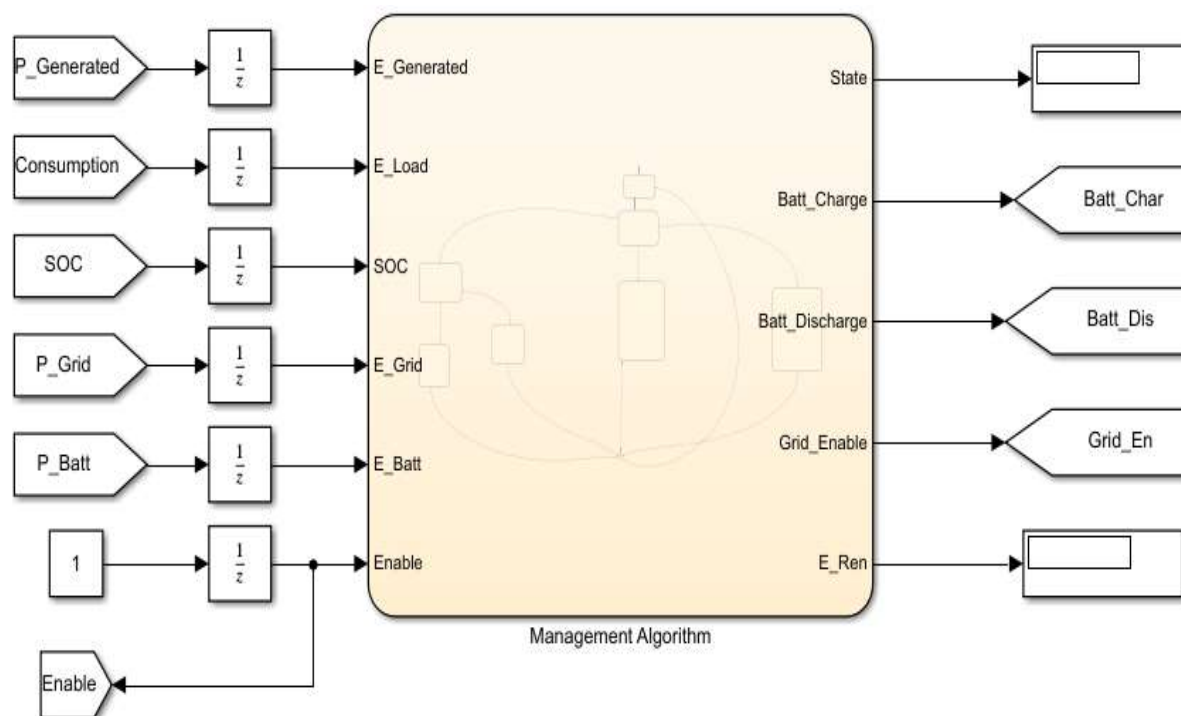


Figura 33. Esquema implementado do algoritmo de gerenciamento da energia

Pode-se observar através da Figura 33, as saídas correspondem aos estados, aos sistemas de backup e à quantificação da energia renovável produzida, onde a primeira foi implementada com a finalidade de obter um maior controle de transição entre estados, devido à natureza do sistema, a troca entre um estado e outro sem o correspondente estado de transição levaria a *overshoots* na produção de energia, diminuindo a qualidade do sistema, os sistemas de backup correspondem ao sistema de bateria, com seu respectivo controle de carga e descarga, e a rede convencional como é detalhado nesta figura. Finalmente, a última saída é o parâmetro fundamental do algoritmo apresentado anteriormente na Figura 32.

4.6. Conclusão

Neste capítulo foi apresentado a descrição detalhada de cada um dos sistemas e subsistemas que compõem a arquitetura de controle de um sistema de geração híbrido de energia, sendo apresentado detalhadamente os modelos matemáticos correspondentes, os algoritmos de controle implementados, o sistema de regulação de potência, como também o algoritmo de gerenciamento de energia, tornando ênfase na operação, projeto e dimensionamento de cada um destes sistemas, e os parâmetros de trabalho selecionados em cada caso. No próximo capítulo desta Dissertação de Mestrado, serão detalhados os diferentes testes realizados definidos neste capítulo, e os principais resultados obtidos e suas respectivas análises.

5. RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados a análise dos principais resultados obtidos na implementação em Matlab-Simulink da arquitetura de fornecimento, controle e distribuição de energia elétrica, através de validação realizada a partir de dados de uma cidade de porte médio, que permitiu o estudo do comportamento do algoritmo proposto e de seu funcionamento em diferentes configurações, identificando a energia gerada, a utilizada para carregamento das baterias, e a utilizada para injeção à rede elétrica, e ainda o desempenho da potência fornecida e perdida durante o processo de geração. Além disso, serão apresentados alguns resultados obtidos a partir do estudo econômico, ambiental e social realizado através do projeto da arquitetura proposto e os resultados energéticos obtidos.

5.1. Estudo Energético

No capítulo anterior deste trabalho foi implementado um ambiente de simulação correspondente de duas fontes de energias renováveis com armazenamento em rede e sistema de backup, onde foram realizados testes com diferentes condições de irradiação, vento e demanda média ao longo do ano.

Tomando como referência os resultados obtidos no capítulo anterior, onde o fluxo de energia foi analisado ao longo dos diferentes sistemas (Figura 14, Figura 15 e Figura 16), a Figura 34 apresenta a curva de potência gerada versus potência fornecida através da energia solar, onde foi possível constatar um comportamento consistente com o apresentado através da Figura 15, apresentada no capítulo anterior.

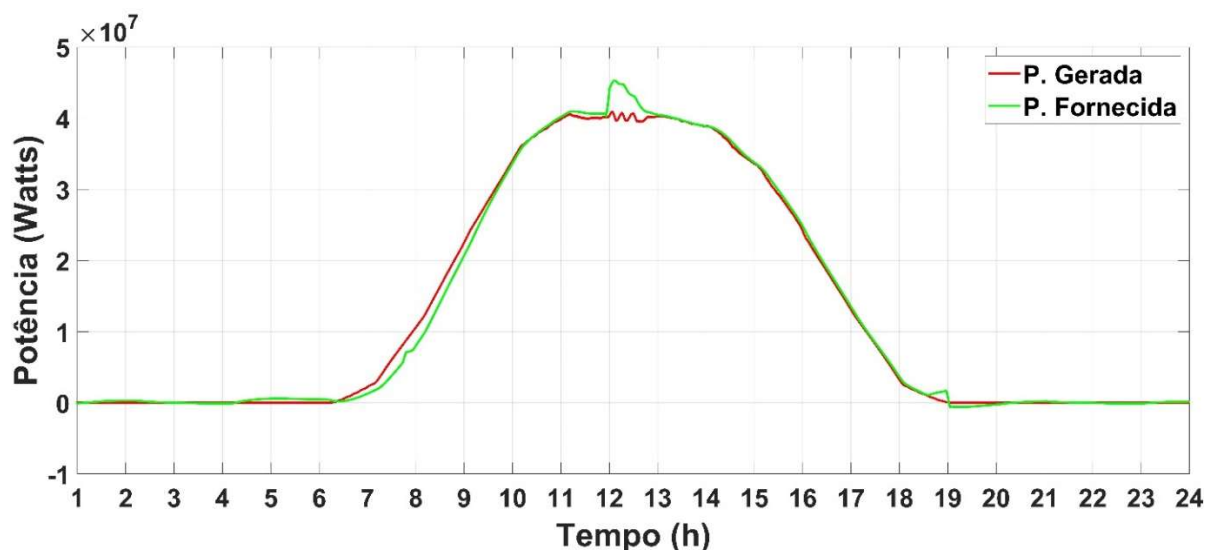


Figura 34. Potência gerada e Potência fornecida na rede através do Sistema Fotovoltaico

Pode-se constatar que a energia produzida tem um crescimento exponencial entre as 6 e as 11 horas, aumentando de 0 watts para 40.94 MW, para depois variar entre 40.98 MW e 38.84 MW durante o período das 11:00 às 14:00 horas, ocorrendo ainda um pico de potência às 12 horas, diminuindo posteriormente de forma exponencial de 38.84 MW a 0 watts das 14 às 19 horas. Dentro da faixa das 19 às 6 horas não ocorrerá geração de energia (insignificante). A quantidade total de energia gerada em um dia com intensidade solar média é de 292.15 MW, e relacionando com a energia necessária no dia este valor atinge 83.47% da demanda.

Comparando as duas curvas apresentadas através da Figura 15 e Figura 34, foi encontrado que a energia entregue à demanda pelo sistema solar apresenta mudanças em seu comportamento, onde a quantificação destas as duas curvas denotam perda energia ocorrida pelo transporte, transformação e tratamento desta energia nos estágios de controle e regulação explicados no capítulo anterior. Consequentemente, tomando como referência os dados correspondentes ao intervalo entre 6 e 19 horas; é calculado o valor de eficiência do sistema em 94.57%.

Utilizando o mesmo procedimento foi obtido a curva de comportamento da potência no sistema de energia eólica comparando a energia liberada e a gerada (Figura 35).

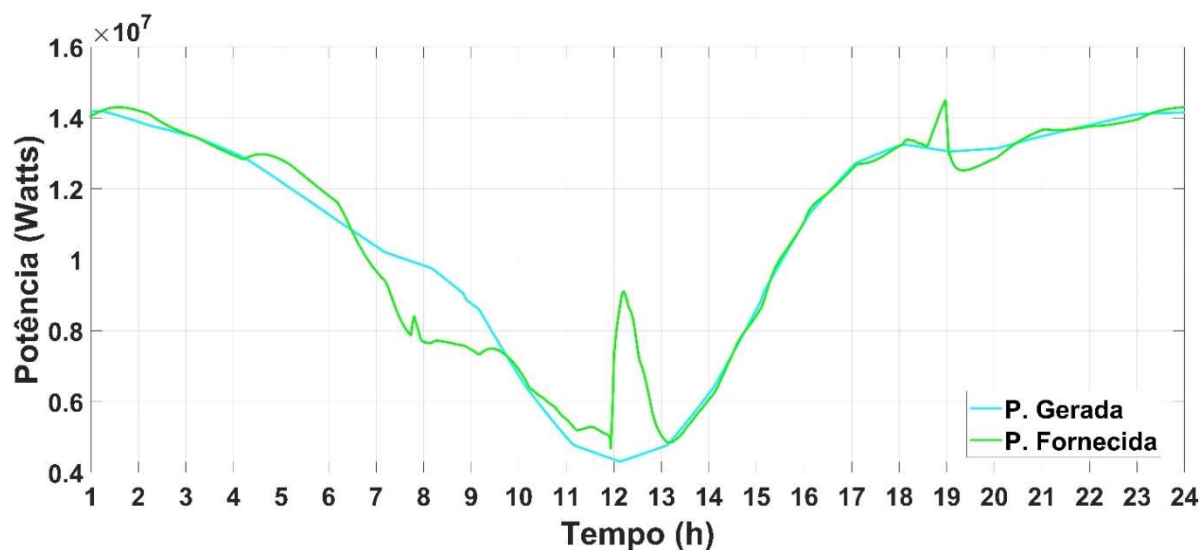


Figura 35. Potência gerada e Potência fornecida na rede através do Sistema Eólico

Da mesma forma que o sistema fotovoltaico, é feita a comparação do comportamento da velocidade do vento apresentada anteriormente na Figura 14, onde foi observado que a produção de energia é constante ao longo do dia com algumas variações em magnitude. Adicionalmente, é detalhado que a curva de geração de potência tem um comportamento oposto que o apresentado na Figura 34, onde entre períodos de 1 as 11 horas seu valor diminui exponencialmente, atingindo seu ponto mais baixo ao meio-dia, com diminuição de sua energia de 14.19 MW para 4.316 MW. No período noturno ocorre um aumento de potência, retomando seu pico após as 24 horas.

Consequentemente, para a concepção de sistemas de energia renovável híbrido interligada à uma rede sem sistema de backup de segurança, é preferível conceber o eixo central tendo estes dois sistemas de geração em comparação com outras opções de energia renováveis, atuando de forma complementar as curvas de potência obtidas.

A eficiência resultante para este sistema, comparando a energia obtida a partir do mesmo com a energia gerada é cerca de 94.82%. Ao mesmo tempo, a energia total gerada, para condições de vento médio cobrindo um 71.07% da demanda, foi de 248.76 MW; portanto, considerando a energia total produzida pelos dois sistemas apresentados, obtém-se um excedente de 190,9 MW.

A curva de carregamento e descarregamento do sistema de armazenamento através de um banco de armazenamento por baterias pode também ser apresentado, relacionando a capacidade de energia armazenada em relação a energia fornecida à demanda. Neste estudo foram considerados todos os casos simulados, sendo determinado um estado inicial da bateria com $SOC_{ini} = 1$, como é detalhado na Figura 36.

