

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**CENÁRIOS DE GERAÇÃO RENOVÁVEL EM  
FERNANDO DE NORONHA**

**EDUARDO FONTES SILVEIRA**

**ORIENTADOR: TAYGOARA FELAMINGO DE OLIVEIRA**

**CO-ORIENTADOR: ANTONIO BRASIL JUNIOR**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS**

**PUBLICAÇÃO: ENM.DM-204A/2013**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**CENÁRIOS DE GERAÇÃO RENOVÁVEL EM  
FERNANDO DE NORONHA**

**EDUARDO FONTES SILVEIRA**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE  
MESTRE EM CIÊNCIAS MECÂNICAS.**

**APROVADA POR:**

---

**Prof. Taygoara Felamingo de Oliveira, PhD (ENM-UnB)  
(Orientador)**

---

**Prof. Mario Benjamim Baptista de Siqueira, PhD (ENM-UnB)  
(Examinador Interno)**

---

**Prof. Anésio de Leles Ferreira Filho, PhD (ENE-UnB)  
(Examinador Externo)**

**BRASÍLIA/DF, 14 DE OUTUBRO DE 2013**

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

SILVEIRA, EDUARDO FONTES

Cenários de geração renovável em Fernando de Noronha [Distrito Federal] 2013.

xvii, 93p., 210 x 297 mm (ENM/FT/UnB, Mestre, Ciências Mecânicas, 2013).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Geração Renovável

2.HOMER Software

3.Fernando de Noronha

4.Veículo Elétrico

I. ENM/FT/UnB

II. Título (série)

## **REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

SLIVEIRA, E. F. (2013). Cenários de geração renovável em Fernando de Noronha. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas, Publicação ENM.DM – 204A/2013, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 93p.

## **CESSÃO DE DIREITOS**

AUTOR: Eduardo Fontes Silveira

TÍTULO: Cenários de geração renovável em Fernando de Noronha.

GRAU: Mestre

ANO: 2013

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Eduardo Fontes Silveira  
Rua João Rouver, nº 237, apto 302, Centro.  
85.851-300 Foz do Iguaçu – PR – Brasil.

## **AGRADECIMENTOS**

*Agradeço primeiramente a Deus por me dar força para cumprir mais esta etapa;*

*Agradeço a minha esposa Rachel Silveira e filha Isabela Silveira por todo carinho, amor e compreensão durante este tempo;*

*Agradeço aos meus pais José Eduardo Silveira e Denise Silveira por me ajudar a ser a pessoa que sou hoje e oportunizar meus estudos;*

*Agradeço a meus superiores hierárquicos Neusa Maria Lobato Rodrigues e Celso Ribeiro Barbosa de Novais pelo incentivo e apoio irrestritos e permanentes;*

*Agradeço ao meu orientador Taygoara Felamingo de Oliveira e co-orientador Antonio Brasil Junior por dedicarem tempo e empenho em prol da minha formação.*

## RESUMO

### CENÁRIOS DE GERAÇÃO RENOVÁVEL EM FERNANDO DE NORONHA

O presente trabalho apresenta a construção de vários cenários possíveis para a substituição da matriz energética do Arquipélago de Fernando de Noronha (FN), hoje totalmente apoiada na geração térmica a diesel, por energias renováveis.

Para realização do trabalho utilizou-se o software *HOMER*, dedicado a associar aspectos energéticos de engenharia a variáveis econômicas. Por meio dessa ferramenta é possível comparar diferentes combinações de tamanhos e quantidades de componentes energéticos, ou mesmo explorar como as variações na disponibilidade de recursos e nas configurações do sistema afetam o custo de instalação e operação em diferentes projetos de sistema.

A ilha de FN possui 4,2 MW de potência instalada na forma de geradores térmicos para suprir uma demanda de carga média de 1,8 MW. No trabalho, foram construídos cenários utilizando painéis fotovoltaicos, geradores eólicos, conversores de energia e sistemas de armazenamento. Foi também simulado um cenário englobando um aumento na demanda de carga causado pela substituição hipotética de toda a frota veicular movida a motores de combustão interna de FN por Veículos Elétricos (VEs).

Observou-se que no primeiro momento é difícil abandonar totalmente a geração diesel sem um grande esforço de investimento de capital inicial. No entanto, as simulações mostraram que um sistema híbrido com 67% de energias renováveis, já é perfeitamente viável para FN. Além disso, comparando-se com o sistema atual, esse sistema reduz em mais de 6 milhões de dólares o custo operacional anual e cerca de 70% da emissão de gases do efeito estufa.

O estudo também revelou que a substituição da frota de veículos insulares por veículos elétricos reduziria quase 2 mil toneladas de emissão de CO<sup>2</sup> atmosférico reduzindo, por consequência, a pegada ecológica da ilha. E, além de correta ambientalmente, essa mudança é salutar energeticamente, uma vez que a eficiência dos motores elétricos é maior que a dos motores movidos à combustão interna. Além disso, é também economicamente vantajoso, pois reduz o custo inicial do sistema em até 14 milhões de dólares, uma vez que as baterias dos próprios carros podem servir de sistemas de armazenamento num conceito *smart grid*.

## **ABSTRACT**

### **SCENARIOS OF RENEWABLE GENERATION IN FERNANDO DE NORONHA**

This work presents the construction of several possible scenarios for replacement of the energy matrix from Arquipélago de Fernando de Noronha (FN), which is currently fully supported on thermal diesel generation, by renewable energy.

To carry out this work, it was used the HOMER software, that is dedicated to associate energy aspects of engineering with economic variables. By using this tool it's possible to compare different sizes and quantities for the energy components, or even explore how the variations on the availability of the resources and on systems configurations affect the installation and operation costs in different projects.

The FN island has 4,2 MW installed power in thermal generators to meet the load demand of 1,8MW. In this work, were built several scenarios consisting of photovoltaic panels, wind generators, energy converters and storage systems. It was also simulated another scenario comprising an increase in the load demand, caused by the hypothetical substitution of the entire combustion vehicle fleet of FN for Electric Vehicles (EVs).

It was found that is difficult to totally abandon the diesel generation without making a huge initial investment at this moment. However, the simulations showed that a hybrid system with 67% of renewable energy assets is in all means feasible for FN. Furthermore, compared to the actual situation, this system reduces the annual operation cost in 6 million dollars, and reduces the greenhouse gas emission around 70%.

The study also showed that the substitution of the insular vehicle fleet for an electric one would reduce the CO<sup>2</sup> emission about 2 thousand tons, which, in consequence, reduces the ecological footprint of the island. And, apart from being environmentally friendly, this change proved to be energetically advantageous, taking into account that electric engines have a higher efficiency than the combustion ones. Futhermore, it is economically advantageous too because it reduces the initial cost for this system up to 14 million dollars, using the batteries of these cars as storage systems, applying the smart grid concept.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Capacidade fotovoltaica no mundo (International Energy Agency - IEA, 2011)
- Figura 2 – Produção de energia fotovoltaica por segmento
- Figura 3 – Percentuais Nacionais de fabricação de módulos fotovoltaicos
- Figura 4 – Evolução da capacidade eólica mundial
- Figura 5 – Principais parceiras e modelo idealizado
- Figura 6 – Exemplo de configuração Smart Grid
- Figura 7 - Sistema V2G (vehicle to grid)
- Figura 8 – Sistema Interligado Nacional - Curva de Demanda de 14/05/2008
- Figura 9 – Sistema Interligado Nacional – Horário de Pico no dia 14/05/2008
- Figura 10 – Variação horária da carga no dia de pico (5/08/06)
- Figura 11 – Variação horária da carga no dia de menor demanda (17/04/06)
- Figura 12 – Distribuição de frequência horária de velocidade média do vento
- Figura 13 – Sistema ligado ao barramento AC
- Figura 14 – Custos do sistema híbrido para MACS 0% e MRF 0%
- Figura 15 – Energia produzida pela turbina eólica (verde) e pelos geradores diesel (preto)
- Figura 16 - Sistema híbrido otimizado pelo custo equivalente (\$/kW)
- Figura 17 – Barramentos AC/DC do sistema a ser simulado
- Figura 18 – Carga diária num dia típico de inverno e verão, respectivamente
- Figura 19 – Radiação Solar durante um ano típico
- Figura 20 – Distribuição de vento simulada para a ilha de St. Martin
- Figura 21 – Energia produzida pelos painéis FV (amarelo), pelos geradores eólicos (verde) e pelo gerador diesel (preto)
- Figura 22 – Otimização com custo do diesel e veloc. de vento variáveis e radiação solar fixa
- Figura 23 – Otimização com custo do diesel e radiação solar variáveis e veloc. de vento fixa
- Figura 24 – Medidas mensais de velocidade de vento
- Figura 25 – Medidas mensais da radiação solar
- Figura 26 - Contribuição energética mensal das fontes no sistema híbrido ótimo

Figura 27 – Efeito do preço do diesel no sistema contendo ou não energias renováveis

Figura 28 – Representação gráfica das três principais análises do modelo

Figura 29 – Exemplo de simulação horária

Figura 30 – Tela mostrando resultados em ordem crescente de NPC

Figura 31 – Tela apresentado resultados de forma categorizada

Figura 32 – Analogia da carga adiável ou deferrable

Figura 33 – Mapa da ilha de FN com destaque para áreas de preservação ambiental

Figura 34 – Tanques de armazenamento e um dos grupos geradores diesel

Figura 35 – Simulação apenas com os geradores diesel

Figura 36– Tela com a emissão de poluentes no sistema apenas com geradores diesel

Figura 37 – Insolação obtida no modelo computacional

Figura 38 – Dados de velocidade de vento coletados

Figura 39 – Energia produzida por cada fonte no sistema híbrido

Figura 40 – Quantidade de energia gerada por cada fonte

Figura 41 – Comparação dos Sistemas

Figura 42 – Comparação do Custo Presente Líquido

Figura 43 – Comparação do Custo Equivalente e Uso de Renováveis

Figura 44 – Comparação dos Sistemas com mais de 50% de renováveis

Figura 45 – Comparação do Custo Presente Líquido nos sistemas renováveis

Figura 46– Comparação do Custo Equivalente nos Sistemas Renováveis

Figura 47 – Tela com a emissão de poluentes no sistema híbrido otimizado

Figura 48 – Análise de sensibilidade Baterias x Diesel

Figura 49 – Análise de sensibilidade Painel Solar x Diesel

Figura 50 – Crescimento de automóveis até 2007

Figura 51 – N° de automóveis per capita nas ilhas (ENOCH, M.P, WARREN, J.P., 2008)

Figura 52 – Número de Veículos em F. Noronha

Figura 53 – Emissão de CO<sup>2</sup> medida no modelo computacional

Figura 54 – Emissão de CO<sup>2</sup> considerando emissão do modelo mais a emissão veicular

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 – Energia fotovoltaica: capacidade instalada total
- Tabela 2 – Módulos Fotovoltaicos produzidos em 2010
- Tabela 3 – Capacidade Eólica Instalada em 2011
- Tabela 4 – Pequenas Turbinas Eólicas
- Tabela 5 – Disponibilidade e Custo de Matéria-Prima no planeta (DUSTMANN, 2009)
- Tabela 6 – Dados de custos locais dos geradores
- Tabela 7 – Dados de demanda energética
- Tabela 8 – Dados econômicas e parâmetros de sensibilização
- Tabela 9 – Parâmetros dos Painéis Solares
- Tabela 10 – Redes de alimentação da Ilha ( Governo do Estado de Pernambuco, 2009)
- Tabela 11 – Dados dos Geradores Diesel
- Tabela 12 – Dados do Pannel Solar Fotovoltaico
- Tabela 13 – Dados do Inversor
- Tabela 14 – Dados da turbina eólica
- Tabela 15 – Dados da Bateria ZEBRA
- Tabela 16 – Componentes dos Sistemas Renováveis Simulados
- Tabela 17 – Fazendo a equivalência de autonomia de bateria
- Tabela 18 – Comparação entre o Sistema Híbrido 67% e o sistema ótimo com VE

# SUMARIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>3</b>
1.1 JUSTIFICATIVA .....	3
1.2 OBJETIVOS.....	5
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	5
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>6</b>
2.1 SISTEMAS HÍBRIDOS DE ENERGIA .....	6
2.1.1 Energia Solar Fotovoltaica.....	7
2.1.2 Energia Eólica .....	12
2.2 VEÍCULOS ELÉTRICOS, SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO E SMART GRID .....	16
2.2.1 Armazenamento de energia.....	17
2.2.2 Smart Grid .....	19
2.3 MODELO COMPUTACIONAL APLICADO A SISTEMAS HÍBRIDOS.....	23
2.3.1 Vila rural na Algéria.....	24
2.3.2 Ilha de St. Martin (Bangladesh) .....	29
2.3.3 Vilarejo na Arábia Saudita .....	34
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>38</b>
3.1 SIMULAÇÃO, OTIMIZAÇÃO E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE .....	39
3.1.1 Simulação.....	39
3.1.2 Otimização .....	40
3.1.3 Análise de Sensibilidade .....	42
3.2 MODELAMENTO FÍSICO .....	43
3.3 RECURSOS .....	45
3.3.1 Recurso Solar.....	45
3.3.2 Recurso Eólico.....	46
3.3.3 Combustível.....	46
3.4 COMPONENTES .....	47
3.4.1 Conjunto de painéis solares (PV Array) .....	47
3.4.2 Turbinas Eólicas .....	48
3.4.3 Geradores.....	49
3.4.4 Banco de baterias.....	51

3.4.5	Conversores .....	52
3.5	MODELAMENTO ECONÔMICO .....	53
<b>4.</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DA ILHA DE FERNANDO DE NORONHA .....</b>	<b>55</b>
4.1	LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS .....	55
4.2	OCUPAÇÃO DA ILHA E ASPECTOS SÓCIO-ECONÔMICOS .....	58
4.3	A PEGADA ECOLÓGICA DE FERNANDO DE NORONHA .....	59
4.4	CENÁRIO ENERGÉTICO E DESAFIOS.....	62
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>65</b>
5.1	SISTEMA ENERGÉTICO ATUAL.....	65
5.2	SISTEMA ENERGÉTICO HÍBRIDO .....	68
5.2.1	<i>Híbrido Diesel e Fotovoltaico .....</i>	<i>68</i>
5.2.2	<i>Híbrido Fotovoltaico e Eólico.....</i>	<i>70</i>
5.2.3	<i>Híbrido Fotovoltaico, Eólico e com armazenamento por Baterias.....</i>	<i>73</i>
5.3	ENCONTRANDO UM SISTEMA ÓTIMO .....	74
5.4	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE NO MODELO ÓTIMO .....	81
5.5	SISTEMA ÓTIMO COM FROTA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS .....	84
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>90</b>
<b>7.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>92</b>

# 1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho apresenta um estudo pormenorizado de viabilidade para a substituição da energia térmica (hoje responsável por 100% da energia da ilha de Fernando de Noronha) por energia de fontes renováveis abundantes em Fernando de Noronha. Além disso, contribuindo para o caráter inovador do trabalho, este englobará também o impacto de um aumento de demanda energética causado pela substituição da frota de carros hoje existente na ilha, por uma frota de veículos elétricos.

Para realização desses estudos utilizou-se um modelo computacional que relaciona aspectos de engenharia a variáveis econômicas de modo a construir caminhos e cenários para implementação de projetos de engenharia de maneira viável economicamente. Os cenários foram construídos usando parâmetros reais de equipamentos e recursos e depois simulados computacionalmente de modo a aferir sua viabilidade.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

As Energias Renováveis (ER) são um componente em expansão na rede elétrica em todo o mundo, e são responsáveis por quase 20% da energia mundial (Worldwide electricity production from renewable energy sources - Stats and figures, 2012). Além disso, elas contribuem na redução da emissão de CO<sub>2</sub>, possuem reservas praticamente ilimitadas e democratizam o acesso e a geração desse bem.

De acordo com recente relatório da Comissão Eletrotécnica Internacional (International Electrotechnical Commission - IEC, 2012), para vencer o desafio de disponibilizar energia e preservar o meio ambiente, os principais aspectos são: estabilizar o impacto climático causado pela utilização da energia fóssil; atender a demanda de energia de uma população em crescimento; fornecer energia a mais de 1,6 bilhão de pessoas que ainda são privadas deste bem; assegurar acesso à energia estável e segura para todas as nações; e transportar energia por longas distâncias, ou seja, de onde ela foi gerada até onde ela é efetivamente utilizada.

As ERs estão conectadas a todos esses desafios e é crucial adaptar a matriz energética mundial a uma nova realidade ambiental, econômica e social. Globalmente a participação das

energias renováveis tem crescido substancialmente e irão continuar crescendo por pelo menos duas décadas (International Electrotechnical Commission - IEC, 2012).

Pela menor concentração dos recursos naturais utilizados como fontes renováveis, elas são capazes de prover maior segurança energética aos países que as utilizam, e seu aproveitamento em maior escala é um dos principais instrumentos de combate às mudanças climáticas decorrentes do aumento da concentração dos gases de efeito estufa na atmosfera. E além de prover esses benefícios, as fontes de energia renováveis, se implantadas apropriadamente, podem também contribuir para o desenvolvimento social e econômico, para a universalização do acesso à energia e para a redução de efeitos nocivos ao meio ambiente e à saúde.

Internacionalmente, as principais iniciativas são: taxaço da emissão de gases de efeito estufa bem como pactuaço de limites para tais emissões; metas de inclusão proporcional das ERs na quantidade de energia vendida; incentivos fiscais para geraço e novas instalaçoes de ERs; o desenvolvimento da tecnologia Smart Grid permitindo maior participaço das ERs, e a agressiva retirada de subsídios aos combustíveis fósseis.

No Brasil, há vários incentivos para as Pequenas Centrais Hidrelétricas, Centrais Eólicas e para usinas de Biomassa que injetam até 30 MW de potência nas redes de distribuição e transmissão. Os leilões de energia já realizados proporcionaram a expansão dessas fontes, especialmente a eólica, a preços módicos para o consumidor.

Conforme outros sistemas insulares, a geraço de energia de Fernando de Noronha encontra-se baseada na importaço de combustível fóssil, sujeitando-se, portanto, à “tirania da distância”, onde o custo de transporte e o controle de riscos de todo o sistema de abastecimento, distribuição e armazenamento, projetam os preços do litro do óleo diesel à patamares bastante elevados, em geral muito acima dos preços médios de mercado.

E além da distância, Fernando de Noronha, assim como em outros sistemas isolados, possui restriçoes naturais que implicam em baixa capacidade produtiva primária, ou seja, PIB e balança comercial limitados, necessitando-se que a importaço de energia seja subsidiada.

O estudo desvenda a capacidade não só natural, mas econômica que Fernando de Noronha possui para mudar esse quadro, deixando de ser um vilão do sistema energético estadual para ser exemplo de aplicaço economicamente viável das energias renováveis.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal do trabalho é analisar cenários de energia renovável para a ilha principal do arquipélago de Fernando de Noronha utilizando um modelo computacional específico de comparação de sistemas energéticos por meio de seus custos. Esses cenários migram do sistema atual (somente utilizando óleo diesel) para um sistema que possui Energias Renováveis até que se encontre um ponto ótimo econômico.

Além disso, busca-se estudar um cenário com aumento da demanda de energia elétrica por meio da substituição da frota de veículos movidos a motores de combustão interna por uma frota de veículos elétricos. Os impactos são medidos em termos econômicos, energéticos e ambientais.

São realizadas ainda discussões transversais abordando a nacionalização de algumas tecnologias, o custo dos painéis solares e sua implicação nos projetos de engenharia brasileiros, bem como aspectos ambientais relevantes como emissões de gases tóxicos e avaliação da pegada ecológica do sistema insular de Fernando de Noronha.

## 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O capítulo 1 traz a introdução do trabalho abordando a motivação encontrada para o estudo, os objetivos traçados e a estruturação para consecução desses objetivos. Já o capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica, onde são abordados os sistemas híbridos de energia contextualizando o estado da arte das tecnologias fotovoltaica, eólica, sistemas de armazenamento e Veículos Elétricos no conceito *smart grid*.

Já o capítulo 3 descreve o funcionamento e os parâmetros do recurso computacional abordando características de seu modelamento virtual. São descritos os recursos, os componetes as maneiras de simulação e as ferramentas de análises econômicas.

Uma caracterização do arquipélago será mostrada no capítulo 4 trazendo informações sobre clima, relevo, fauna; flora; o cenário energético atual; bem como a pegada ecológica de Fernando de Noronha.

O capítulo 5 apresenta os resultados do trabalho informando os cenários encontrados e as possíveis configurações dos sistemas, e o capítulo 6 traz as considerações finais e respectivas sugestões de trabalhos futuros.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção serão avaliadas as principais características dos sistemas a serem simulados para instalação em Fernando de Noronha, chamados de sistemas híbridos. Além disso, serão apresentados exemplos de aplicação que balizaram este trabalho bem como aspectos do atual conceito de smart grid que são os veículos elétricos e os sistemas de armazenamento de energia inteligentes.