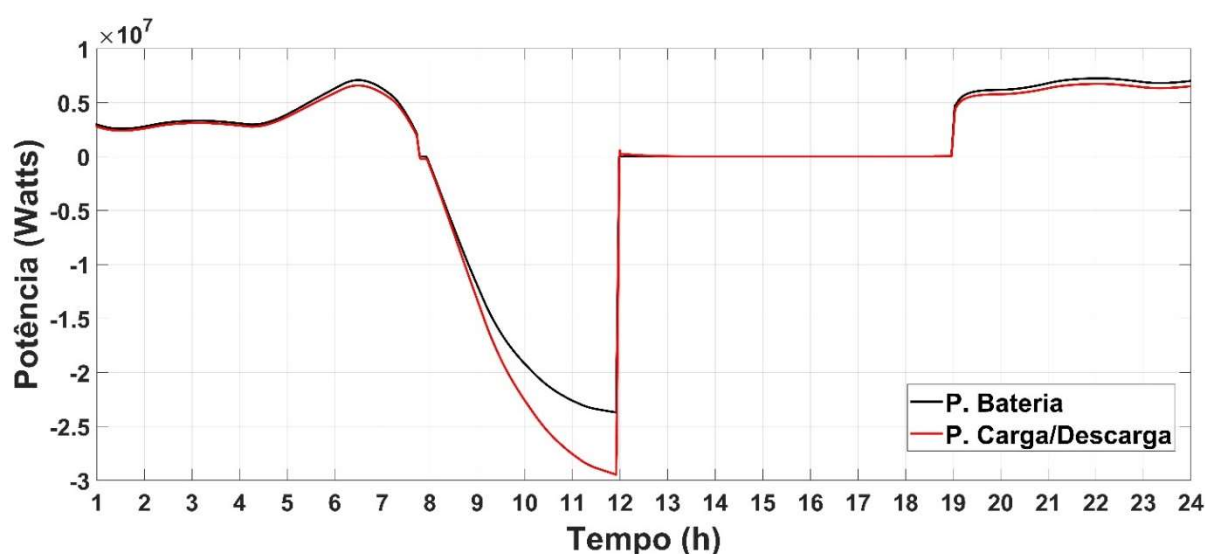


Figura 36. Potência gerada versus Potência fornecida pelo sistema de um banco de baterias

A Figura 36 mostra os diferentes estados operacionais da bateria em consequência do comportamento variável do sistema solar. No período de 19h do dia anterior até aproximadamente 8 h do dia posterior, é ativada a descarga da bateria cobrindo a demanda nos fusos horários onde não ocorre luz solar, atingindo um consumo médio de 7 MWh, e diminuindo seu uso para 2.5 MWh dentro do intervalo horário de 1 a 4h da madrugada, para depois retomar o consumo médio da bateria de 7 MWh. Um segundo intervalo horário ocorre de aproximadamente 8 a 12h da manhã, onde ocorre o modo de carregamento da bateria, que aproveita o excesso de energia gerada até um $SOC = 1$. Finalmente o terceiro intervalo de tempo ocorre no período da tarde (12 às 19h), onde a bateria não mais utilizada, e consequentemente, o excesso de energia vai para a rede como é detalhado na Figura 37.

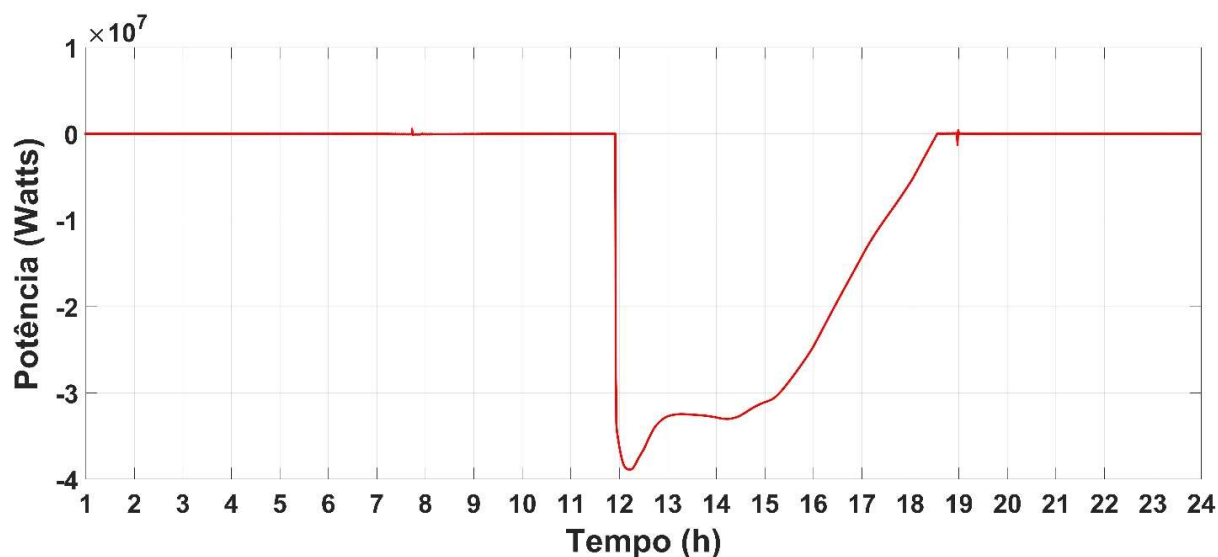


Figura 37. Curva de Potência da rede

A Figura 37, mostra o funcionamento do sistema de armazenamento backup, onde é detalhado que durante o período diurno não é necessária a utilização da energia da rede, sendo durante esse período o sistema desacoplado, se acoplando no intervalo de tempo abrangendo o período de 12 às 19h.

Adicionalmente, é observado que o excedente de energia não é utilizado pelo sistema, sendo injetado na rede, ocasionando assim, além do 350 MW e potência gerados pelo sistema, uma diminuição no consumo da rede de aproximadamente 155 MW por dia. Por outro lado, este valor varia de acordo com a geração e a demanda de potência que ocorre durante o dia, e consequente, para fins de distribuição de energia elétrica, este valor deverá ser monitorado em todos os momentos, evitando-se assim; a possibilidade de ocorrência de picos ou falta de energia na rede de distribuição elétrica.

O detalhamento apresentado através das curvas de potência de cada sistema mostra que, ao longo do dia, as mesmas são perturbadas em instantes de tempo diferentes, gerando picos instantâneos (Figura 38). Esta figura evidencia que a razão fundamental da ocorrência dos diferentes picos é devido ao funcionamento do sistema de comutação, que começa a funcionar através do algoritmo interligando o sistema de baterias ou a rede gerando uma perturbação no sistema total, razão pela qual uma etapa de acoplamento é adicionada em cada sistema, reduzindo a magnitude da perturbação entre 80% e 90%. Como resultado, as perturbações obtidas não excedem 20% do excesso de impulso.

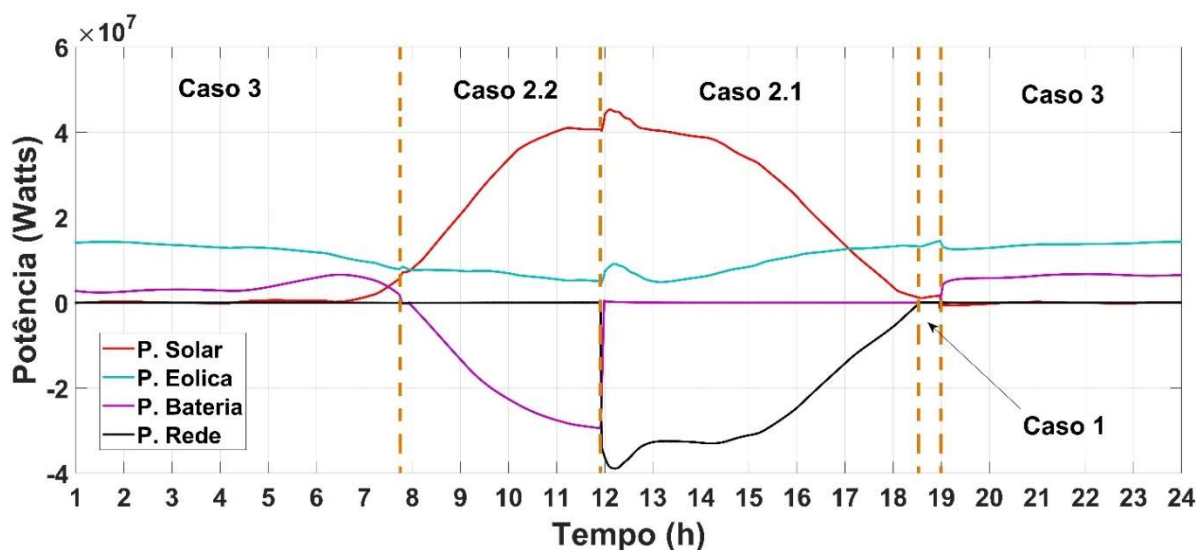


Figura 38. Funcionamento do algoritmo para os diferentes casos definidos

Por outro lado, pode-se constatar o tempo de resposta do algoritmo, onde num intervalo de minutos tem a capacidade de alternar os modos de funcionamento, proporcionando assim, a possibilidade de um aproveitamento de mais de 240 MW de energia (considerando a energia de carregamento das baterias e a injetada na rede). Assim, num dia normal, pode acontecer uma mudança de até três modos de funcionamento em menos de 1 hora, como se observa das 18-19h na Figura 38, começando aos inícios das 18 horas no caso 2.1 (injeção para rede), para depois mudar as 18:24h ao caso 1 (operação só com os sistemas de geração solar e eólico) e às 19h mudará novamente ao caso 3 (utilização de baterias), conseguindo assim, não utilizar a energia de rede, distribuindo o excesso desta de modo que nunca houve menos energia da necessária no sistema para atender a demanda.

Esta situação pode ser exemplificada comparando a arquitetura projetada com e sem o algoritmo de distribuição, como é mostrado na Figura 39.

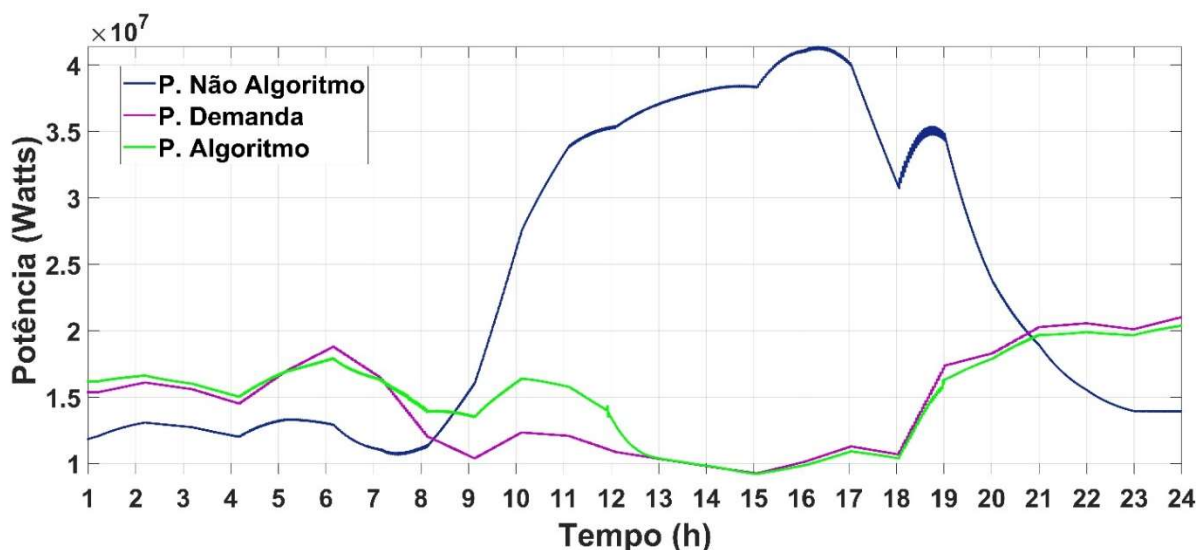


Figura 39. Curvas de potência com e sem algoritmo

Nesta comparação, é evidenciado através da Figura 39, um excedente de energia gerada nos sistemas de geração sem um sistema de back-up e/ou injeção de rede. Esse excedente de energia, caso não seja possível utilizá-lo, vai ser descartado para evitar a produção de sobretensões na rede de distribuição de energia.

Adicionalmente, é observada uma variação de geração de potência, onde ao contrário do que acontece durante o período de 9-21h aproximadamente, onde ocorre um excesso de energia, no período restante das 21h da noite as 8h da manhã não ocorre energia suficiente, resultando assim; uma curva de geração menor que a exigida, e isso é quantificado para ambas condições, obtendo-se assim; a magnitude da queda de energia, onde para o caso do uso do algoritmo proposto é de 4,68%, e sem o algoritmo de 33.71%, enquanto para o ponto mais alto de geração de energia na rede o excesso é de 24.71% utilizando o algoritmo proposto, e 74.85% sem algoritmo.

Consequentemente, no caso em que não há algoritmo, é denotada uma diferença importante na qualidade da energia, onde o uso do algoritmo melhora o rastreamento do ponto de potência. As informações acima podem ser detalhadas em maior grau comparando as curvas de tensão e corrente em cada caso, como mostra a Figura 40.