### 2.1 SISTEMAS HÍBRIDOS DE ENERGIA

Os Sistemas Híbridos de Energia (SHEs) são a combinação de diferentes recursos renováveis tais como: vento, sol, biomassa, microturbinas hidráulicas, com combustíveis fósseis (geralmente geradores diesel) visando provimento de energia elétrica.

Costumeiramente, a principal razão de se integrar energias renováveis a sistemas híbridos é economizar combustíveis fósseis, em geral o diesel, por este ser o elo mais custoso da cadeia. Desta maneira, o gerador diesel permanece como *backup* (sistema de reserva).

Um sistema híbrido pode ser configurado basicamente de três diferentes maneiras: conectado a rede (*on grid*), fora da rede com sistema de distribuição (*off grid*) e fora da rede sem sistema de distribuição e com alimentação direta da carga (*off grid with direct supply*).

A primeira configuração permite que se confie na rede caso o sistema híbrido não funcione. Ao mesmo tempo, ela minimiza os cortes de energia e aumenta a tensão da rede. Já as configurações off-grid, elas tanto podem suprir uma ou várias cargas espalhadas bem como serem utilizadas para carregar baterias em sistemas de armazenamento de energia.

Uma micro-rede ou mini-rede é um sistema que gera energia elétrica e possivelmente calor para servir a uma carga próxima e sua característica principal é a dedicação a essa carga particular. Assim, sua grande aplicação são sistemas isolados ou pequenas cargas específicas. Essa rede geralmente é formada por um ou mais sistemas de geração de energia combinados com diferentes tecnologias de armazenamento regulação de fluxo de energia. Um sistema solar acoplado a baterias para uma vila isolada, um sistema eólico em conjunto com diesel para uma ilha ou um sistema ligado a rede e conectado a uma microturbina a gás para gerar energia elétrica e calor para uma fábrica, são exemplos de mini ou micro-redes.

No Brasil, uma micro-rede, chamada de microgeração distribuída, possui potência instalada menor ou igual a 100 kW e a mini-rede, ou minigeração distribuída possui potência

instalada superior a 100 kW e inferior a 1 MW. (Resolução Normativa nº 482/2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, 17/04/2012)

### *2.1.1 Energia Solar Fotovoltaica*

As três principais tecnologias para o aproveitamento da energia solar para a produção de energia são a fotovoltaica, a termossolar e a solar termoelétrica. Destas, a fotovoltaica é amplamente a mais utilizada, e por isso, será abordada com maiores detalhes neste estudo.

Os sistemas fotovoltaicos transformam de forma direta a energia solar em energia elétrica. A célula fotovoltaica é o componente básico do sistema e é constituída de material semicondutor que converte a energia solar em eletricidade em corrente contínua. As células fotovoltaicas são conectadas entre si para formar um módulo, ou painel fotovoltaico, cuja capacidade padrão fica entre 50 e 200 watts (W).

Os módulos ou painéis fotovoltaicos são então combinados com outros componentes, como inversores, para transformação em corrente alternada ou baterias, para armazenamento da energia. E são também extremamente modulares, podendo formar sistemas de alguns watts ou mesmo de dezenas de megawatts (MW). Entre as tecnologias disponíveis, duas tecnologias se sobressaem: o silício cristalino e o filme fino.

Os painéis de silício cristalino podem ser mono ou multicristalinos e representam aproximadamente 90% do mercado anual. Entre os comercialmente disponíveis, os painéis de silício monocristalino são os que apresentam maiores rendimentos, de 15% a 20% de eficiência na conversão da luz solar em eletricidade. Já os de silício multicristalino, embora com custo menor, apresentam rendimento médio de apenas 14% (International Energy Agency - IEA, 2010).

Os painéis de filme fino são fabricados por meio da aplicação de finas camadas de materiais semicondutores sobre um material de suporte, tais como: vidro, plástico, aço inoxidável, entre outros. Apesar do seu baixo custo de fabricação, seu rendimento é ruim, entre 7% e 13% (Markets and prospects by technology, 2011), necessitando assim de uma área superior para a obtenção de determinada potência elétrica. Embora ainda não estejam disponíveis comercialmente, as células com concentradores de energia solar são as que apresentam as maiores eficiências, podendo chegar a 40% de conversão, segundo a

Associação Europeia de Indústrias Fotovoltaicas (European Photovoltaic Industry Association - EPIA, 2012).

Uma característica importante dos sistemas fotovoltaicos é a utilização da componente difusa da insolação para a produção de eletricidade, permitindo seu funcionamento em dias em que o céu não está completamente limpo.

A energia fotovoltaica foi a fonte renovável que apresentou maior crescimento no mundo entre os anos de 2000 a 2010, crescendo a uma taxa média de 39% ao ano, em evolução praticamente exponencial, conforme mostra a Figura 1. Desta maneira, sua capacidade instalada foi de aproximadamente 40 gigawatts (GW) no final de 2010, contra 1,5 GW em 2000. Além disso, entre os anos de 2005 e 2010, o seu crescimento foi ainda mais expressivo, alcançando quase uma taxa média de crescimento de 50% (International Energy Agency - IEA, 2011).

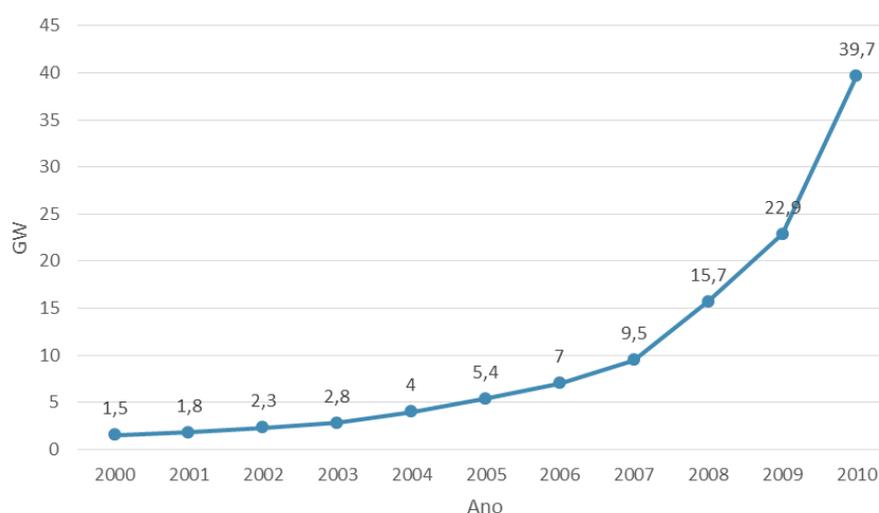


Figura 1 – Capacidade fotovoltaica no mundo (International Energy Agency - IEA, 2011)

O rápido crescimento da energia fotovoltaica ocorreu muito em função das políticas baseada em tarifas *feed-in*<sup>1</sup> e pela redução do custo de aquisição dos sistemas fotovoltaicos. Desta forma, a maior parte da energia fotovoltaica provém de autoprodutores residenciais, como é mostrado na figura 2.

---

<sup>1</sup> Mecanismo que garante que o produtor de energias renováveis possa vender energia a um preço fixo garantido por contrato, por um período de tempo determinado (geralmente 5, 10, 15 ou 20 anos). Atualmente, cerca de 50 países possuem algum tipo de tarifa *feed-in*. ( Instituto de Estudos para o Desenvolvimento Industrial, 2011)

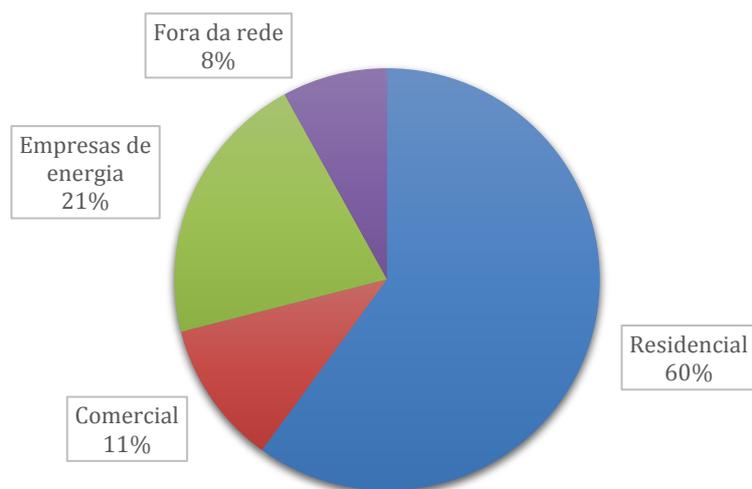


Figura 2 – Produção de energia fotovoltaica por segmento

Os dados da tabela 1 mostram a importância da formatação política e dos incentivos ao setor, pois 72% da capacidade instalada encontra-se em países da Europa e no Japão, isto é: países que dispõem de menor insolação, em comparação a países tropicais.

Tabela 1 – Energia fotovoltaica: capacidade instalada total

País (2010)	Capacidade (MW)
Alemanha	17.370
Espanha	3.915
Japão	3.618
Itália	3.502
EUA	2.534
Mundo	39.700

Em 2011 ocorreu um acréscimo de 27,7 GW de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. Dados preliminares da Associação de Indústrias Fotovoltaicas da Europa - EPIA (International Energy Agency - IEA, 2011) indicam que foi na Itália onde se deu o maior acréscimo em potência instalada, aproximadamente 9 GW.

Quanto à oferta de equipamentos, o maior fabricante de módulos fotovoltaicos é a China, conforme mostra a Tabela 2.

Tabela 2 – Módulos Fotovoltaicos produzidos em 2010

País	Módulos produzidos (GW)
China	10.000
Alemanha	2.460
Japão	2.304
EUA	1.265
Coreia	925
Espanha	699
Itália	305
México	232
Suécia	181
Áustria	112
Canadá	110
Outros	1.816
Mundo	20.409

A Figura 3 mostra a participação relativa dos maiores parques industriais entre as nações. E, além disso, a tecnologia de silício cristalino representou 88% dos módulos produzidos em 2010 (Markets and prospects by technology, 2011).