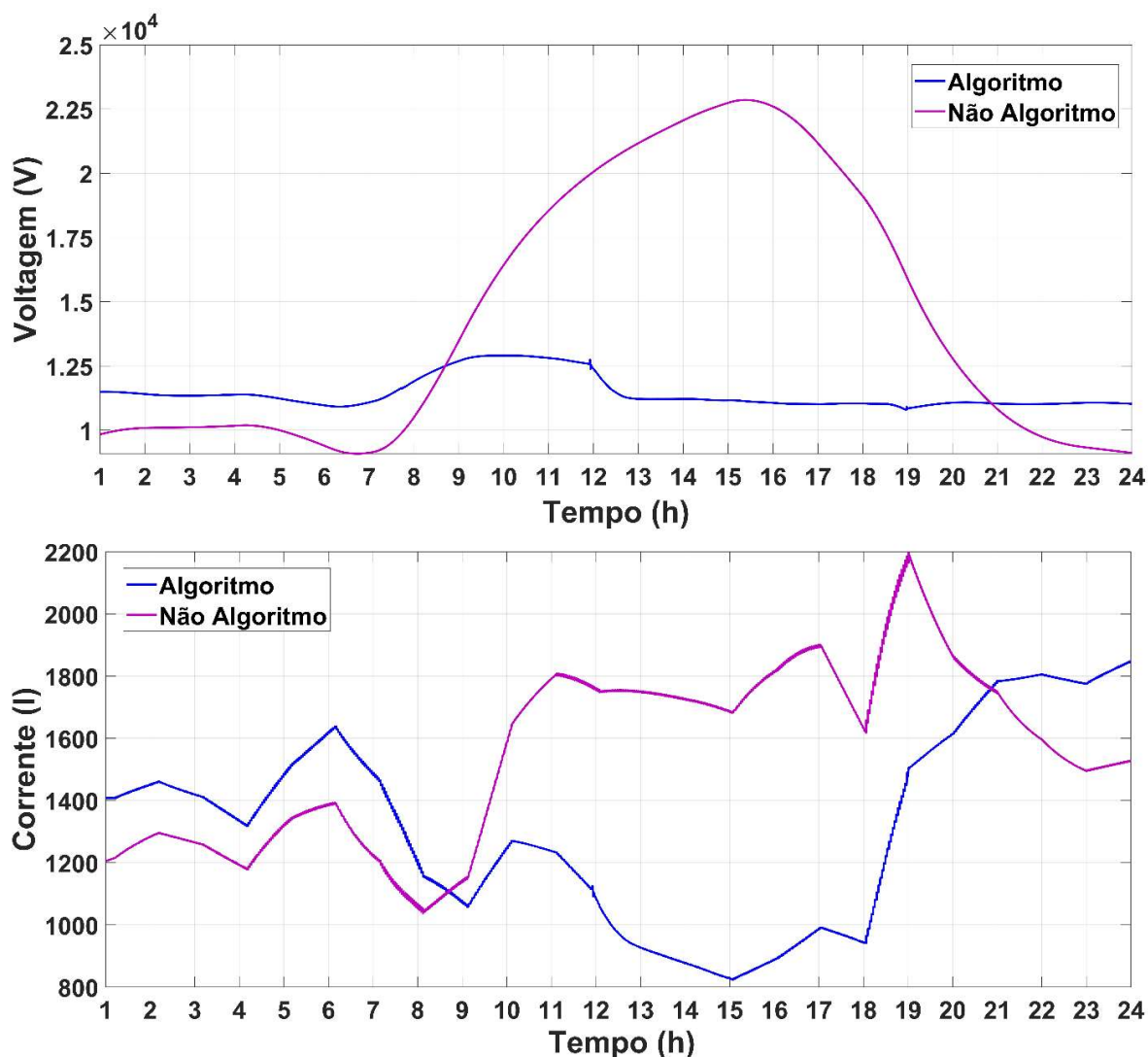


Figura 40. Curvas de Tensão e Corrente com e sem algoritmo de distribuição

Na Figura 40 é detalhado como a curva de tensão e de corrente se comportam de acordo com a demanda, para o caso em que o algoritmo funciona, mantendo sempre os mínimos e máximos não superiores a 20% em relação aos valores definidos. Por outro lado, o sistema sem o algoritmo, não seguem estes padrões, variando de 9800 até 22.800 volts e de 1.000 até 22.000 ampères em menos de 11 horas, de modo que, para que seja útil esta energia para a rede é necessário um tratamento posterior de regulagem e controle, aumentando assim, os custos de equipamentos associados. Por conseguinte, neste caso esse excesso deve ser consumido no momento, dissipado sob a forma de calor ou desligado do sistema ao entrar nessas faixas, como pode ser visto em (David, 2016), o qual foi significativamente reduzido por meio do algoritmo

desenvolvido, e tanto as tensões quanto as correntes obtidas precisam de uma regulação e pós-tratamento menor para oferecer uma qualidade de energia ótima para o consumo.

Para um segundo caso, a curva de potência é obtida sob condições climáticas críticas, que, em base aos dados obtidos, corresponde ao mês de outubro, mais especificamente no ponto mais forte da temporada de inverno na cidade de Barranquilla. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 41.

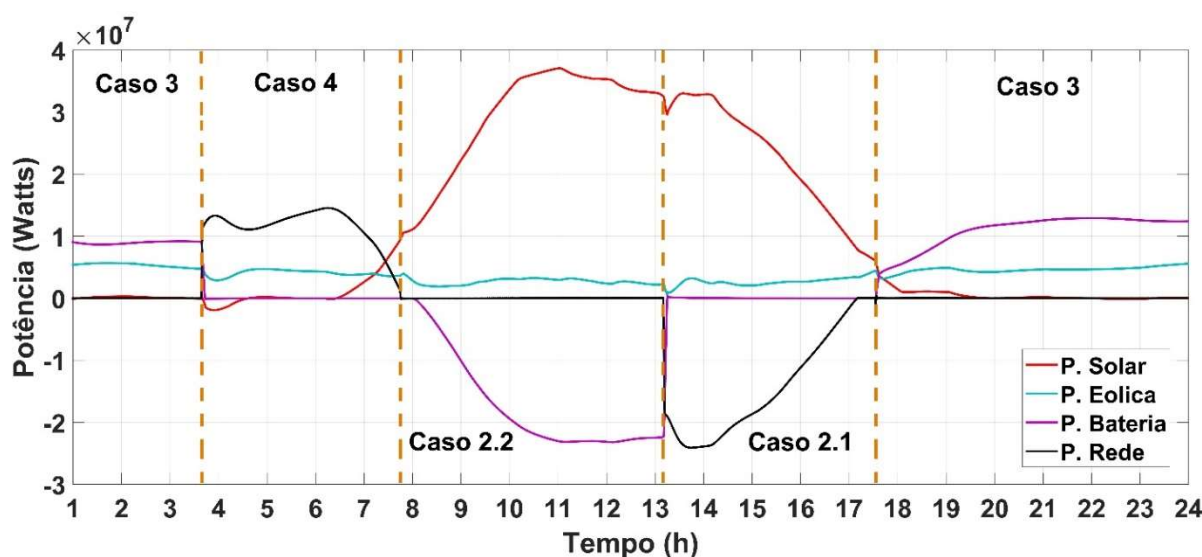


Figura 41. Funcionamento do algoritmo para as condições de geração mais baixas com $SOC_{min}=0.8$

Na Figura 41 é observado que um nível mais baixo de geração é obtido pelos dois sistemas principais, forçando o algoritmo a usar a energia da rede por um determinado período de tempo, compreendido entre as 3,5 e 7,8 h com uma potência total de entregue de 51,88 MW, onde a demanda é maior, embora pode ser visto que o percentual de energia entregue à rede é menor do que o injetado na rede, com um total de 64,91 MW, o que mostra que mesmo para este neste caso, a energia não é eficientemente distribuída.

Outra simulação foi realizada modificando o $SOC_{min} = 0.6$ com o qual, a energia adicional é obtida da bateria, que será devolvida no ciclo de carga, prolongando assim a duração do ciclo de descarregamento da bateria pelo período de 10 até 15 horas. O resultado obtido é apresentado na Figura 42.

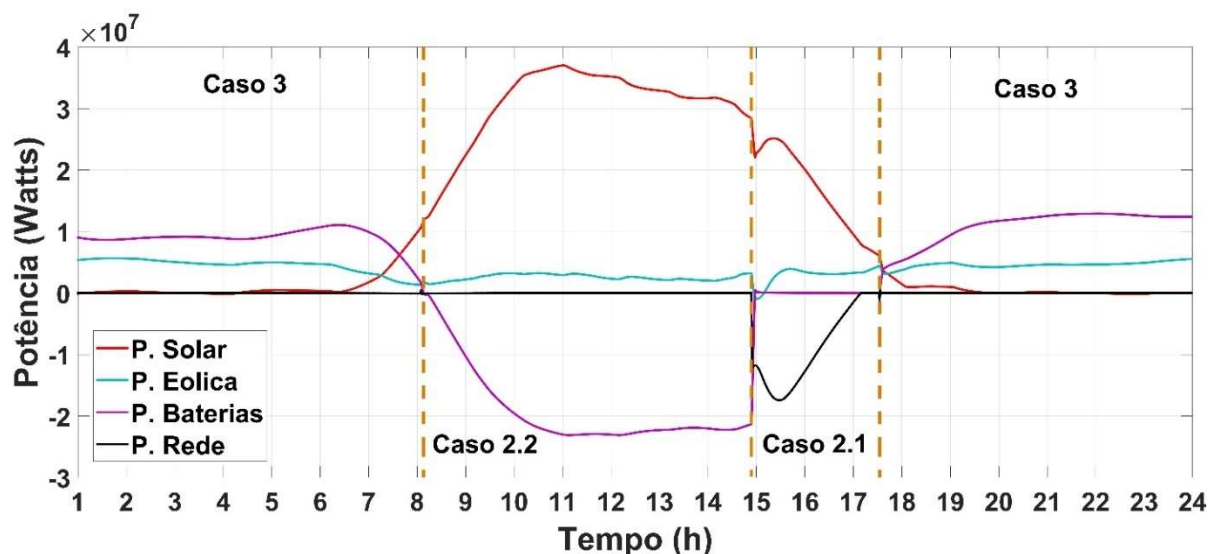


Figura 42. Funcionamento do algoritmo para as condições de geração mais baixas com SOCmin=0.6

Através da Figura 42, verifica-se que ao adaptar o SOC à demanda é possível distribuir a energia obtida de maneira mais eficiente, evitando assim o uso da energia proveniente da rede. Da mesma maneira que para o primeiro caso pode ser evidenciado no comportamento da tensão, corrente e energia gerada em comparação com a demanda (Figura 43).

A Figura 43(A) mostra que a curva de tensão se encontra dentro dos parâmetros de projeto (+/- 6%), exceto em dois instantes de tempo, que correspondem à conexão do sistema de injeção a rede e de carga das baterias, que como foi evidenciado no caso das baterias, geram perturbações na magnitude da tensão devido ao funcionamento destas, ao atuar como uma fonte e uma carga ao mesmo tempo, mesmo que estas perturbações não excedam 20% de seu valor de pico.

Por outro lado, a corrente varia de acordo com a demanda. Comparando-se os resultados apresentados na Figura 43(B) e Figura 43(C), a partir desta última fica evidente que a potência gerada satisfaz a curva de demanda em todos os momentos com uma queda de potência máxima de 16%, e representam as condições mais baixas de radiação e vento do ano.

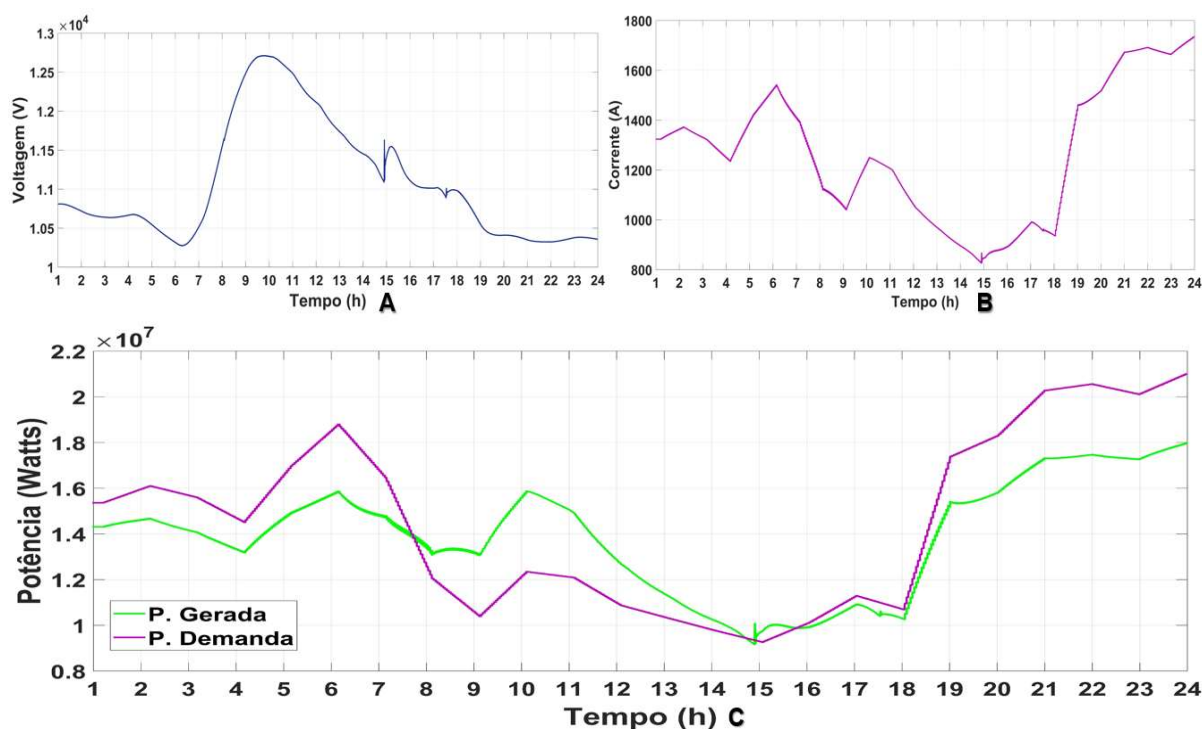


Figura 43. Curvas de Tensão (A), Corrente (B) e Potência (C) para condições de geração mais baixas com SOCmin=0.6

Um terceiro caso foi simulado sob condições de geração máxima de potência, que corresponde ao mês de janeiro (ponto máximo do verão na cidade de Barranquilla). Os resultados obtidos são apresentados na Figura 44.