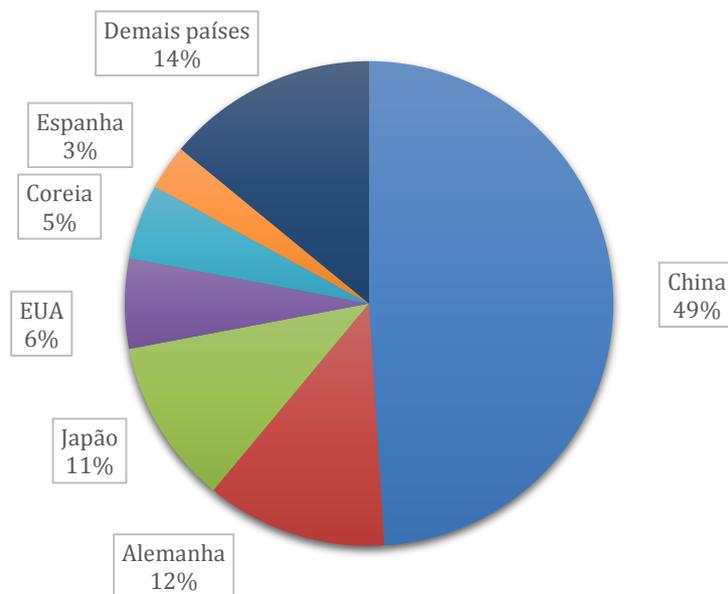


Figura 3 – Percentuais Nacionais de fabricação de módulos fotovoltaicos

De acordo com dados fornecidos pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas, publicadas em periódico (Solar photovoltaics competing in the energy sector - on the road to competitiveness, 2011), os preços dos módulos fotovoltaicos caíram vertiginosamente. O preço médio que era de US\$ 22 por watt (W) em 1980, caiu para menos de US\$ 1,5 por watt em 2010.

E ainda, cada vez que dobrou a capacidade acumulada de módulos fotovoltaicos vendidos, os preços dos módulos reduziram, em média, 20%. Consequentemente, os preços dos sistemas fotovoltaicos caíram 50% nos últimos cinco anos na Europa e, além disso, é esperada uma queda de 36% a 51% nos próximos dez anos.

Outra publicação (PVXchange, 2011) aponta que entre maio de 2009 e dezembro de 2011, os módulos tornaram-se 57% mais baratos na Alemanha, com reduções de 56% e 63% no Japão e na China, respectivamente, para preços no atacado.

Em junho de 2011, os custos informados pela (European Photovoltaic Industry Association - EPIA, 2012) dos sistemas fotovoltaicos situavam-se entre US\$ 3.300 a US\$ 5.800 por quilowatt-pico (kWp) para sistemas instalados sobre os telhados e US\$ 2.700 a US\$ 4.100 por kWp para sistemas colocados em solo. Levando-se em consideração esses preços de sistemas, esta mesma publicação informa que os custos da eletricidade, que incluem ainda custos de capital e eficiência de insolação, produzida encontram-se entre US\$ 138 e US\$ 688 por MWh, para sistemas instalados sobre os telhados e entre US\$ 113 e US\$ 486 por MWh para sistemas colocados em solo.

Considerando uma taxa de conversão de dois reais por dólar americano, a energia elétrica de origem fotovoltaica, produzida a partir de módulos instalados sobre telhados, apresenta custos entre R\$ 276,00 a R\$ 1.376,00 por MWh. Portanto, o preço da energia em locais que apresentam condições favoráveis, como elevada incidência de radiação solar, várias horas no dia, já apresentam custos competitivos aos preços cobrados pelas distribuidoras pela energia elétrica, uma vez que a tarifa chega a custar R\$ 350 por MWh.

### 2.1.2 Energia Eólica

A energia eólica é resultado da energia cinética do ar em movimento (o vento), captada por turbinas, cujo rotor está ligado a um gerador elétrico, diretamente ou por intermédio de uma caixa de engrenagens.

As turbinas modernas de grande porte utilizam um rotor horizontal, no topo de uma torre, com uma hélice de três pás, que variam o seu ângulo de ataque de acordo com a velocidade do vento.

O rotor pode ser conectado a um gerador elétrico por meio de uma caixa de engrenagens multiplicadora de velocidade. O eixo do rotor pode também ser ligado diretamente ao gerador, sem a necessidade de caixa de engrenagens, bastando-se colocar geradores elétricos de maior diâmetro, de múltiplos polos com excitação por ímãs permanentes.

Os sistemas eólicos podem ser instalados em terra (*onshore*) ou no mar (*offshore*). Os sistemas instalados no mar apresentam a vantagem de aproveitarem ventos normalmente mais favoráveis, no entanto, enfrentam dificuldades de fixação e manutenção e tornam-se mais caras. A geração no mar também requer dispendiosas estruturas de suporte para as torres, exige sistemas submersos de transmissão de eletricidade e possui condições de manutenção e operação mais restritas.

As turbinas eólicas produzem energia com ventos a partir de 15 quilômetros por hora (km/h) a 90 km/h. As maiores turbinas eólicas atuais possuem potências de 6 MW, podendo alcançar rotores com diâmetros de 126 metros, maiores que prédios de 40 andares.

Apesar do rápido crescimento no tamanho das turbinas, é esperada uma diminuição desse ritmo de crescimento para as turbinas em terra, dada as restrições estruturais e logísticas, principalmente no caso do transporte das hélices, e dificuldades na instalação.

A Rede de Políticas para Energias Renováveis para o Século 21 - REN21 publicou estudo (Renewable Energy Policy Network for the 21st Century - REN21, 2011) informando que o acréscimo da potência instalada em energia eólica foi de 39 GW, a maior dentre todas as outras fontes alternativas. Outra fonte bibliográfica (Global Wind Energy Council (GWEC), 2011) mostra o acréscimo foi de 41,2 GW alcançando um total de 238 GW instalados no mundo segundo o Conselho Global de Energia Eólica traz em suas estatísticas.

Na Tabela 3 encontram-se os principais países que utilizam essa fonte. A liderança é da China, seguida pelos Estados Unidos, Alemanha e Espanha.

Tabela 3 – Capacidade Eólica Instalada em 2011

País	Acréscimo (2011)	Total 2011 (GW)	Crescimento (%)
China	18,0	62,4	40
EUA	6,8	46,9	17
Alemanha	2,1	29,1	8
Espanha	1,1	21,7	5
Índia	3,0	16,1	23
França	0,8	6,8	14
Itália	1,0	6,7	16
Reino Unido	1,3	6,5	25
Canadá	1,3	5,3	32
Portugal	0,4	4,1	10

Em 2011, o Brasil foi o país que apresentou o maior crescimento relativo no mundo, ultrapassando até mesmo a China, com um crescimento equivalente a 63%, ou seja: sua capacidade instalada passou de 927 MW, em 2010, para 1.509 MW (Global Wind Energy Council (GWEC), 2011). A evolução da capacidade instalada mundial a partir de 2001 é apresentada na Figura 4. É possível notar um crescimento de dez vezes no período, o que correspondeu, em termos lineares a uma taxa anual média aproximada de 26%.

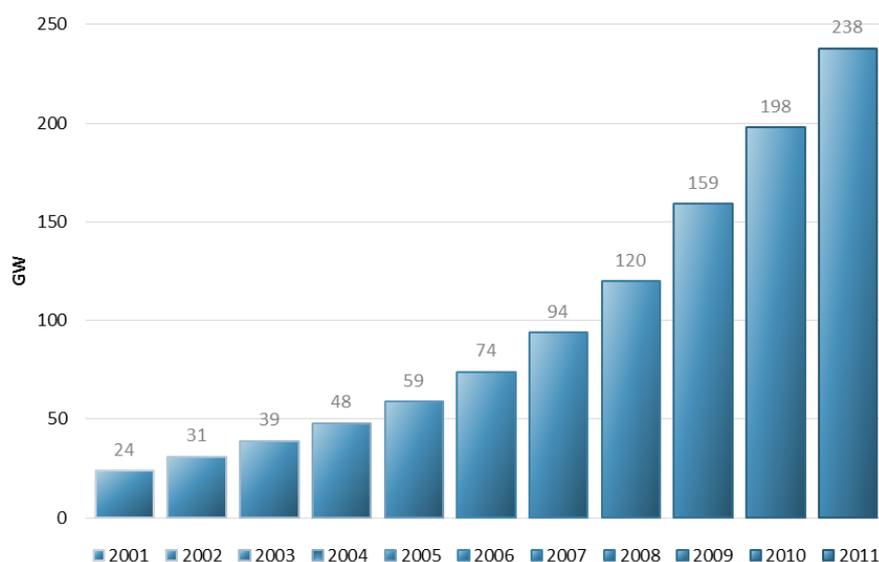


Figura 4 – Evolução da capacidade eólica mundial

Todavia, segundo a REN 21 (Renewable Energy Policy Network for the 21st Century - REN21, 2011), o mercado eólico global manteve-se praticamente estável nos últimos três anos – 38,6 GW em 2009, 38,8 GW em 2010 e 41,2 GW em 2011. Isto se dá por um crescimento menor nos Estados Unidos e Europa, em razão de incertezas nas políticas para fontes renováveis, pela crise econômica mundial ou até mesmo pela redução da demanda por eletricidade em muitos países desenvolvidos.

Ainda segundo esse mesmo estudo, no final de 2010, a capacidade instalada de energia eólica na União Européia representava 5,3% do consumo de eletricidade na região. Muitos países, no entanto, obtiveram taxas bem maiores, incluindo a Dinamarca (22%), Portugal (21%), Espanha (15,4%), Irlanda (10,1%) e Alemanha (6%).

Somente na Alemanha, quatro estados atenderam a mais de 40% de suas necessidades de energia elétrica por meio da energia eólica. Nesse mesmo período, nos EUA, a liderança foi do estado de Iowa, com 15% da demanda por eletricidade atendida pela fonte eólica.

Outro fator a ser considerado é o interesse em pequenas turbinas eólicas está crescendo, impulsionado pela necessidade de energia elétrica no meio rural, pelo desenvolvimento de inversores de baixo custo e por incentivos governamentais.

No final de 2010, conforme a Associação Mundial de Energia Eólica (World Wind Association - WWEA, 2012), o número de pequenas turbinas eólicas, com capacidade de até 100 kW, instaladas no mundo alcançou quase 700 mil unidades, que geraram mais de 382 GWh no ano. O crescimento, em relação a 2009, foi de 26%.

Além disso, a capacidade instalada total alcançou 443,3 MW no final de 2010. Conforme podemos ver na tabela 4, a China lidera em número de unidades instaladas, enquanto os Estados Unidos possuem a maior potência instalada.

Tabela 4 – Pequenas Turbinas Eólicas

<b>País</b>	<b>Nº de unidades</b>	<b>Capacidade instalada (MW)</b>	<b>Tamanho médio das turbinas (kW)</b>
<b>China</b>	450.000	166	0,37
<b>EUA</b>	144.000	179	1,24
<b>Reino Unido</b>	21.610	43	2,0
<b>Canadá</b>	11.000	12,6	1,15
<b>Alemanha</b>	10.000	15	1,5

Os custos de investimento em energia eólica têm apresentado constante e expressiva redução a partir do início dos anos oitenta do século passado, apesar da elevação do preço das turbinas, entre 2007 e 2009, causados pela demanda aquecida e aumento dos preços de matérias-primas para sua fabricação.

Recentemente, com o desenvolvimento do mercado abaixo da expectativa, ocorreu um excesso de capacidade de fabricação, o que levou a uma queda nos preços das turbinas. Segundo estudo da IEA (Markets and prospects by technology, 2011), para contratos assinados no final de 2010, e entrega no segundo semestre de 2011, os preços das turbinas eram de aproximadamente US\$ 1.350 por kW, 19% inferiores aos preços de pico entre 2007 e 2008.

O custo da energia eólica depende do preço das turbinas, do custo financeiro e das condições do local de instalação. Esse custo encontra-se entre US\$ 40 e US\$ 160 por MWh (Renewable Energy Policy Network for the 21st Century - REN21, 2011) e entre US\$ 50 e US\$ 90 (PVXchange, 2011) para projetos em terra.

Estes dados revelam que, se consideramos os menores preços apresentados os empreendimentos eólicos já são competitivos, sem a necessidade de políticas governamentais de apoio. Para os empreendimentos no mar, entretanto, os preços sobem bastante: entre US\$ 180 e US\$ 190 por MWh (Renewable Energy Policy Network for the 21st Century - REN21, 2011) e entre US\$ 100 e US\$ 200 (PVXchange, 2011).

Para pequenas turbinas com capacidade entre 3 e 100 kW, o custo da energia produzida é de US\$ 150 a US\$ 200 por MWh (PVXchange, 2011). Considerando uma taxa de conversão de 2 reais por dólar, o custo no Brasil seria de R\$ 300,00 na taxa mais inferior, portanto, 15% menor que os preços médios cobrados pelas distribuidoras pela energia elétrica no país, que giram em torno de R\$ 350,00 por MWh

## 2.2 VEÍCULOS ELÉTRICOS, SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO E SMART GRID

O Programa Veículo Elétrico é um dos frutos do acordo de cooperação tecnológica firmado em 2004 entre a empresa Suíça KWO – Kraftwerke Oberhasli AG e a ITAIPU, com o foco principal na atualização tecnológica e no meio ambiente. Nesse acordo, ITAIPU E KWO se juntaram e assumiram a coordenação de pesquisa de um veículo elétrico técnica e economicamente viável a partir do desenvolvimento de uma tecnologia existente e em uso em caráter de testes em suas instalações.

Em função da abrangência e complexidade tecnológica que o projeto exige para sua realização, o convênio previu a necessidade da inclusão de entidades parceiras, tanto ligadas a ITAIPU como a KWO, para permitir a conclusão do Projeto com sucesso. O ramo de atividades das entidades parceiras identificadas como essenciais foram: Baterias e acessórios eletrônicos; montadoras automotivas; motores elétricos e sistemas de controle; empresas de energia; e universidades e institutos de pesquisa.

Com a divulgação do Projeto VE, entidades interessadas em investir no projeto de pesquisa e desenvolvimento e comprometidas com o meio-ambiente procuraram ITAIPU para participar do Projeto. São elas: FIAT, RENAULT, ELETROBRAS/CEPEL, ANDE, COPEL&LACTEC, CEMIG, CPFL, WEG, CORREIOS, EUROAR, LIGHT, MASCARELLO, IVECO, CHESF, BATERIAS MOURA, PETROBRAS, Parques Tecnológicos Itaipu (brasileiro e paraguaio), além das empresas associadas à KWO (gestora europeia do Projeto), conforme mostra a figura 5.



Figura 5 – Principais parceiras e modelo idealizado

As experiências obtidas na execução das atividades de P&D do Projeto VE ITAIPU/KWO propiciaram uma melhor compreensão dos impactos gerados pela tecnologia de veículos elétricos no mercado de energia, assim Itaipu já produziu mais de sessenta VEs, além de um ônibus híbrido a etanol, um micro-ônibus elétrico, um caminhão elétrico, um jipe elétrico. Além disso, estão em construção mais dois ônibus híbridos, três mini-ônibus, um avião elétrico e um trem (Veículo Leve sobre Trilhos – VLT) elétrico, bem como testes com tecnologias de hidrogênio.

Além disso, já foi realizada a nacionalização de vários componentes dos VEs, e foram realizadas e patrocinadas várias ações para incentivo do uso do VE no Brasil, como a figura do revendedor varejista de energia elétrica para abastecimento de veículos elétricos (Projeto de Lei 3895/12 – Câmara dos Deputados) e a redução de IPI para veículos elétricos (Projeto de Lei 255/2010 – Senado Federal).

Novas linhas de financiamento e mais vertentes de pesquisas estão sendo abertas, aumentando o escopo do projeto e incluindo áreas correlatas, como o *Smart Grid*, sistemas de armazenamento de energia e as necessidades de infraestrutura para toda esta rede.

### *2.2.1 Armazenamento de energia*

Na área de armazenamento de energia, Itaipu Binacional e o Parque Tecnológico de Itaipu receberam um incentivo de 32 milhões de reais da FINEP para produzir uma tecnologia de bateria nacional. Considerando os benefícios que as baterias de grande capacidade de armazenamento podem propiciar, torna-se estratégico o domínio dessa tecnologia para promover o desenvolvimento nas diversas áreas do setor elétrico.

O VE em desenvolvimento na ITAIPU utiliza baterias de sódio ( $\text{NaNiCl}_2$ ), de tecnologia ZEBRA (Zero Emission Battery Research Activity), cujo os principais componentes químicos são sais (cloretos de sódio e níquel), além de outros metais comuns e uma cerâmica especial, porosa aos íons de sódio. Esse tipo de bateria é geralmente utilizado em aplicações que exijam alta densidade de energia e de potência, características fundamentais para veículos elétricos.

Com relação aos custos e disponibilidade de matéria-prima, segundo Dustmann (DUSTMANN, 2009), há dúvidas sobre a disponibilidade de lítio para atender grandes demandas; o sódio é abundante no planeta; as baterias de lítio são ideais para sistemas de pequeno porte; e as baterias de sódio são mais adequadas para sistemas maiores (Tabela 5).

Tabela 5 – Disponibilidade e Custo de Matéria-Prima no planeta (DUSTMANN, 2009)

	<b>Freqüência na Terra</b>	<b>Produção [t/ano]</b>	<b>Energia [Wh/g]</b>	<b>Preço [US\$/kg]</b>	<b>Custo [US\$/kWh]</b>
<b>Lítio (Li)</b>	65 ppm	10.000	11,70	45,00	3,80
<b>Sódio (Na)</b>	28.300 ppm	incontável	3,16	0,75	0,24
<b>Níquel (Ni)</b>	15.000 ppm	1.000.000	Reservas comprovadas: > 200 milhões t/ano + reciclagem		

Outras vantagens da bateria de sódio é que elas são praticamente 100% recicláveis, possuem metais comumente utilizados na indústria; matérias-primas abundantes no planeta; não possuem efeito memória (não viciam); são 3 vezes mais leves e 30% menores do que uma bateria chumbo-ácido; e são adequadas para uso em regiões tropicais já que não perdem eficiência com o aumento de temperatura.

Tais características apontam as baterias de sódio como as mais adequadas a aplicações tanto para o setor elétrico bem como para VEs, dado as condições de trabalho às quais essas baterias serão submetidas e somadas às questões de segurança e de meio ambiente (reciclagem e disponibilidade de matéria-prima), além de custos relacionados a demandas de larga escala.

### 2.2.2. Smart Grid

A rede inteligente, também chamada de *Smart Grid*, Figura 6, agrega aos sistemas elétricos (geração, transmissão e distribuição), as tecnologias de comunicação e sistemas de informação, tendo como objetivo: a redução de custos, a melhora da eficiência, a minimização do impacto ambiental, o fortalecimento mercados e a melhora dos serviços.

Ao viabilizar essa infraestrutura, a rede inteligente propicia ganhos significativos em termos de confiabilidade, capacidade, resposta a demanda, agregando valor ao serviço dos clientes.

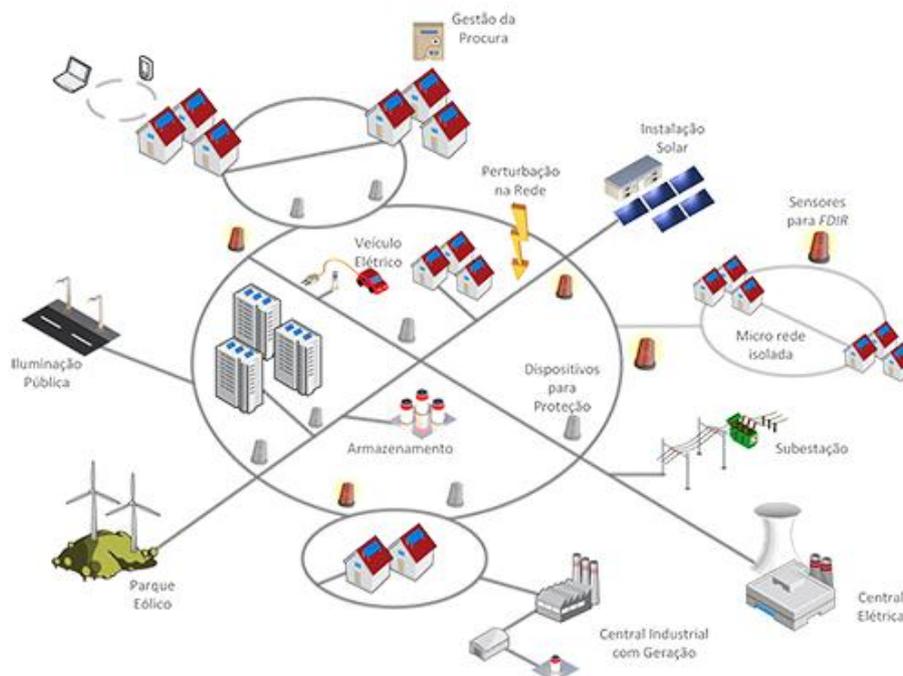


Figura 6 – Exemplo de configuração Smart Grid

No Smart Grid, ao utilizar o sistema V2G (vehicle-to-grid), os VEs podem interagir com a rede elétrica, flexibilizando o gerenciamento de energia, ou seja: armazenando energia no horário de baixa demanda (madrugada) e suprindo energia nos períodos de alta demanda, uma vez que os VEs, em geral, possuem baterias com elevada densidade energética. Além disso, os VEs também podem ser utilizados como no-breaks na falta de energia, o que pode ser visto na Figura 7.



a) Armazenando ou consumindo energia



b) Atuando como no-break



c) Suprindo energia a rede

Figura 7 - Sistema V2G (*vehicle to grid*)

As baterias dos VEs conectadas à rede podem também aperfeiçoar os recursos da própria rede, tais como: linearização da curva de carga (*load leveling / load shifting*); qualidade de energia; controle automático de geração (AGC), estabilização de parques eólico ou fotovoltaico, e complementação para sistemas de geração distribuída.