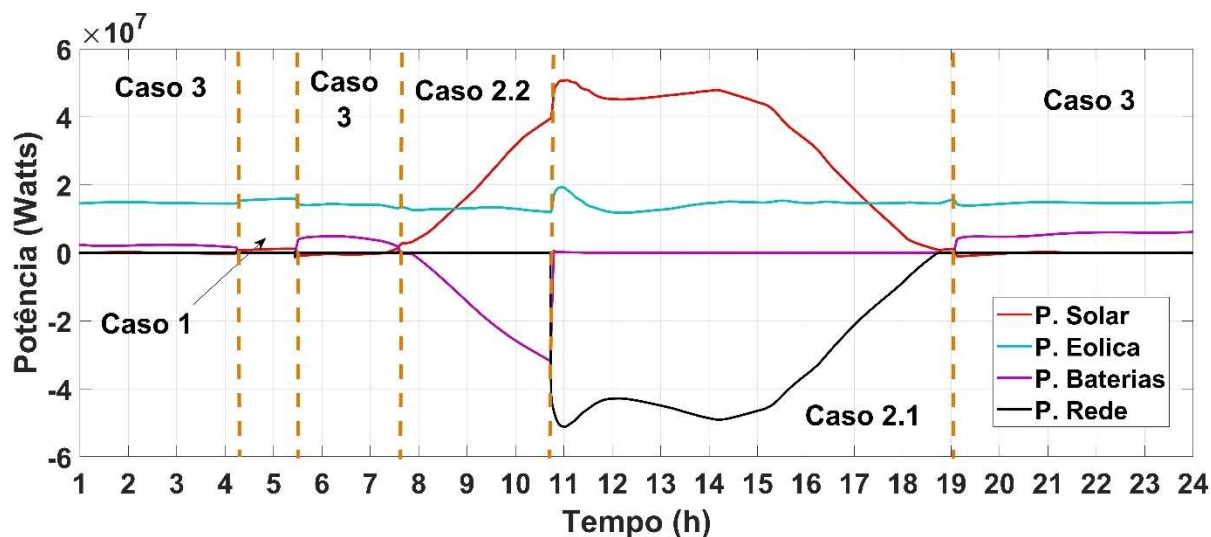


Figura 44. Funcionamento do algoritmo para as condições de geração máxima de potência.

A Figura 44 mostra que na ocorrência de um aumento significativo na geração de energia, o algoritmo responde apropriadamente, adaptando as rápidas mudanças na energia gerada, como se mostra a troca do caso 3 para o caso 1 e, em seguida, para o caso 3 novamente em pouco mais de 1 hora. Além disso, quando há mais energia disponível dá lugar a carregar as baterias na faixa de 7:42 a 10:48, para depois injetar o excedente de energia na rede até as 19 horas. Consequentemente, o constante uso do sistema de comutação gera diversas perturbações, mesmo assim pode-se detalhar que a energia fornecida à rede em comparação com a demanda, bem como a tensão e a corrente da linha, são mantidas dentro dos parâmetros desejados (Figura 45).

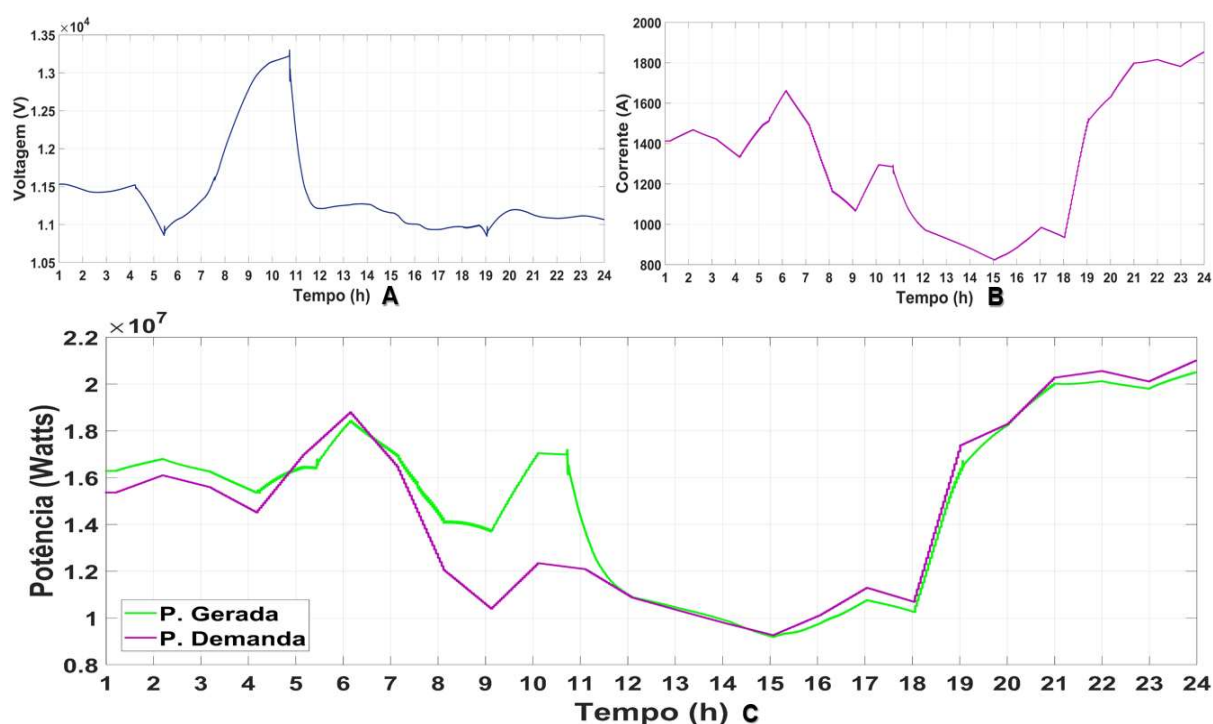


Figura 45. Curvas de Tensão (A), Corrente (B) e Potência (C) para condições de geração de potência máxima

A Figura 45, em comparação com a Figura 43, mostra a ocorrência das mudanças nas escalas de geração, devido ao fato de existir menos defasagens entre o valor da energia gerada em relação à demanda e uma menor queda de tensão (Figura 45(A)), e por sua vez, observa-se a ocorrência de um pico de geração mais alto (18,76%), mesmo sob essas condições

A partir da análise dos casos mais relevantes obtidos neste estudo foi realizado um balanço energético das curvas de potência para cada sistema de maneira individual, como também foi quantificada a potência total gerada, a energia injetada na rede e a energia usada para carregar as baterias. Estes resultados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Potências acumuladas ao longo do dia em todas as condições estudadas

Sistemas	Condições			
	Mínimas (SOC _{min} =0.8)	Mínimas (SOC _{min} =0.6)	Média	Máximas
Solar (Watts)	267.764.343	267.193.873	292.155.278	323.367.326
Eólica (Watts)	108.605.794	109.407.883	248.766.333	324.508.428
Baterias (Carga) (Watts)	75.929.437	150.448.684	44.352.000	21.923.520
Baterias (Descarga) (Watts)	69.904.423	146.819.051	31.477.469	14.585.774
Rede (Injeção) (Watts)	64.915.843	20.679.862	155.088.959	266.787.514
Rede (Respaldo) (Watts)	51.880.721	0	0	0

Os dados apresentados na Tabela 2 mostram a quantidade de energia disponível no sistema eólico e solar, sendo que a energia solar produz mais energia pelo fato de ser um sistema dimensionado para produção de 210 MW, e sob condições mais críticas ser capaz de gerar 47 MW adicionais de sua capacidade, enquanto o sistema eólico foi dimensionado para gerar 140 MW e, embora em condições críticas esteja 32 MW abaixo, este sistema é capaz de gerar mais energia que o sistema solar, em situações mais favoráveis apresentando a vantagem de necessitar uma capacidade de instalação menor. Ao mesmo tempo, pode-se notar que, mesmo ao longo do ano, está arquitetura gera energia suficiente para injetar na rede na média mais de 150 MW por dia, e sob a ação de um algoritmo de distribuição de energia, este sistema possui um ponto máximo de 266 MW, e um mínimo de 20 MW.

No caso do banco de baterias é mostrado que a energia é perdida tanto no processo de carregamento como descarregamento, devido ao fato de que a energia total de carregamento é maior que a capacidade da bateria (73,92 MW para um $SOC_{min} = 0.8$), e o descarregamento é menor que esse valor.

A somatória de energia de todo o sistema, mostra que para todos os casos há sempre uma energia remanescente de cerca de 20 MW, que são devidas as perdas associadas aos

sistemas de chaveamento, filtragem e conexão, que, conforme foi apresentado anteriormente, e estes geram perturbações nas curvas de potência de todos os sistemas. Finalmente, é evidente que, para todos os casos, a energia solar é o pilar fundamental da geração, e mesmo apesar de seu comportamento, durante o processo de geração, através deste sistema é possível se obter mais energia do que o necessário pela demanda.

5.2. Estudo de Impacto Ambiental

Uma vez estudado o componente energético da arquitetura proposta neste trabalho, é necessário detalhar a diferença existente entre um sistema tradicional de geração baseado na queima de hidrocarbonetos e outro baseado na utilização de fontes de energias renováveis, onde sua principal diferença e mais significativa é a geração de CO₂ e outros poluentes na atmosfera, também conhecido como principal elemento do efeito estufa, sendo necessário o estudo e modelagem da geração de poluentes em cada um dos sistemas utilizados na arquitetura desenvolvida.

Inicialmente, é necessário determinar as emissões de CO₂ de cada componente, desde o momento da extração de todos os materiais necessários para sua elaboração, como também seu transporte ou, em outras palavras, emissões relacionadas à infraestrutura e à cadeia de suprimentos do sistema $Em_{i\&f}$. Adicionalmente, foram consideradas as emissões relacionadas à deterioração e uso final de todos os componentes, sendo também conhecidas como emissões relacionadas ao seu ciclo de vida Em_{cv} , bem como se outros tipos de poluentes são gerados como metano Em_{met} e finalmente as emissões diretas Em_{dir} , relacionadas com o funcionamento de todos os componentes ao longo da sua vida útil; onde para os painéis fotovoltaicos é de 25 anos, as torres eólicas de 20 anos e as baterias com um SOC de 0.8 de 15 anos. Os principais resultados obtidos são apresentados na Tabela 3.

Como o primeiro ponto de análise, deverá ser considerado que os valores apresentado refletem as emissões totais para um ano e para uma potência específica como foi mostrado na equação 5.1, assim como os dados apresentados para os sistemas solar e de gás foram obtidos de (Edenhofer, Madrugá, & Sokona, 2012; Sciences, 2007), e para o sistema eólico foram

obtidos de (Daniel, 2007; IAEA, 2016) e aqueles das baterias de (Chen et al., 2017; Sullivan & Gaines, 2010).

Tabela 3. Emissões de CO2 individuais e totais dos sistemas

Fonte	Emissões (g CO2eq/kWh)				Total (tonCO2eq)
	Diretas	Infraestrutura & Cadeia de Fornecedores	Metano	Ciclo de vida	
Solar	0	66	0	48	5.9
Vento	0	15	0	11	0.3822
Baterias	0	2240.256	0	319.744	189.25
Ciclo Combinado de Gás	370	1.6	91	490	47471.4

Pode-se constatar a partir destes trabalhos que o valor total do sistema de geração de ciclo combinado é 242 vezes mais poluente que o total das renováveis, para a mesma quantidade de energia de 350 MW/dia, o que, como foi mostrado no capítulo 3, não cobrindo nem a metade da demanda diária de uma cidade com mais de 1 milhão de habitantes.

$$Em_{CO_2} = (Em_{dir} + Em_{i\&f} + Em_{met} + Em_{cv}) * N_{tot} * Pot_{tot} \quad (5.1)$$

A equação 5.1, N_{tot} é o número total de componentes usados por fonte (por exemplo, número total de painéis fotovoltaicos) e Pot_{tot} o total de energia instalada por fonte. Uma vez obtidas as emissões para o primeiro ano, a Figura 46 mostra as emissões acumuladas ao longo da vida de todos os sistemas.

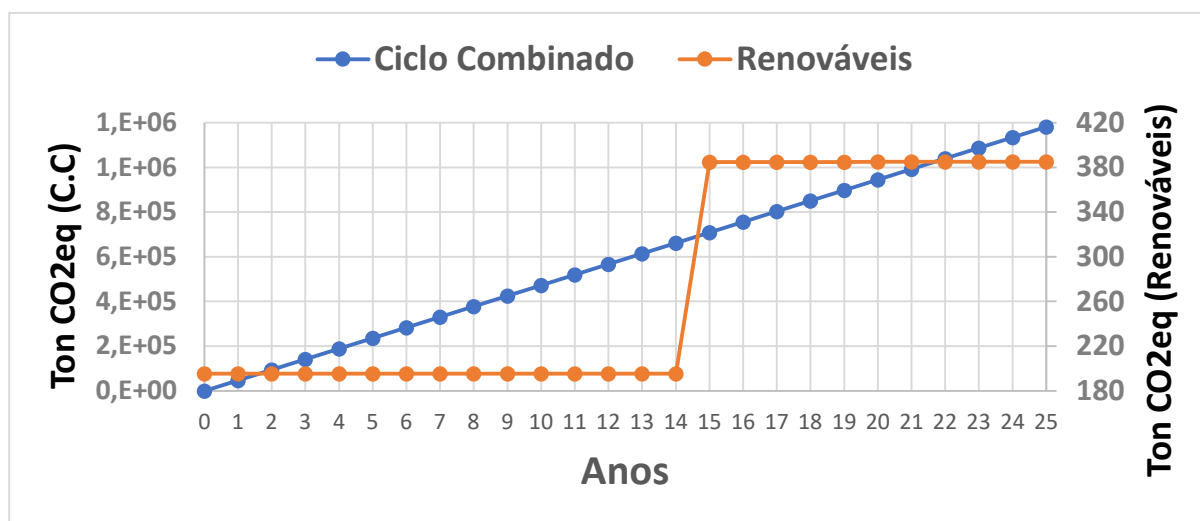


Figura 46. Emissões acumuladas de fontes renováveis em comparação com o sistema de gás de ciclo combinado

A Figura 46 mostra ao longo dos 25 anos, a estrutura desenvolvida gera na sua totalidade uma quantidade total de 385 ton CO_{2eq}, ao contrário do sistema de ciclo combinado onde 1181688 ton CO_{2eq} são gerados, portanto, este sistema gera 3068 vezes mais ton CO_{2eq}. Levando em conta esse valor e tomando como referência um país de baixa tributação de impostos de carbono e baixa compensação por créditos de carbono, com valores de 10 \$ e 5 \$ por tonelada de CO_{2eq}, respectivamente, conforme demonstrado em (Concawe, 2017; World Bank, 2018), os impostos que devem ser pagos pelo CO₂ produzido para o sistema baseado em gás contra os incentivos para o uso de energia renovável são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4. Impostos e incentivos das diferentes fontes de energia elétrica em 25 anos

Fonte	CO₂ Evitado (ton CO_{2eq})	Créditos do Carvão (USD)	Imposto do Carvão (USD)
Solar	708781.43	\$3'543'907.15	\$0.00
Eólica	472520.95	\$945'041.91	\$0.00
Ciclo Combinado	0	\$0.00	\$11'816'875.00

De acordo com os dados obtidos através da Tabela 4, é quantificada a tonelada CO_{2eq} a ser evitada (primeira coluna), com base nos dados apresentados na Figura 46, nesta coluna as emissões produzidas em cada fonte são levadas em consideração; a coluna a seguir reflete monetariamente o valor da primeira, onde pode ser evidenciado, que o uso de sistemas de combustão à base de gás representa um imposto de 472.675 \$/ano, representando uma taxa anual significativa durante sua vida útil, enquanto, por outro lado, é gerado um incentivo ao uso de energias renováveis por um montante de 179.558 \$/ano, contribuindo para a redução dos custos que podem ocorrer nestes sistemas.