Como os VEs podem suprir energia a rede para lares, a sua interação com a rede também podem representar economia de investimentos em infraestrutura, visando suprir a demanda no horário de ponta do sistema energético brasileiro (NOVAIS, 2012).

A Figura 8 apresenta a curva de demanda do Sistema Interligado Nacional - SIN do dia 14/05/2008 (Quarta Feira), onde se observa nitidamente a subutilização da infraestrutura no período da madrugada e o pico de demanda no horário das 17h às 20h.

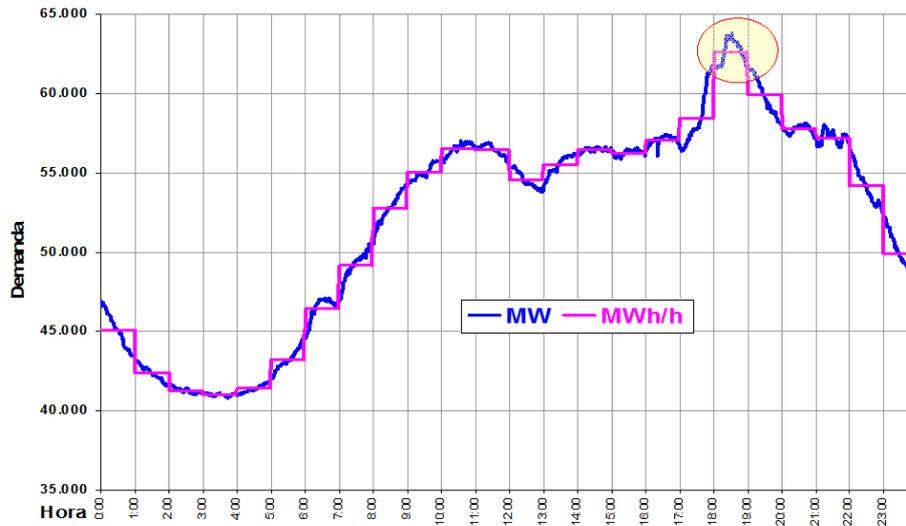


Figura 8 – Sistema Interligado Nacional - Curva de Demanda de 14/05/2008 (Quarta Feira)

O item em amarelo presente na Figura 8, chamado ponta dentro da ponta, é destacado na Figura 9. Vemos que este fenômeno ocorreu por um período de apenas 20 minutos, demandando aproximadamente 400 MW da infraestrutura já existente. Sabendo que o custo de investimento em energia hidrelétrica é de aproximadamente US\$ 1500/kW, foram necessários, aproximadamente, US\$ 600 milhões para atender essa demanda de 400MW que ocorreu durante apenas 20 minutos, no melhor dos casos que é o custo de energia gerada por hidrelétricas.

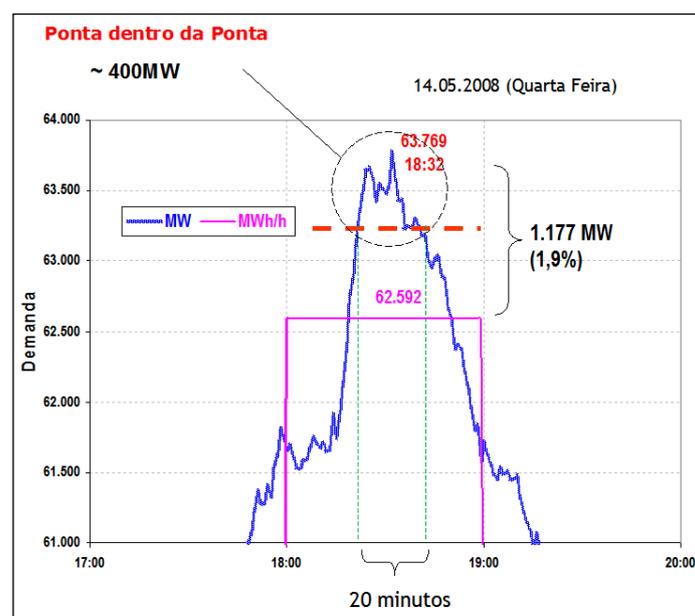


Figura 9 – Sistema Interligado Nacional – Horário de Pico no dia 14/05/2008

Considerando que um VE é capaz de suprir em média 20 kW para a rede por meio de sua bateria, seriam necessários 20 mil VEs para atender essa mesma demanda de 400 MW. Assim, os VEs, ao custo de US\$ 30 mil dólares cada, conectados a rede no intervalo de 20 minutos poderiam suprir a mesma demanda com o mesmo custo.

Outro ponto importante a se considerar é o aumento de demanda provocado pela inserção de VEs na rede elétrica. Para a estimativa do incremento no consumo de energia no Brasil, foi considerado 01 (um) VE rodando 60 km/dia e o consumo de 10 kWh/dia para este percurso. Esse número foi obtido por meio de ensaios e testes em Itaipu que comprovam a autonomia de 120 km/h para uma carga de bateria de 20 kWh/dia.

O consumo de energia elétrica no Brasil em 2008 foi de 384,46 TWh, e neste ano foram produzidos de 3 milhões de automóveis. Assim, caso 100% dos automóveis produzidos em 2008 fossem elétricos e incluindo as perdas no sistema elétrico (13%), no consumo de energia, isso representaria um aumento de 3,22% (12,37 TWh) em comparação a 2008. De forma um pouco mais realista, se apenas 10% fossem veículos elétricos, o aumento seria de apenas 0,32% (1,23 TWh), demonstrando a plena viabilidade de um sistema *smart grid* no país.

## 2.3 MODELO COMPUTACIONAL APLICADO A SISTEMAS HÍBRIDOS

O Hybrid Optimization Modeling Software – HOMER é um modelo computacional de otimização de microcentrais de energia que foi desenvolvido pela National Renewable Energy Laboratory – NREL como uma das respostas do governo norteamericano ao relatório principal da ECO 92 (Senado Federal Brasileiro, 1992).

O programa computacional simplifica a tarefa de avaliação de projetos de sistemas híbridos, os quais contêm uma mistura de geradores convencionais, cogeração, turbinas eólicas, energia solar fotovoltaica, energia hidroelétrica, baterias, células a combustível, biomassa, dentre outros insumos. Ele também analisa os sistemas ligados a rede ou autônomos e executa cálculos de gases de efeito estufa para as medidas que estão sendo consideradas. Além disso, pode ser informado um perfil de consumo horário de energia e a combinação de energia renovável com a carga necessária. Desta maneira, o usuário analisa a micro-rede potencial, a entrada de energias renováveis em seu pico, a relação entre as fontes de energia renováveis e a energia total, bem como a estabilidade da rede.

A ferramenta também disponibiliza uma série de funções de orçamento, podendo-se determinar o custo de projeto em diversos cenários de disponibilidade de energia, contribuindo para a minimização de custos e a otimização do projeto baseado em vários fatores, como por exemplo, a diminuição na emissão de CO<sup>2</sup>.

O sistema efetua cálculos do balanço de energia para cada uma das 8.760 horas do ano. Para cada hora, é comparada a demanda elétrica e térmica com a energia que o sistema pode fornecer naquela hora, levando-se em consideração os fluxos de entrada e saída de energia em cada componente do sistema. Para sistemas que incluem baterias ou geradores movidos a combustível fóssil, é possível calcular e auxiliar na decisão de como operar os geradores em cada hora e se é melhor carregar ou descarregar as baterias.

O software também mostra se uma configuração é viável e estima o custo de instalação e operação do sistema durante a vida útil do projeto. Os cálculos de custo do sistema incluem: custo de capital, custo de reposição, custos de operação e manutenção, custos com combustível, entre outros. Depois de simular todas as possíveis configurações de sistema, elas são ordenadas pelo custo presente líquido (às vezes chamado de custo de ciclo de vida), o qual você pode utilizar para comparar as opções de projeto do sistema.

Nesta seção serão mostrados alguns sistemas híbridos simulados que serviram de motivação e paradigma para o estudo em Fernando de Noronha.

### 2.3.1 Vila rural na Algéria

O presente estudo de caso (Himri Y. et al, 2008) concentra-se num pequeno vilarejo na Algéria composto por aproximadamente 425 consumidores, avaliando o impacto da adição de uma turbina eólica no sistema já existente visando reduzir o consumo de diesel e a poluição ambiental de uma maneira economicamente viável.

Neste vilarejo, o pico anual encontrado na demanda de energia foi de 263 kW e foi observado no dia 5 de Agosto às 15h30 (Figura 10) e o mínimo foi de 74 kW no dia 17 de abril às 3h30 (Figura 11).

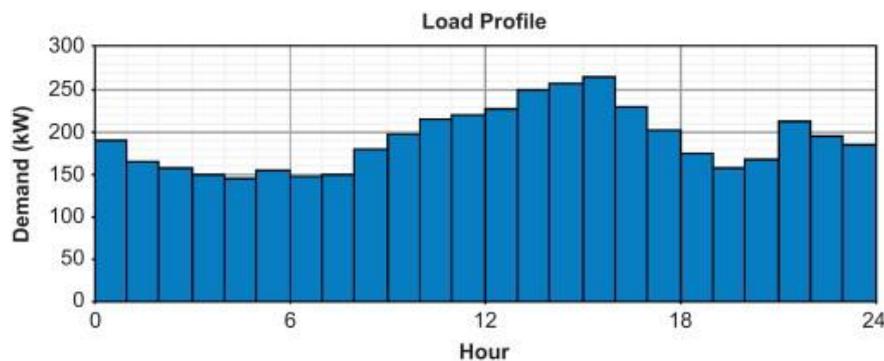


Figura 10 – Variação horária da carga no dia de pico (5/08/06)

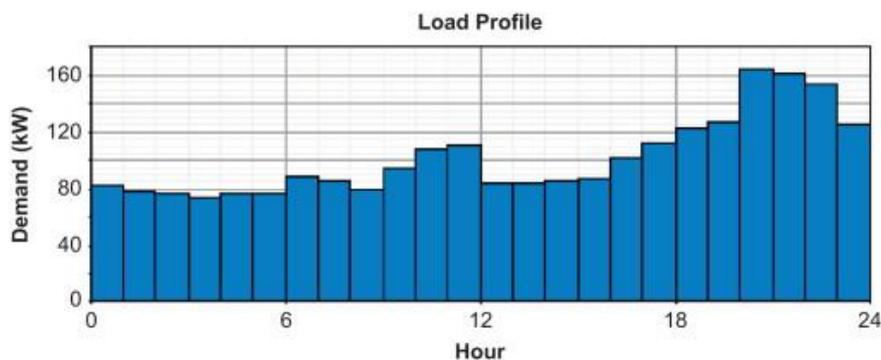


Figura 11 – Variação horária da carga no dia de menor demanda (17/04/06)

Os dados de velocidade do vento foram coletados num período de 8 anos à uma altura de 10 metros acima do solo. A velocidade média encontrada foi de 4,25 m/s. Na Figura 12 vemos justamente a função densidade de probabilidade não normalizada da velocidade média ao longo de uma hora.

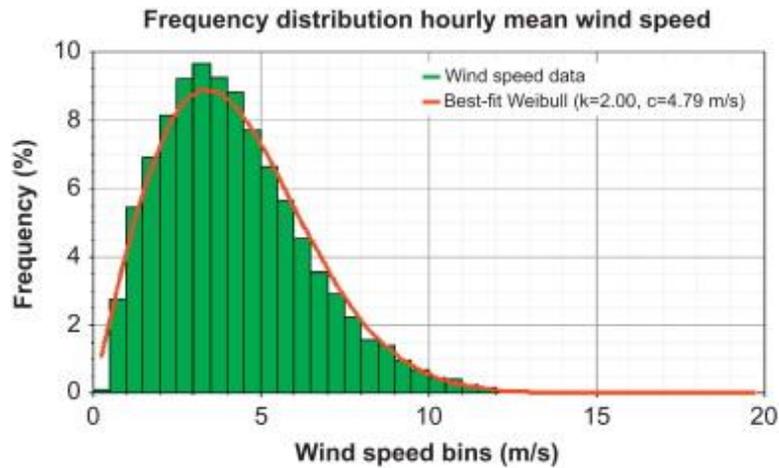


Figura 12 – Distribuição de frequência horária de velocidade média do vento

A figura 12 mostra que a velocidade de vento permanece abaixo de 3,5 m/s por volta de 31% do tempo durante todo o ano. Desta maneira, utilizando-se uma turbina com velocidade de corte de 3,5 m/s ou mais, poderia se utilizar a energia eólica durante o restante do ano (aproximadamente 69% do tempo total).

Já a figura 13 mostra o desenho do sistema híbrido a ser avaliado pelo modelo computacional. O sistema consistirá de uma usina geradora diesel e geradores eólicos de um lado do barramento AC e a demanda de energia elétrica do outro lado desse barramento.

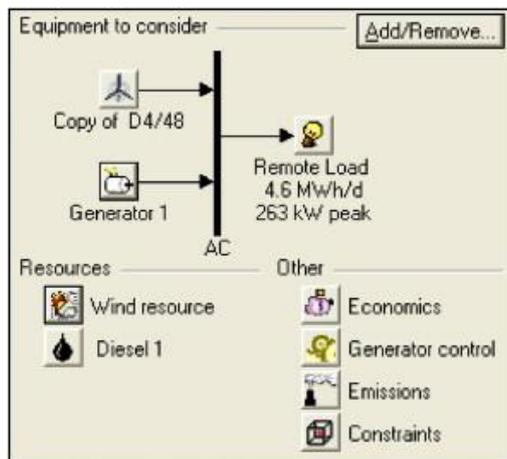


Figura 13 – Sistema ligado ao barramento AC

A usina geradora diesel consiste de quatro motores Cummins de 500 kW cada, com consumo de 36 l/h e rotação de 1500 rpm. Os custos obtidos na SPE (Société de Production d'Electricité) são mostrados na tabela 6.

Tabela 6 – Dados de custos locais dos geradores

Custo local do gerador diesel				
Fabricante	Classificação	Custo capital	Custo de reposição	Custo de operação e manutenção
	(kW)	(\$)	(\$)	(\$/h)
Cummins	500	80,355	53,57	3.01

Outro grande componente do sistema híbrido é a turbina eólica. Nesta aplicação foi utilizada uma turbina a WECS de 600 kW da DeWind. O custo anual de operação e manutenção de 13 mil dólares foi assumido com base na literatura técnica.

O período de vida útil do sistema assumido foi de 25 anos e a taxa anual de juros foi de 4%. O custo de capital foi de US\$ 128.000 e os custos de Operação e Manutenção foram de US\$ 6.400,00 por ano. Os demais dados de entrada são dados pelas tabelas 7 e 8.

Tabela 7 – Dados de demanda energética

Dados de entradas econômicas	
Parâmetros	Valor (%)
Porcentagem do pico de carga anual	0
Porcentagem da carga por hora	10
Porcentagem de energia solar por hora	0
Porcentagem de energia eólica por hora	40

Tabela 8 – Dados econômicos e parâmetros de sensibilização

Restrições de entradas	
Parâmetros	Valor (%)
Máxima energia não aproveitada	0
Fração renovável mínima	0, 5, 10, 15, 20 e 25
Vida mínima da bateria	N/D
Máxima escassez anual de capacidade	0, 3, 5, 7 e 10

Os resultados obtidos são apresentados de maneira categorizada para uma gama de parâmetros de sensibilidade como: velocidade do vento, máxima escassez anual de capacidade (Maximum annual capacity shortage – MACS), mínima fração renovável (minimum renewable fraction - MRF) e o custo do combustível no valor presente líquido.

Para uma velocidade de 5,48 m/s, MACS de 0% e preço de combustível de 0,162 \$/lt, encontrou-se como melhor opção apenas a geração diesel resultando num custo presente líquido (Net Present Cost – NPC) de 2.982.825,00 e um custo mínimo de energia (minimum Cost of Energy - COE) de 0,114 \$/kWh.

A figura 14 mostra os diferentes custos calculados pelo programa computacional. A parte verde se refere ao Gerador Eólico, a preta ao gerador Diesel e a cinza são outros custos. Nota-se que nos custos de capital inicial dos dois geradores (primeira esfera) é semelhante, ao contrário dos custos de manutenção e combustível (segunda esfera) onde o gerador diesel é responsável por mais de oitenta por cento dos custos, quase quatro vezes maior que o custo do gerador eólico. Essa discrepância acaba se refletindo nos custos totais (terceira esfera), onde percebemos o custo real do gerador diesel (quase 70% do total).

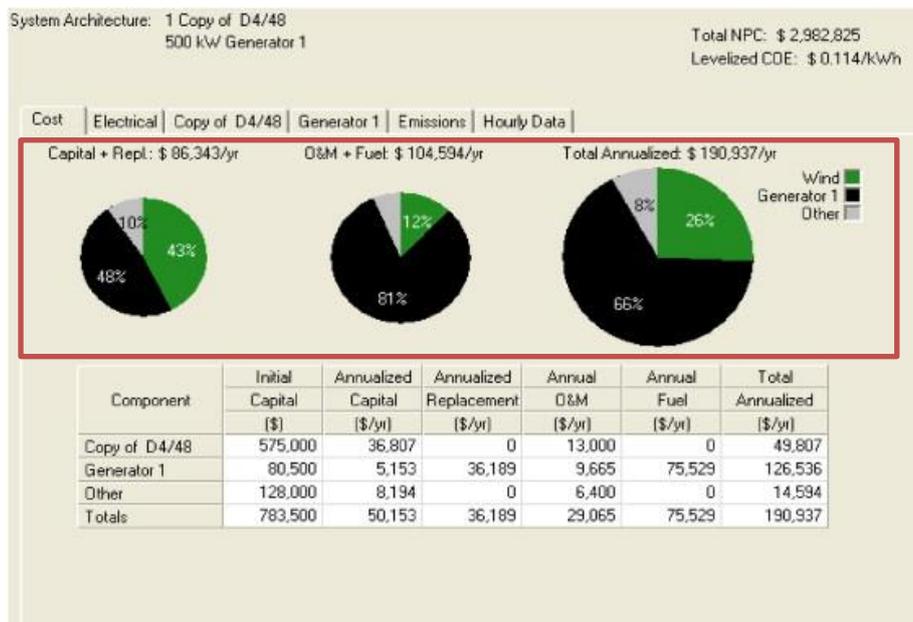


Figura 14 – Custos do sistema híbrido para MACS 0% e MRF 0%

A energia produzida por cada componente do sistema híbrido é dada pela figura 14, onde é possível perceber que da carga total 68% da energia é suprida pela turbina eólica e 32% pelos geradores diesel, conforme detalhe na figura 15. Pode-se observar ainda que são produzidos em excesso 967.036 kWh, isto é 37% da carga. Como este é um estudo teórico, o sistema apenas informa que mantidas essas configurações, será produzida energia em excesso. Uma forma de correção seria a colocação de algum sistema de armazenamento ou mesmo a diminuição da potência instalada.

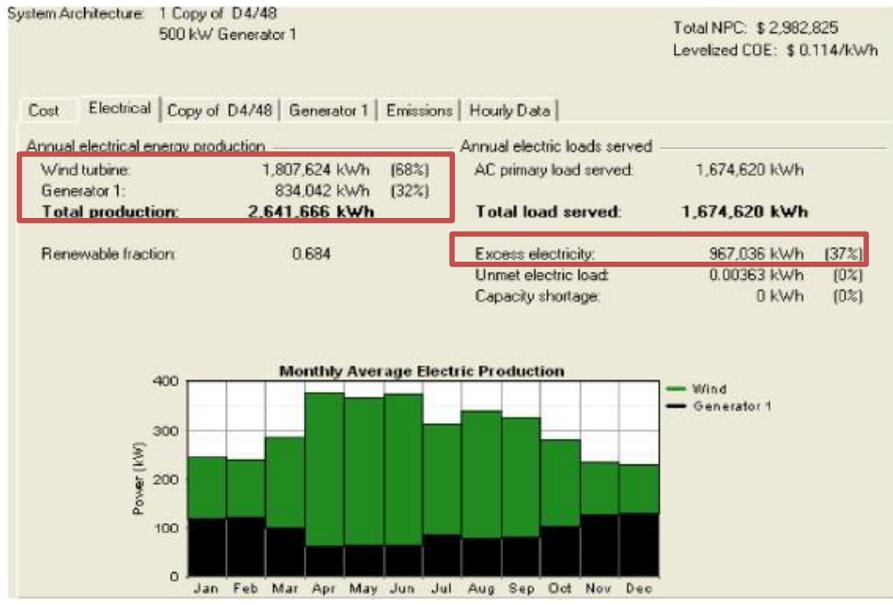


Figura 15 – Energia produzida pela turbina eólica (verde) e pelos geradores diesel (preto)

O programa permite mudança em alguns parâmetros que se deseja investigar melhor, o que é chamado de Análise de Sensibilidade. Desta maneira, variando respectivamente, a velocidade do vento (4,24; 5; 5,48; 6 e 6,5), o valor do diesel (0,05; 0,1; 0,102; 0,162; 0,170 e 0,179 \$/ It podemos analisar a partir de qual velocidade o sistema híbrido é viável. A figura 16, gerada pelo programa computacional, mostra que o sistema híbrido passa a ser viável apenas para velocidades de vento a partir de 4,6 m/s (linha vermelha).