5.3. Estudo Social

Outro parâmetro importante a ser analisado é o impacto social do uso de energias renováveis contra fósseis, que para quantificação, considerando que a geração de ruído pelas torres eólicas não gera um impacto social permanente e tem diferentes meios de mitigação em relação ao CO₂, esse parâmetro não é levado em consideração na análise, portanto, a relação entre o CO_{2eq} emitido por cada fonte e sua repercussão no aumento de óbitos de pessoas por

ano foi quantificada. Levando em conta que o tempo médio de vida do CO₂ na atmosfera varia de 2 a 500 anos, de acordo com as diferentes condições atmosféricas, conforme detalhado em (Archer et al., 2009). Para realizar a análise acima, é necessário determinar a relação entre o aumento do CO₂ e a temperatura média para a qual estas duas variáveis foram relacionadas levando em conta os dados dos últimos 60 anos, como mostra a Figura 47.

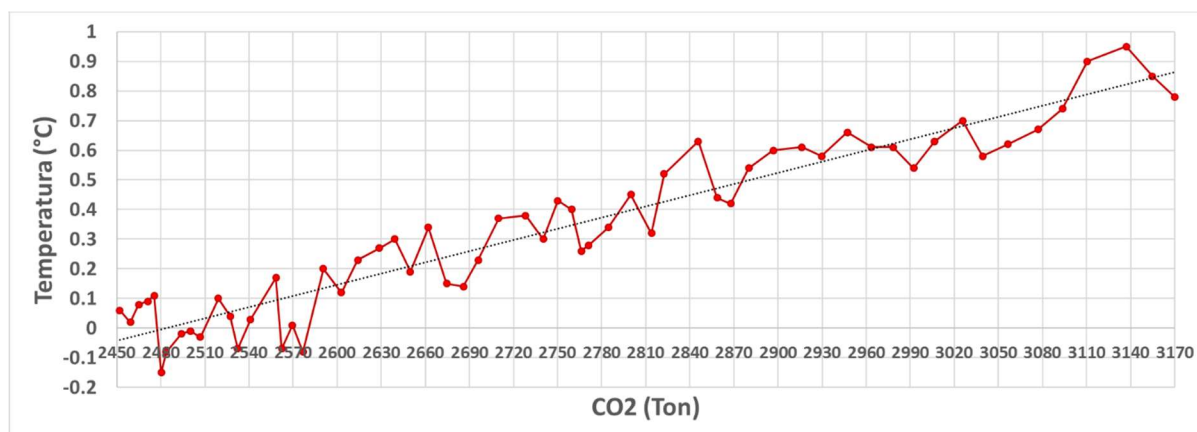


Figura 47. CO₂ da Atmosfera v.s. temperatura nos últimos 60 anos

De acordo com os dados obtidos, foi encontrada uma relação direta com uma tendência crescente, conforme detalhado nos diferentes estudos mostrados no capítulo 2, para os quais foi obtida uma regressão para quantificar essa relação, resultando na equação 5.2 com um R² de 0,9

$$\Delta T_{°C} = 0.0013CO2_{ppm} - 3.1237 \quad (5.2)$$

Através da equação 5.2, foi determinada uma relação direta entre cada Gt CO_{2eq} produzido e sua correspondente relação no aumento da temperatura, portanto, com base nos dados da Figura 46, o efeito na variação de temperatura foi obtido como resultado da produção de CO₂ em cada sistema, os dados são mostrados na Figura 48.

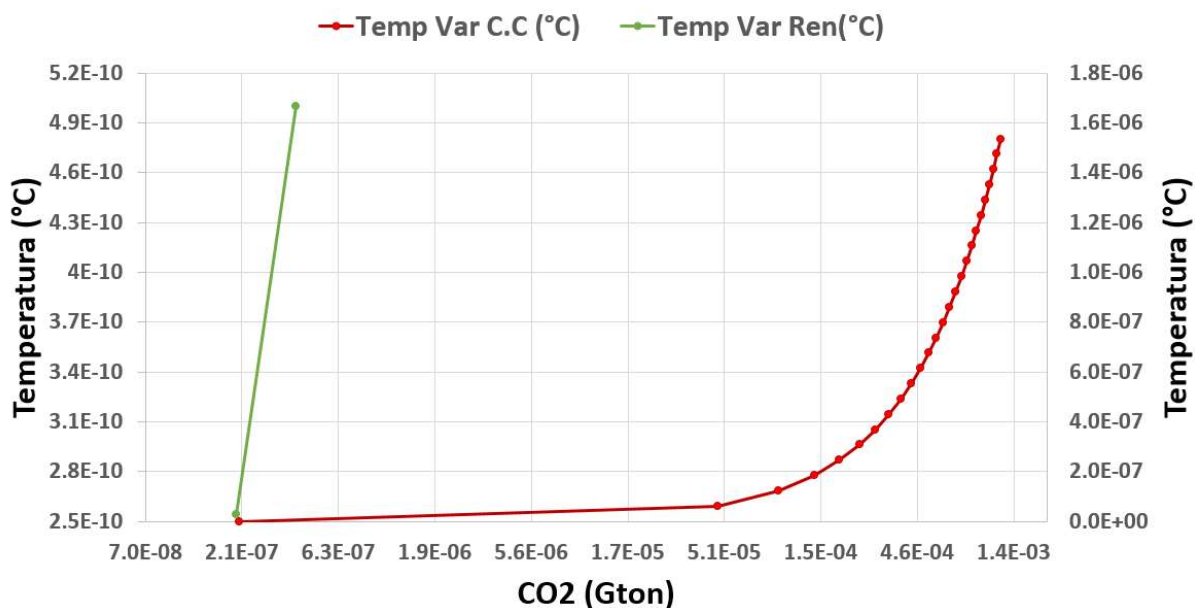


Figura 48. Relação entre Gton CO₂ produzido e a Temperatura Atmosférica

Como pode ser visto na Figura 48, a produção de CO₂ pela fonte à base de gás, que é a menos poluente entre as diferentes fontes de energia baseadas em hidrocarbonetos, gera um aumento exponencial na temperatura em comparação com o que é emitido por fontes de energia renováveis, que detalha a grande diferença entre os dois sistemas e ainda mais considerando a capacidade instalada, portanto pode-se relacionar que o resultado em uma escala maior é ainda mais significativo.

Uma vez obtido esta relação, a implicação social de que este impacto é quantificada, para o qual foi utilizado o estudo detalhado mostrado em (Carleton et al., 2018), onde um modelo foi obtido relacionando o aumento da temperatura com o aumento no número de óbitos, levando em conta que a análise mostrada diz respeito apenas aos óbitos diretos e não relaciona efeitos indiretos, como fenômenos ambientais de larga escala ou doenças indiretas como malária, por causa da variabilidade espacial destas. O estudo mencionado foi dimensionado em uma área populacional de 100 mil habitantes, tomando como parâmetro de análise o número adicional de óbitos para cada dia adicional a uma determinada temperatura acima de 20°C.

Tabela 5. Custo social acumulado para os sistemas de geração relacionado com na produção de CO₂ e o aumento do risco de mortalidade

Ano	Custo Renováveis (USD)	Custo Ciclo Combinado (USD)
0	\$8'015.5	\$8'360.3
1	\$0.0	\$1'937'967.5
2	\$0.0	\$3'875'935.0
3	\$0.0	\$5'813'902.5
4	\$0.0	\$7'751'870.0
5	\$0.0	\$9'689'837.5
6	\$0.0	\$11'627'805.0
7	\$0.0	\$13'565'772.5
8	\$0.0	\$15'503'740.0
9	\$0.0	\$17'441'707.5
10	\$0.0	\$19'379'675.0
11	\$0.0	\$21'317'642.5
12	\$0.0	\$23'255'610.0
13	\$0.0	\$25'193'577.5
14	\$0.0	\$27'131'545.0
15	\$0.0	\$29'069'512.5
16	\$15'774.1	\$31'007'480.0
17	\$0.0	\$32'945'447.5
18	\$0.0	\$34'883'415.0
19	\$0.0	\$36'821'382.5
20	\$15'789.8	\$38'759'350.0
21	\$0.0	\$40'697'317.5
22	\$0.0	\$42'635'285.0
23	\$0.0	\$44'573'252.5
24	\$0.0	\$46'511'220.0
25	\$0.0	\$48'449'187.5

Obtendo-se a média dos dados obtidos pode-se determinar o número de mortes por cada grau adicional de temperatura por dia, tomando como referência uma temperatura de 20°C. Além disso, com as mesmas informações, foi obtido um gráfico na forma de uma parábola que detalha esses efeitos de temperaturas abaixo de 0 graus Celsius, portanto, para os fins deste estudo, obteve-se a equação 5.3, levando em conta que a temperatura mínima para a cidade de Barranquilla é superior a 25 ° C.

$$Add_{MR} = 0.0019T_C^2 - 0.0639T_C + 0.5185 \quad (5.3)$$

Com base na equação 5.3 e os registros críticos de temperatura para a cidade de Barranquilla obtidos de (IDEAM; Simbaqueva Ovidio, Ayala Leonardo, 2015), onde a temperatura máxima média é 32.019°C e a média baixo condições normais de 28.36°C, onde foi possível determinar que para uma temperatura igual ao temperatura máxima pode gerar 2,85 mortes adicionais pela ano, ainda mais tendo em conta que as temperaturas já foram registradas até 40°C, conforme detalhado em (ELHERALDO, 2012). Além disso, o valor econômico por ano para ambos sistemas foi quantificado com base no valor parcial socioeconômico devido ao aumento na produção de CO₂, com base nos dados mostrados em (Carleton et al., 2018). Os resultados são apresentados na Tabela 5.

A Tabela 5 mostra que o custo social total para um período analisado de 25 anos foi de 48.449.188 \$, representando um montante anual de 1.945.968 \$, em contraste com o valor de 15.790 \$ em 25 anos, adicionando o fato de que os sistemas de energia renovável não pagam esse valor, ao contrário dos sistemas de geração baseados em combustão, mas que geram o efeito oposto da mesma forma conforme detalhado no estudo de impacto ambiental.

Além disso, esse valor reflete o custo social da vida e seu impacto no CO₂ que, para um país como USA, é de 41 \$, valor obtido de (International Actuarial Association, 2017) para realizar o cálculo mostrado na tabela, além disso, o valor mostrado neste análise é inferior em comparação ao valor estipulado pelos países onde a taxa de carbono é até 14 vezes maior.

5.4. Estudo Econômico

Na análise deste trabalho, diferentes componentes da arquitetura desenvolvida foram estudados, embora um dos elementos mais importantes na tomada de decisão para a implantação de qualquer usina de geração de energia é o item econômico do projeto, portanto, para obter uma análise detalhada, todos os sistemas foram estudados individualmente, os resultados são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6. Custos dos sistemas de geração para uma vida útil de 25 anos

Custos (USD)	Fonte			
	Solar	Eólica	Baterias	Ciclo Combinado
CAPEX	\$ 121'958'316	\$ 92'022'840	\$ 407'173'448	\$ 361'200'000
OPEX (Ano)	\$ 3'780'000	\$ 7'238'000	\$ 1'438'330	\$ 4'550'000
Imposto ao Carvão	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 472'675
Créditos ao Carvão	\$ 3'543'907	\$ 7'087'814	\$ 0	\$ 0
Custo Social	\$ 241.14	\$ 15.67	\$ 7759	\$ 1'937'968
Potência Instalada (KW)	210000	140000	73920	350000

Uma vez obtidos os custos individuais, o LCOE é calculado, por meio do qual é obtido o preço recomendado da tarifa em \$/kWh, para o qual se aplica a seguinte equação.

$$LCOE = \frac{CAPEX + \sum_{t=1}^n \frac{OPEX - C_{carv} + I_{carv} + C_{soc}}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t(1-d)^2}{(1+r)^t}} + C_{EFUEL} \quad (5.4)$$

Onde

$CAPEX$ são os custos fixos iniciais do sistema,

$OPEX$ são os custos fixos de manutenção e operação deles

C_{carv} são os incentivos ou créditos de carbono

I_{carv} são os impostos associados ao carvão

C_{soc} é o custo social explicado na seção 5.3

E_t é a potência total instalada em um ano

d é a taxa de depreciação da tecnologia utilizada

r é a taxa de desconto que foi de 7% para o sistema de energia renovável e 3% para o ciclo combinado

t o tempo em anos do projeto e

C_{EFUEL} é o LCOE da energia adicional do sistema de backup no caso de usá-lo.

Tabela 7. Relação custo/potência gerada para a arquitetura desenvolvida

Ano	LCOE				
	Solar		Eólica		Baterias
	Custos Totais (\$)	Energia (W)	Custos Totais (\$)	Energia (W)	Custos Totais (\$)
1	3400228	70919159	6729157	46992897	1344234
2	3177783	64297895	6288932	41821929	1256293
3	2969891	57105249	5877507	35989881	1174106
4	2775599	49666320	5492997	29921901	1097295
5	2594017	42287431	5133642	24012708	1025509
6	2424315	35235190	4797796	18583556	958420
7	2265715	28721450	4483922	13855596	895720
8	2117491	22895206	4190581	9942201	837121
9	1978964	17841472	3916431	6858526	782356
10	1849499	13586246	3660216	4543348	731174
11	1728503	15946623	3420762	2886680	683340
12	1615424	12630905	3196974	1756920	638636
13	1509742	9847729	2987826	1022961	596856
14	1410974	7556034	2792361	569000	557809
15	1318667	5704617	2609683	301903	524129
16	1232399	4236924	2438956	152562	1351485
17	1151775	3095149	2279398	73304	1256293
18	1076425	2223477	2130279	33431	1174106
19	1006005	1570418	1990915	14445	1097295
20	940191	1090282	1880209	5901	1025509
21	878683	743895	1738942	46992897	958420
22	821200	498699	1625180	41821929	895720
23	767476	328415	1518859	35989881	837121
24	717267	212406	1419495	29921901	782356
25	670343	134886	1326631	24012708	731174
Total	164357133	468376076	175950507	418078969	430393684

Deve-se considerar painéis e as torres eólicas tem uma taxa de depreciação baseada na tecnologia utilizada e para as baterias é baseado nas características ambientais, os ciclos de carga e descarga, portanto, para os painéis e as baterias a média é de 1% / ano (Osterwald,

Anderberg, Rummel, & Ottoson, 2002) e para as torres eólicas a média é de 1.6% / ano (Staffell & Green, 2014) .

Por outro lado, as baterias sendo uma fonte de armazenamento e não de geração, portanto, somam como custos adicionais com suas respectivas taxas de depreciação e impostos, assim, para a arquitetura desenvolvida de energia renovável é aplicada a equação 5.4.

$$LCOE = \frac{CAPEX_{totSOL} + CAPEX_{totEOL} + CAPEX_{totBATT}}{E_{totSOL} + E_{totEOL}} + C_{EFUEL} \quad (5.4)$$

Os resultados obtidos através da análise do custo energético recomendado, são apresentados na Tabela 7.

A partir dos dados apresentados na Tabela 7, e aplicando a equação 5.4, o total da LOCE obtido foi de 0.8694 \$/kWh. Aplicando-se este mesmo procedimento no sistema de ciclo combinado, resultou-se num valor de LOCE total de 0.1987 \$/kWh, devido ao alto valor do banco de baterias, já que somente o sistema solar tem uma LOCE total de 0.35 \$/kWh, e o valor total resultante é um valor líquido, portanto, não leva em conta a influência dos descontos que são feitos para o uso de energias renováveis como isenção de impostos de compra ou ajuda governamental, devido a sua grande complexidade onde foi achado nos casos analisados, é quase individual para um estado ou departamento e para o caso específico de Colômbia ainda não está disponível uma rota concreta sobre isso, embora por meio da análise do *payback* mostrado na equação 5.5, outro ponto de vista pode ser analisado.

Como foi mencionado anteriormente, o retorno de ambos os sistemas é muito diferente, sendo 4,05 vezes maior o ciclo combinado que o estudado neste trabalho, sem levar em consideração os custos fixos anuais e, no caso do sistema Energia renovável existe ainda a possibilidade da venda de energia excedente ao menor preço obtido, o que, conforme evidenciado na análise de energia, tem uma média de 150MW/dia, então o retorno da arquitetura proposta aumenta para 5.51 anos e para o ciclo combinado aumenta para 19.12 anos, portanto, embora o sistema inicialmente tenha um custo maior devido ao equipamento que requer seu fluxo de caixa é maior se o LOCE for mantido.

$$Payback_{REN} = \frac{CAPEX_{tot}}{LCOE * Pot_{tot} * 365} = 5.51 \text{ Anos} \quad (a)$$

$$Payback_{CC} = \frac{CAPEX_{tot}}{LCOE * Pot_{tot} * 365} = 19.12 \text{ Anos} \quad (b)$$

(5.5)

O sistema de energia renovável tem o poder de reduzir sua LCOE após 5.51 anos, porque, sendo uma taxa baseada no custo inicial do sistema, isso pode variar ao longo do tempo, conseguindo assim uma diminuição para 0.1687 \$ /kWh como pode ser evidenciado na Figura 49, onde com a finalidade de detalhar a evolução de ambos sistemas, os tempos de operação considerados foram de 32 anos.

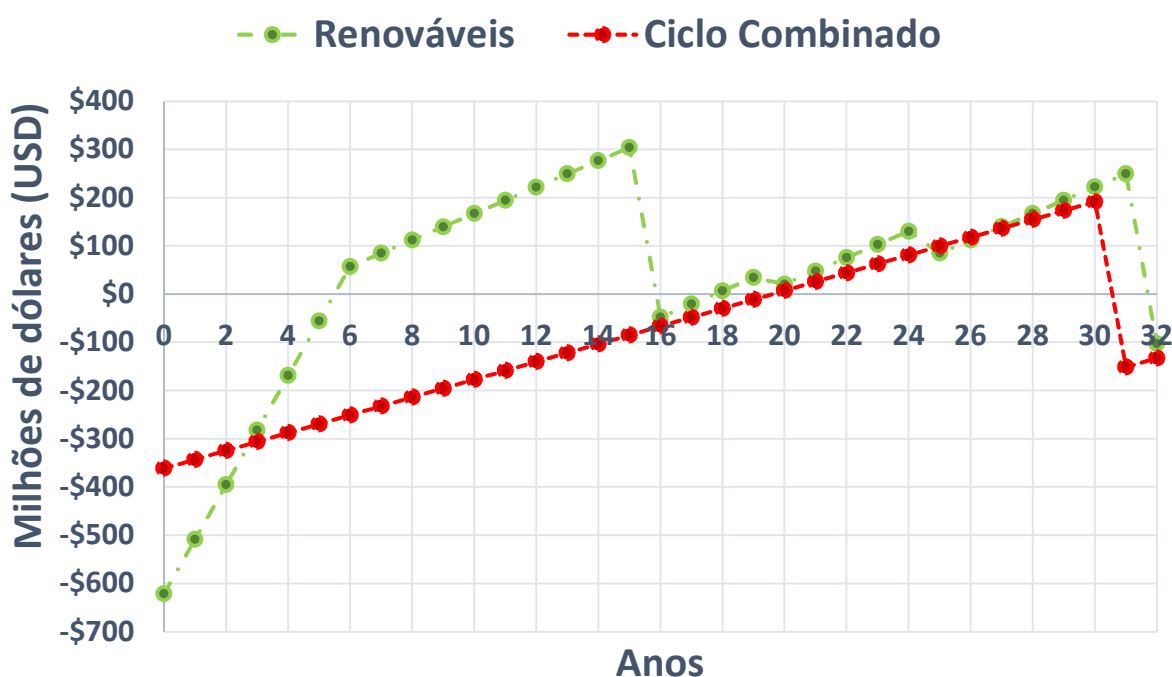


Figura 49. *Cashflow* acumulado dos sistemas de geração

Como primeiro passo são tidas em conta duas considerações feitas nos resultados obtidos a partir da Figura 49, a primeira e mais importante é que a análise de fluxo de caixa cumulativa realizada não busca obter um valor positivo por ano, como normalmente deveria, o objetivo desta análise é estabelecer, sob os mesmos parâmetros de comparação, quais são os pontos fortes e fracos financeiros que surgem em ambos sistemas, a fim de obter uma estimativa de comparação de qual é melhor e porque, por causa da análise econômica envolve muitas variáveis que podem beneficiar ou prejudicar uma ou outra, dependendo do país de análise. A segunda é que os preços de compra dos equipamentos mantêm seu valor inicial, portanto não se considera uma diminuição no preço destes nos anos futuros.

Assim, é notório que o fluxo de caixa acumulado no sistema de energia renovável tem um crescimento mais rápido devido principalmente ao aumento das receitas, mas mesmo assim, é necessário para manter a mesma taxa de 0.1987 \$/kWh, a qual é a referência deste estudo ao ser comparável com o valor real da tarifa de energia na cidade de Barranquilla como se pode ver em (EDUARDO, 2018), conseqüentemente, dependendo de cada caso específico, é importante um suporte financeiro do estado no período de retorno do investimento ou um período de pagamento mais longo do investimento.

Uma vez que esse período tenha passado, o fluxo de caixa diminui seu crescimento devido à mudança na tarifa, mas permanece com um ganho positivo entre o ano 6 e o ano 15, depois disto, um novo investimento em baterias deve ser feito novamente, portanto no ano 16 e 17 o fluxo total acumulado retorna um valor negativo, para depois continuar acrescentando, mesmo com o investimento que deve ser feito de turbinas eólicas no ano 20 e a compra de painéis solares no ano 25, a partir de então continua com uma margem de lucro até chegar ao ano 32, onde é necessário investir novamente em baterias e, portanto, volta a retornar um fluxo negativo acumulado, mas sempre por acima do fluxo de caixa do ciclo combinado.

Do lado do ciclo combinado a gás, o fluxo de caixa acumulado é negativo até o ano 19, devido à tarifa média de energia e do lucro anual, onde é de \$25.389.225.50 em comparação com \$39.897.354.36 das fontes renováveis, além disso, o fluxo de caixa anual sempre foi positivo em comparação com o das energias renováveis. Embora o acumulado fosse sempre positivo, o anuário, por outro lado, nos anos de compra de baterias retornou valores negativos, daí a importância de financiamento ou subsídio, que como se evidenciou gera uma margem de lucro menor, mas ainda o lucro permanece constante, até o ano 31, onde é necessário reinvestir em equipamentos nos dois sistemas e seus fluxos retornam valores negativos, mostrando que ambos sistemas são equivalentes sem obter subsídio, onde se fosse tomada a mesma tarifa a partir do ano 1 (o que seria equivalente para não ter subsídio na tarifa) o tempo de retorno das energias renováveis seria de 16,44 anos.

Finalmente, levando em consideração o fluxo de caixa acumulado do ano anterior para o investimento em novos equipamentos (para o ciclo combinado o ano 30 e para as energias renováveis o ano 31) foi obtido \$ 191'649'129.79 para o ciclo combinado e \$ 249'857'514.50 para as energias renováveis, sendo mostrado nesta análise, mesmo com todas as despesas envolvidas; que a utilização de fontes de energia renovável são ainda mais rentável quando utilizado a longo prazo.

5.5. Conclusão

Neste capítulo foram apresentados os principais resultados obtidos na implementação em Matlab-Simulink da arquitetura de fornecimento, controle e distribuição de energia elétrica aplicado a uma cidade de porte médio. Os resultados obtidos permitiram a validação do algoritmo proposto nesta Dissertação de Mestrado, e seu funcionamento em diferentes configurações, identificando a energia gerada, a utilizada para carregamento das baterias e para injeção à rede elétrica, e o desempenho da potência fornecida e perdida durante o processo de geração. Também foram apresentados um estudo econômico, ambiental e social estudo para a arquitetura proposta neste trabalho.

6. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Esta Dissertação de Mestrado foi desenvolvida com o propósito de modelar e simular um sistema híbrido de geração de eletricidade com base na utilização de fontes de energias renováveis com controle de distribuição com a finalidade de gerenciar o uso de energia não utilizada, armazenando-a em um banco de baterias e/ou injetando-a na rede elétrica; melhorando assim a eficiência energética e a qualidade da energia do sistema.

Como primeiro ponto de análise pode-se observar que a arquitetura projetada por meio do ambiente desenvolvido em Matlab®, simula o comportamento dos sistemas dimensionados, tais como as células fotovoltaicas, as torres eólicas, o banco de baterias de chumbo-ácido e o gerador de backup principalmente, o que, através deste ambiente, foi possível testar cada uma individualmente, obtendo-se o comportamento de cada um dos estágios de conversão e controle, com o que foi possível identificar os diferentes distúrbios e comportamentos indesejados, bem como obter um seguimento das curvas de potência e sua interação com o algoritmo projetado.

Detalhando ainda mais o comportamento da arquitetura em relação ao estudo de caso, foi possível determinar que os sistemas em conjunto são capazes de responder as diferentes perturbações e mudanças tanto na demanda de potência quanto na variabilidade climática, mantendo uma tensão de linha dentro de uma faixa de $\pm 6\%$ e um máximo de sobretensão de 20%, produzido pela comutação na troca dos sistemas de armazenamento e injeção na rede, os quais aproveitam os excessos de energia gerada, com um tempo de resposta na ordem de milissegundos e um tempo de estabilização na ordem dos minutos. Adicionalmente, pode-se observar que, à medida que os diferentes testes foram realizados, identificaram-se maneiras pelas quais era possível não depender do sistema de backup como fonte em nenhum dos casos do estudo.

Em todas as curvas obtidas foi constatado que estas possuem um intervalo de defasagem, que corresponde ao tempo de resposta e adaptação da arquitetura à demanda, com a qual foi possível identificar os excessos ou quedas na fonte de alimentação, em cada um dos sistemas de geração específicos, que, por meio do algoritmo de distribuição, foi possível administrar o excesso por meio de carregamento de bateria ou injeção de rede, e em caso de falta de potência, o algoritmo utiliza a descarga da bateria inicialmente e se fosse o caso de um $SOC = SOC_{min}$ a energia que falta é obtida através do sistema de backup, conseguindo em todos os estudos de

caso aproveitar a máxima geração possível sem descuidar em nenhum momento a demanda por energia.

Por outro lado, assim que outras tecnologias, como as baterias de lítio e as células de hidrogênio, conseguem amadurecer a ponto de serem mais viáveis que o chumbo-ácido, esta tecnologia pode servir como um meio de transição para o uso de sistemas de geração de energia mais limpa, levando em conta a velocidade com que a mudança na matriz energética deve ocorrer para um cenário mundial sustentável.

Pode-se verificar que o algoritmo obtido apresenta algumas limitações, dando lugar a melhorias, como a adição de um mecanismo de adaptação automática dos limites máximo e mínimo do SOC, conforme exigido pela demanda, bem como a operação do sistema de chaveamento com o algoritmo, devido ao fato de que gera perturbações indesejadas e picos de tensão na rede, que, com a possibilidade de detectar mudanças na geração de energia, através da previsão das diferentes variáveis climáticas, seria possível aumentar a precisão no algoritmo, implementando assim um sistema de transição menos invasiva, conseguindo reduzir as perdas de energia e os efeitos negativos na rede. Da mesma forma, a possibilidade de prever o comportamento da demanda, o que levaria a modificar o funcionamento interno do algoritmo, diminuindo a diferença entre a potência fornecida contra a demanda.

Outro aspecto a ser considerado é a implementação de sistemas de armazenamento de potência em larga escala, que representariam um grande desafio de gerenciamento de energia, mas aumentariam a capacidade de armazenamento, reduzindo custos no curso, bem como a possibilidade de obter uma base de dados do comportamento das curvas de potência de cada um dos componentes, com o objetivo de detectar as capacidades reais da instalação sobre a exigida, identificando no curso os sistemas onde há possibilidade de melhoria (aumentando da capacidade) bem como onde há possibilidade de redução (por exemplo, diminuição de painéis solares), com no propósito de aproveitar as condições climáticas específicas do local, obtendo assim a maior quantidade possível de energia ao custo mínimo.

Um dos pontos de validação mais importantes realizados durante o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa foi o estudo energético realizado na seção 5.2 onde, através da análise da curva de potência de cada um dos sistemas, foi realizado um estudo comparativo do funcionamento da arquitetura com e sem o algoritmo de distribuição, onde foi evidenciado o potencial energético das fontes renováveis estudadas, identificando a falha dos atuais sistemas de geração, onde há um excedente de energia no dia e uma falta de energia durante a noite,

produzindo instabilidade no fluxo de energia entre outros problemas, bem como a importância da ordem da arquitetura proposta e, portanto, do algoritmo desenvolvido, conseguindo o uso das baterias sem submetê-las a um estresse maior em comparação ao uso de uma topologia fonte – bateria – carga, além de poder variar os limites de carga e descarga conforme exigido pela demanda.

Outro ponto importante deste trabalho é o estudo do aspecto ambiental, para o qual foi necessário efetuar a comparação entre a arquitetura desenvolvida com o sistema de fornecimento de energia utilizado na cidade de Barranquilla, que é o ciclo combinado com base no gás natural, obtendo como resultado que a quantidade de toneladas de CO₂eq no sistemas desenvolvidos é muito inferior na sua fase inicial e quase zero na vida útil do sistema, em comparação com o comportamento das emissões por toneladas de CO₂eq do sistema de ciclo combinado, o qual na fase de inicial produz 242 mais toneladas de CO₂eq e tende a crescer exponencialmente ao longo da sua vida útil, o que levando em consideração a tendência dos países nos últimos anos com as políticas contra a mudança climática através de impostos de carbono e créditos para o carvão, estas duas tecnologias começam a se distanciar em seus benefícios, tendo por um lado um imposto anual que se aproxima aos 472.675 \$/ano contra um incentivo econômico de 179.558 \$/ano.

Do ponto de vista social, este aspecto está diretamente ligado com a quantidade de CO₂ que é produzido, o que adiciona outro fator de peso ao escolher uma tecnologia sobre a outra, onde ao executar um estudo superficial da afetação de CO₂ com no aumento do risco de mortes relacionadas com a temperatura e o custo monetário gerado para as entidades governamentais, há um custo adicional para o sistema de ciclo combinado de 1.937'968 \$/ano contra 15'790 \$/ano para as energia renováveis, tendo em conta que, como detalhado na análise, estes sistemas de geração baseados em fontes limpas não geram este gasto na realidade causam o efeito oposto, ao produzir um efeito estabilizador na temperatura e não de aumento, devido ao que a quantidade produzida é praticamente desprezível.

Do ponto de vista econômico, que atualmente é o aspecto de maior relevância, vários fatos são notados, o primeiro é que o investimento inicial é maior para o sistema de fontes renováveis, principalmente, devido à necessidade das baterias, o que quase duplica o investimento feito e tomando como referência a evolução acelerada da produção destes, o que pode causar o mesmo efeito que com os painéis fotovoltaicos e as torres eólicas onde os preços caíam exponencialmente nos próximos anos. Segundo, há uma diferença marcante no LCOE,

isto é devido à maturidade da tecnologia e quão volátil é mudá-la ao longo do tempo, devido ao fato de que para o sistema de ciclo combinado a tecnologia é madura e tem custos fixos e incerteza devido aos preços do combustível e suas reservas, enquanto, por outro lado, a tecnologia de fontes renováveis ainda é jovem, portanto os preços tendem a cair ano pela ano de forma acelerada, sem sofrer variações neste valor ao longo de sua vida útil devido ao seu "combustível".

Como terceiro aspecto importante a ser destacado, pode-se observar que o sistema de energia renovável tem uma vantagem sobre o gás, e é o pico máximo de geração de energia, que, como mostrado neste estudo, pode quase triplicar a capacidade instalada, com uma variabilidade de +/- 200 MW para o sistema eólico e mais de 50 MW para a energia solar, portanto, embora o controle e a regulação dessa energia sejam um grande desafio, essas fontes são potencialmente mais energéticas que a baseada em gás. que produz, para o caso estudado, royalties adicionais como consequência da geração adicional de energia, que, do ponto de vista comercial, significa a oportunidade de vender o excedente de energia.

Como principal conclusão, observando os resultados obtidos e os fatos mostrados no trabalho, é evidente que hoje qualquer tipo de usina de geração precisa de um financiamento ou subsídio para ser viável, e que, em termos econômicos os sistemas baseados fontes renováveis têm um período de retorno de investimento menor com opções de lucro adicionais como a implementação de diferentes modelos de negócios ou incentivos financeiros, que crescem ano após ano, tornando estes num mercado em expansão e com múltiplas saídas econômicas como é a descentralização da rede, que reduz os custos de transporte de energia. Ao contrário dos sistemas tradicionais, que se decompõem ao longo do tempo, porque sua matéria-prima é um combustível que produz uma deterioração da sua equipamentos e, portanto, gera um custo crescente, além de que o combustível é de tipo finito o que significa inevitavelmente, vai ao seu total desaparecimento, e isto adicionado aos vários problemas e custos de tipo ambiental e social, que de acordo com estudos só tendem a aumentar, o que dá conclusão final uma tecnologia limitado e já sobreexplorada, com benefícios econômicos a longo prazo e custos incrementais ao curto, contra uma tecnologia em rápida expansão, com benefícios econômicos e ambientais de curto prazo com uma fonte inesgotável, pelo menos nos próximos 5500 milhões de anos.

Referências Bibliográficas

Achaibou, N., Haddadi, M., & Malek, A. (2012). Modeling of lead acid batteries in PV systems. *Energy Procedia*, 18, 538–544. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.05.065>

Adedipe, O., Abolarin, M. S., & Mamman, R. O. (2018). A Review of Onshore and Offshore Wind Energy Potential in Nigeria. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 413(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/413/1/012039>

Agustín Vázquez, D. (2000). *Diccionario de ciencias*. Editorial Complutense. Retrieved from https://books.google.es/books?id=_5-yHvJ61eQC&pg=PA929&dq

Akarslan, F. (2012). Photovoltaic Systems and Applications. *Modeling and Optimization of Renewable Energy Systems*. <https://doi.org/10.5772/39244>

Akikur, R. K., Saidur, R., Ping, H. W., & Ullah, K. R. (2013). Comparative study of stand-alone and hybrid solar energy systems suitable for off-grid rural electrification: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 738–752. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.043>

Al-Bahadly, I. (2011). Wind Turbines, 664. <https://doi.org/10.5772/643>

Al-Masri, H., & Ehsani, M. (2015). Feasibility investigation of a hybrid on-grid wind photovoltaic retrofitting system. In *2015 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting* (pp. 1–7). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IAS.2015.7356802>

Alcaldia de Barranquilla. (2019). Alcaldía de Barranquilla. Retrieved March 12, 2019, from <https://www.barranquilla.gov.co/>

Álvarez, C. (2006). *Energía eólica*.

ANEEL. (2001). Superintendência de Regulação dos Serviços de Distribuição REVISÃO DA PORTARIA DNAEE NO 047/78 A. Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL.

Anuphappharadorn, S., Sukchai, S., Sirisamphanwong, C., & Ketjoy, N. (2014). Comparison the economic analysis of the battery between lithium-ion and lead-acid in PV stand-alone application. *Energy Procedia*, 56(C), 352–358. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.07.167>

Araujo, G. (2015). *AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO ESTUDO DE ESCOAMENTO DE AR EM UM TERRENO COMPLEXO COM DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL EÓLICO E LAYOUT DO PARQUE EM PANAMBI – RS*. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL.

Archer, D., Eby, M., Brovkin, V., Ridgwell, A., Cao, L., Mikolajewicz, U., ... Tokos, K. (2009). Atmospheric Lifetime of Fossil Fuel Carbon Dioxide. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 37(1), 117–134. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.031208.100206>

Arshad, M., & O'Kelly, B. C. (2013). Offshore wind-turbine structures: a review. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Energy*, 166(4), 139–152. <https://doi.org/10.1680/ener.12.00019>

Ausgrid. (2017). Supply quality. *Ausgrid*.

Bellia, H., Youcef, R., & Fatima, M. (2014). A detailed modeling of photovoltaic module using MATLAB. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 3(1), 53–61. <https://doi.org/10.1016/j.nrjag.2014.04.001>

Bhayo, M. A., Yatim, A. H. M., Khokhar, S., Aziz, M. J. A., & Idris, N. R. N. (2015). Modeling of Wind Turbine Simulator for analysis of the wind energy conversion system using MATLAB/Simulink. *2015 IEEE Conference on Energy Conversion, CENCON 2015*, 1, 122–127. <https://doi.org/10.1109/CENCON.2015.7409525>

Blaabjerg, F., Teodorescu, R., Member, S., Liserre, M., Timbus, A. V., & Member, S. (2006). Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, 53(5). <https://doi.org/10.1109/TIE.2006.881997>

Botero, S. B., Isaza C, F., & Valencia, A. (2010). Evaluation of methodologies for remunerating wind power's reliability in Colombia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 2049–2058. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.02.005>

BOYNUEGRI, A. R., YAGCITEKIN, B., BAYSAL, M., KARAKAS, A., & UZUNOGLU, M. (2013). Energy Management Algorithm for Smart Home with Renewable Energy Sources. In *4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives* (pp. 13–17). IEEE.

Carleton, T., Delgado, M., Greenstone, M., Houser, T., Hsiang, S., Hultgren, A., ... Zhang, A. T. (2018). Valuing the Global Mortality Consequences of Climate Change Accounting for Adaptation Costs and Benefits. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3224365>

Chen, S., Lian, Z., Li, S., Kim, J., Li, Y., Cao, L., & Liu, Z. (2017). The environmental burdens of lead-acid batteries in China: Insights from an integrated material flow analysis and life cycle assessment of lead. *Energies*, 10(12). <https://doi.org/10.3390/en10121969>

Chi, J., & Yu, H. (2018). Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen production. *Cuihua Xuebao/Chinese Journal of Catalysis*, 39(3), 390–394. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(17\)62949-8](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(17)62949-8)

CIOH. (2010). Historia || CIOH.ORG - OCEANOGRAFIA OPERACIONAL. Retrieved March 12, 2019, from <https://www.cioh.org.co/meteorologia/historia.php>

Concawe. (2017). *Using forest carbon credits to offset emissions in the downstream business*.

Connolly, D., Lund, H., & Mathiesen, B. V. (2016). Smart Energy Europe: The technical and economic impact of one potential 100% renewable energy scenario for the European Union.

Renewable and Sustainable Energy Reviews, 60, 1634–1653. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.02.025>

Conteh, F., Tobaru, S., Howlader, H. O. R., Yona, A., & Senjyu, T. (2017). Energy management systems for hybrid distributed generation sources in grid connected and stand-alone micro-grids. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 9(6). <https://doi.org/10.1063/1.4998773>

Dalla Riva, A., Hethey, J., & Vitiņa, A. (2017). *IEA Wind TCP Task 26: Impacts of Wind Turbine Technology on the System Value of Wind in Europe*. Washington.

Daniel, W. (2007). A guide to life-cycle greenhouse gas (GHG) emissions from electric supply technologies. *Energy*, 32(9), 1543–1559. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036054420700028X>

David, R. (2016). California has too much solar power. It needs another grid to share with. *Vox*. Retrieved from <https://www.vox.com/2016/4/8/11376196/california-grid-expansion>

Díaz-González, F., Sumper, A., Gomis-Bellmunt, O., & Villafañila-Robles, R. (2012). A review of energy storage technologies for wind power applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(4), 2154–2171. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.029>

Diebel James; Norda Jacob; Kretchmer Orna; (2019). Weather Spark. Retrieved March 13, 2019, from <https://es.weatherspark.com/>

Dincer, I., & Acar, C. (2014). Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(34), 11094–11111. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.12.035>

Dincer, I., & Acar, C. (2017). Smart energy systems for a sustainable future. *Applied Energy*, 194, 225–235. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.058>

Dulău, L. I., Abrudean, M., & Bică, D. (2014a). Distributed Generation Technologies and Optimization. *Procedia Technology*, 12, 687–692. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.550>

Dulău, L. I., Abrudean, M., & Bică, D. (2014b). Effects of Distributed Generation on Electric Power Systems. *Procedia Technology*, 12, 681–686. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.549>

Edenhofer, O., Madrugá, R. P., & Sokona, Y. (2012). *Renewable energy sources and climate change mitigation: Special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Technical Summary*. *Choice Reviews Online* (Vol. 49). <https://doi.org/10.5860/CHOICE.49-6309>

EDUARDO, P. (2018, July 15). Esto es lo que se paga en la factura de Electricaribe. *EL HERALDO*. Retrieved from <https://www.elheraldo.co/barranquilla/esto-es-lo-que-se-paga-en-la-factura-de-electricaribe-518588>

Electricaribe. (2012). Electricaribe energía social energía empresarial fundación electricaribe. Barranquilla: Electricaribe.

ELHERALDO. (2012, June 20). Barranquilla se calienta bajo 40 grados centígrados. *ELHERALDO.COM*. Retrieved from <https://www.elheraldo.co/local/barranquilla-se-calienta-bajo-40-grados-centigrados-71888>

Estrada Ocampo, M. C., Medrano Ahumada, D. E., & Quintero González, V. P. (2018). Análisis del Perfil de Carga Eléctrica por Estrato en la Ciudad de Barranquilla. Barranquilla: Universidad del Norte. Retrieved from <http://e-journal.uajy.ac.id/14649/1/JURNAL.pdf>

European Renewable Energy Council. (2011). *[r]evolution A SUSTAINABLE ENERGY OUTLOOK FOR JAPAN*. Retrieved from www.energyblueprint.info/

Gomis-bellmunt, O., Saeedifard, M., Member, S., Palma-behnke, R., Member, S., Jiménez-estévez, G. A., ... Hatziargyriou, N. D. (2014). Trends in Microgrid Control, 5(4), 1905–1919. <https://doi.org/10.1109/TSG.2013.2295514>

Hastik, R., Basso, S., Geitner, C., Haida, C., Poljanec, A., Portaccio, A., ... Walzer, C. (2015). Renewable energies and ecosystem service impacts. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 608–623. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.004>

IAEA. (2016). *CLIMATE CHANGE AND NUCLEAR POWER*. Austria.

IDEAM; Simbaqueva Ovidio, Ayala Leonardo, et al. (2015). *Atlas Interactivo - Radiación IDEAM*. Bogotá D.C. Retrieved from <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>

IDEAM, J. F., Ruiz Murcia, Serna Cuenca, J., & Al., E. (2015). *Atlas Interactivo - Vientos - IDEAM*. Bogotá D.C. Retrieved from <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasVientos.html>

Instituto Geografico Agustin Codazzi. (2019). GEOPORTAL | LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE COLOMBIA. Retrieved March 12, 2019, from <https://geoportal.igac.gov.co/>

International Actuarial Association. (2017). Climate Change and Mortality, (November).

IRENA. (2017). *Electricity storage and renewables: Costs and markets to 2030. Electricity-storage-and-renewables-costs-and-markets*. [https://doi.org/ISBN 978-92-9260-038-9](https://doi.org/ISBN%20978-92-9260-038-9) (PDF)

Iso, O. (2005). Solar Photovoltaic. *Workshop on Renewable Energies*, 52. <https://doi.org/10.3103/S0003701X08040038>

Jiayi, H., Chuanwen, J., & Rong, X. (2008). A review on distributed energy resources and MicroGrid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(9), 2465–2476. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.06.004>

Kanagachidambaresan, G. R., Anand, R., & Kalam, A. (2017). Perturb and Observe (P&O) based MPPT controller for PV connected brushless DC motor drive. *Proceedings - 2017 IEEE*

International Conference on Electrical, Instrumentation and Communication Engineering, ICEICE 2017, 2017-Decem(April), 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICEICE.2017.8191877>

Leng, W. A. H. Y. E. W., & Rajkumar, R. K. (2017). A NEW STATE-OF-CHARGE ESTIMATION METHOD FOR VALVE REGULATED LEAD ACID BATTERIES, *12*(3), 584–595.

Likit-Anurak, K., Uthaichana, K., Punyawudho, K., & Khunatorn, Y. (2017). The Performance and Efficiency of Organic Electrolyte Redox Flow Battery Prototype. *Energy Procedia*, *118*, 54–62. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.012>

Lund, H. (2014). Renewable Energy Systems - A Smart Energy Systems Approach to the Choice and Modelling of 100 % Renewable Solutions. *Chemical Engineering Transactions, Italian Association of Chemical Engineering*, *39*(January), 292. <https://doi.org/10.3303/CET1439001>

Lund, H., Duic, N., Østergaard, P. A., & Mathiesen, B. V. (2016). Smart energy systems and 4th generation district heating. *Energy*, *110*, 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.105>

Lund, H., Østergaard, P. A., Connolly, D., & Mathiesen, B. V. (2017). Smart energy and smart energy systems. *Energy*, *137*, 556–565. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.123>

Mariam, L., Basu, M., & Conlon, M. F. (2016). Microgrid: Architecture, policy and future trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *64*, 477–489. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.037>

Martander, O. (2002). *DC Grids for Wind Farms. Department of Electric Power Engineering. CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY.*

Martin-Martínez, F., Sánchez-Miralles, A., & Rivier, M. (2016). A literature review of Microgrids: A functional layer based classification. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *62*, 1133–1153. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.025>

Mathiesen, B. V., Lund, H., Connolly, D., Wenzel, H., Østergaard, P. A., Möller, B., ... Hvelplund, F. K. (2015). Smart Energy Systems for coherent 100% renewable energy and transport solutions. *Applied Energy*, *145*, 139–154. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.075>

MathWorks. (2018). Stateflow - MATLAB & Simulink. Retrieved December 3, 2018, from <https://www.mathworks.com/products/stateflow.html>

Ministerio de Minas y Energía. (2013). Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE). Bogotá, Colombia. Retrieved from <http://www.minminas.gov.co/documents/10180/712360/Anexo+General+del+RETIE+2013.pdf/14fa9857-1697-44ed-a6b2-f6dc570b7f43>

Mondol, J. D., Yohanis, Y., Smyth, M., & Norton, B. (2006). Long term performance analysis of a grid connected photovoltaic system in Northern Ireland. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.03.026>

NASA; Pawson Steven; (2019). MERRA-2. *Space Flight Center*. Greenbelt. Retrieved from <https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/>

OLIVEROS, M. Á. A. (2017). *ANÁLISIS EN LA EJECUCIÓN DE UN SISTEMA DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICO EN UNA VIVIENDA DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ*. UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS, FACULTAD DE ADMINISTRACIÓN DE EMPRESAS. UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS.

Osterwald, C. R., Anderberg, A., Rummel, S., & Ottoson, L. (2002). Degradation analysis of weathered crystalline-silicon PV modules. *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, (May), 1392–1395. <https://doi.org/10.1109/pvsc.2002.1190869>

Pellow, M. A., Emmott, C. J. M., Barnhart, C. J., & Benson, S. M. (2015). Hydrogen or batteries for grid storage? A net energy analysis. *Energy and Environmental Science*, 8(7), 1938–1952. <https://doi.org/10.1039/c4ee04041d>

Pesaran H.A, M., Huy, P. D., & Ramachandaramurthy, V. K. (2017). A review of the optimal allocation of distributed generation: Objectives, constraints, methods, and algorithms. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75(September 2015), 293–312. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.071>

Raquel Gálvez Román. (2005). Diseño y cálculo preliminar de la torre de un aerogenerador. Retrieved from <http://e-archivo.uc3m.es:8080/handle/10016/12046>

REN21. (2018). *Renewable Energy Policy Network Renewables 2018: Global Status Report*. <https://doi.org/978-3-9818911-3-3>

RODRIGUES JUNIOR, A., & MICHELS RIBEIRO, L. (2018). *ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA PARA MÉTODO ALTERNATIVO DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA*. UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA. Retrieved from <http://e-journal.uajy.ac.id/14649/1/JURNAL.pdf>

Sabzehgar, R. (2017). Overview of Technical Challenges, Available Technologies and Ongoing Developments of AC/DC Microgrids. *Development and Integration of Microgrids*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.69400>

Santana-Rodríguez, G., Vigil-Galan, O., Jimenez-Olarte, D., Contreras-Puente, G., Monroy, B. M., & Escamilla-Esquivel, A. (2013). Evaluation of a grid-connected photovoltaic system and in-situ characterization of photovoltaic modules under the environmental conditions of Mexico city. *Revista Mexicana de Física*, 59(2), 88–94.

Santos, J., Cabrera, M., & López, A. (2014). *CÁLCULO DE UN SISTEMA EÓLICO-FOTOVOLTAICO PARA ALIMENTAR CARGAS AISLADAS EN CORRIENTE ALTERNA*. INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL ESCUELA.

Sarkar, M. R., Julai, S., Tong, C. W., Chao, O. Z., & Rahman, M. (2015). Mathematical

modelling and simulation of induction generator based wind turbine in MATLAB/SIMULINK. *ARN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 10(22), 17276–17280.

Scarabelot, L. T., Rambo, C. R., & Rampinelli, G. A. (2018). A relative power-based adaptive hybrid model for DC/AC average inverter efficiency of photovoltaics systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92, 470–477. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.099>

Sciences, E. (2007). Greenhouse-gas Emissions from Solar Electric- and Nuclear Power: A Life-cycle Study Vasilis M. Fthenakis 1,2, * and Hyung Chul Kim 1 1. *Cycle*, 17–39.

Shivarama Krishna, K., & Sathish Kumar, K. (2015). A review on hybrid renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 907–916. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.187>

Singh, B., & Sharma, J. (2017). A review on distributed generation planning. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76(March), 529–544. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.034>

Somma, M. Di, Yan, B., Bianco, N., Luh, P. B., Graditi, G., Mongibello, L., & Naso, V. (2016). Multi-objective operation optimization of a Distributed Energy System for a large-scale utility customer. *Applied Thermal Engineering*, 101, 752–761. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.02.027>

Staffell, I., & Green, R. (2014). How does wind farm performance decline with age? *Renewable Energy*, 66, 775–786. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.10.041>

Suarez, J. A. (2003). Medición de la Calidad de la Energía. Argentina: Facultad de Ingeniería UNMdP. Retrieved from http://www3.fi.mdp.edu.ar/electrica/archivos/medicion_calidad_energia.pdf

Suleman, F., Dincer, I., & Agelin-Chaab, M. (2016). Comparative impact assessment study of various hydrogen production methods in terms of emissions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(19), 8364–8375. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.12.225>

Sullivan, J. L., & Gaines, L. (2010). A review of battery life-cycle analysis : state of knowledge and critical needs. <https://doi.org/10.2172/1000659>

Sumathi, S., Ashok Kumar, L., & Surekha, P. (2015). *Solar PV and Wind Energy Conversion Systems: An Introduction to Theory, Modeling with MATLAB/SIMULINK, and the Role of Soft Computing Techniques*. *Green Energy and Technology*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-14941-7>

Tagare, D. M. (2011). *Electric Power Generation - The Changing Dimensions*. (IEEE, Ed.), *Regulatory Reform of Public Utilities*. New Jersey: WILEY.

The Wind Power, & PIERROT, M. (2019). Base de datos de energía eólica. Retrieved March 20, 2019, from https://www.thewindpower.net/index_es.php

Theo, W. L., Lim, J. S., Ho, W. S., Hashim, H., & Lee, C. T. (2017). Review of distributed

generation (DG) system planning and optimisation techniques: Comparison of numerical and mathematical modelling methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 531–573. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.063>

TopSun. (2018). TOPSUN Catalogue. Jeollanam: TopSun.

Torres-Moreno, J. L., Gimenez-Fernandez, A., Perez-Garcia, M., & Rodriguez, F. (2018). Energy management strategy for micro-grids with PV-battery systems and electric vehicles. *Energies*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/en11030522>

Ugena, A. (2014). *Diseño de un circuito cargador de baterías para panel solar con seguimiento del punto óptimo de carga*. Universidad Carlos III de Madrid. Retrieved from https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/22551/PFC_alejandro_ugena_ortiz_2014.pdf

Unamuno, E., & Barrena, J. A. (2015). Hybrid ac/dc microgrids - Part I: Review and classification of topologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 1251–1259. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.194>

UPME; Ramírez Carrero, R. H. et al; (2017). *Proyección De Demanda De Energía Eléctrica Y Potencia Máxima En Colombia*. Bogotá D.C.

WEG. (2017). *Aerogeradores AGW 110/2.1*. Jaraguá do Sul.

Wind Europe. (2019). Wind energy in Europe in 2018: Trends and statistics.

World Bank. (2018). *State and Trends of Carbon Pricing 2018*. *Zeitschrift für Orthopädie und ihre Grenzgebiete* (Vol. 137). <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1218-7>

Wu, Q., Ren, H., Gao, W., & Ren, J. (2016). Multi-objective optimization of a distributed energy network integrated with heating interchange. *Energy*, 109, 353–364. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.04.112>

Wu, Y. K., Han, G. Y., & Lee, C. Y. (2013). Planning 10 onshore wind farms with corresponding interconnection network and power system analysis for low-carbon-island development on Penghu Island, Taiwan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, 531–540. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.043>

Xu, L., Pang, M., Zhang, L., Pogonietz, W. R., & Marathe, S. D. (2018). Life cycle assessment of onshore wind power systems in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 132(June 2017), 361–368. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.06.014>

Zarza Rios, Á. (2015). *Dimensionado y análisis de modos de operación de una planta de producción de hidrógeno basado en energía eólica*. Universidad de Sevilla.

Zhang, J., Chen, C., Zhang, X., & Liu, S. (2016). Study on the Environmental Risk Assessment of Lead-Acid Batteries. *Procedia Environmental Sciences*, 31, 873–879. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.02.103>

Zhang, W., Yang, J., Wu, X., Hu, Y., Yu, W., Wang, J., ... Kumar, R. V. (2016). A critical review on secondary lead recycling technology and its prospect. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 61, 108–122. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.046>

Zou, H. (2012). *Development of a Recycling Process for Li-Ion Batteries*. WORCESTER POLYTECHNIC INSTITUTE. Retrieved from <https://web.wpi.edu/Pubs/ETD/Available/etd-042412-153435/unrestricted/hyzou.pdf>