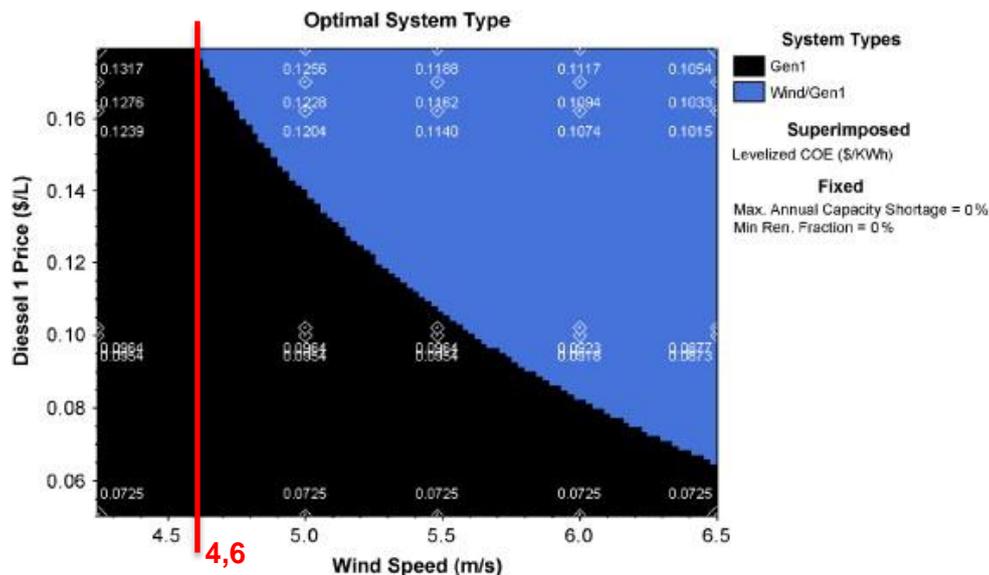


Figura 16 - Sistema híbrido otimizado pelo custo equivalente (\$/kW)

Um custo indireto, pago pelos seres humanos, é o da emissão de gases poluentes, e utilizando-se o sistema híbrido reduzir-se-ia 40% dos poluentes lançados ao ar. Além disso, se o subsídio para o diesel abolido na Algeria é esperado que o sistema híbrido fosse ainda mais atraente, pois o diesel custaria mais caro e a viabilidade seria encontrada até em velocidades mais baixas de vento para esta localidade.

### 2.3.2 Ilha de St. Martin (Bangladesh)

A ilha de Saint Martin é uma pequena ilha na baía de Bengal há aproximadamente 9 km ao sul de Bangladesh. Possui aproximadamente 6 mil habitantes que retiram o seu sustento prioritariamente da pesca e da retirada de algas marinhas que são secas e exportadas para Míamar. Além disso, St Martin é um local bastante conhecido por suas belezas naturais (Sadrul Islam A.K.M et all, 2012).

Para a realização do estudo foi separada uma comunidade de 100 casas e 10 lojas. A carga era baseada em 3 lâmpadas eficientes (fluorescente compacta de 15W cada), 1 ventilador de teto (40W) e uma televisão (40 W) para cada família, e duas lâmpadas eficientes (15 W cada), 1 ventilador de teto (40 W) e dois refrigeradores (150 W) para as lojas. O sistema de suprimento da carga incorpora uma combinação de painel solar fotovoltaico, turbina eólica, baterias e gerador diesel, conforme mostra a Figura 17.

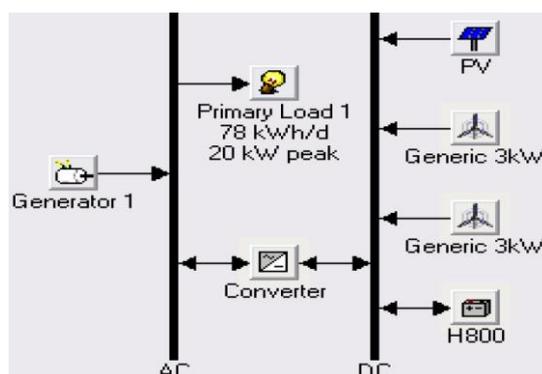


Figura 17 – Barramentos AC/DC do sistema a ser simulado

A Figura 18 mostra a simulação da carga para dias típicos de inverno (Janeiro) e de verão (Julho) na localidade. Como as medidas horárias não estavam disponíveis, segundo os autores, foi utilizado um dia típico com aleatoriedade de 10% no dia e 15% na hora. O que resultou num pico anual de 20 kW e carga diária de 78 kWh.

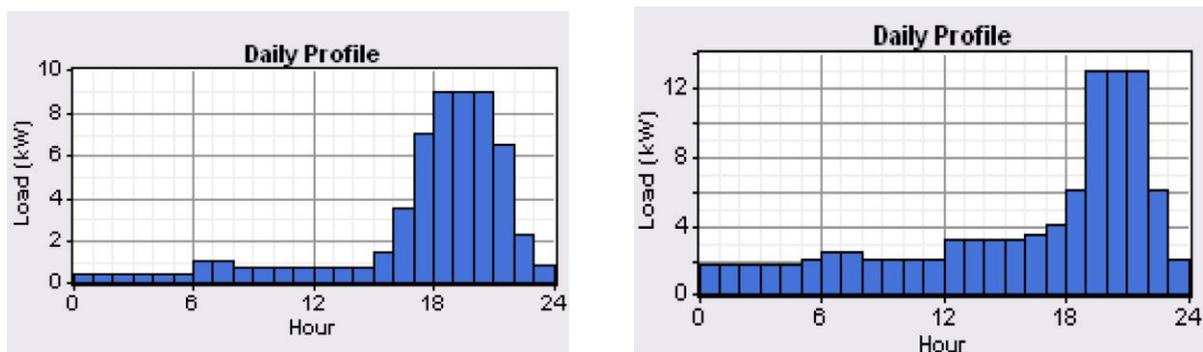


Figura 18 – Carga diária num dia típico de inverno e verão, respectivamente

A insolação diária foi inserida com dados obtidos de satélite coletados NASA. Essa radiação é mostrada na figura 19. O índice de claridade encontrado desta maneira foi de 0,484 e a insolação diária foi de 4,549 kWh / m<sup>2</sup> / dia.

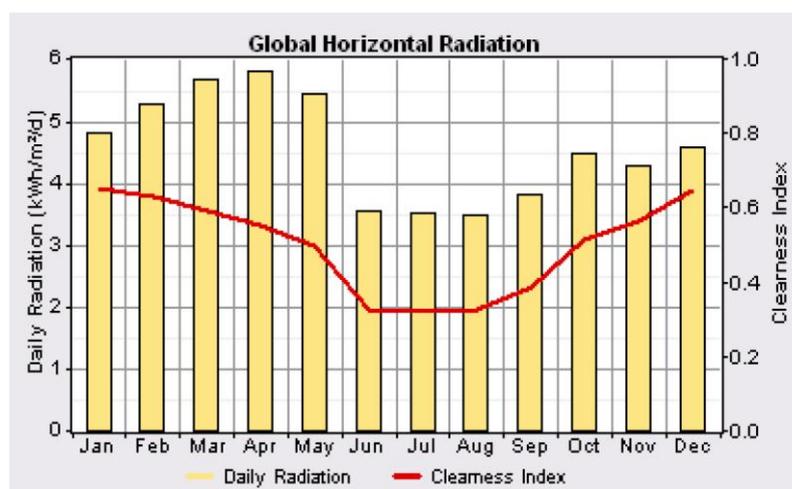


Figura 19 – Radiação Solar durante um ano típico

Os dados da velocidade mensais do vento (Figura 20) também foram supostos pelo programa de acordo com alguns parâmetros informados pelo usuário. Nestes parâmetros estão incluídos: o parâmetro de Weibull e o fator de aleatoriedade do vento, ambos relacionados com a distribuição de vento durante o ano, a força padrão diurna que indica a força da relação entre a hora do dia e a velocidade do vento, e o pico horário de vento.

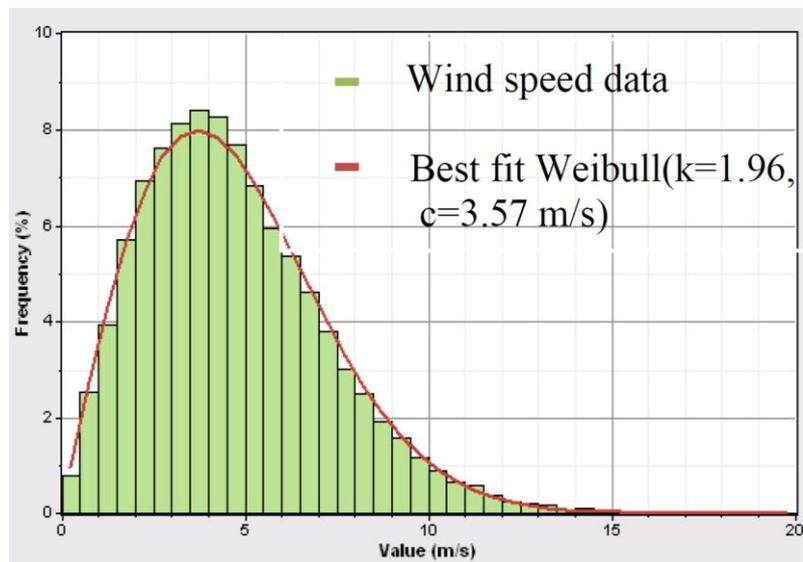


Figura 20 – Distribuição de vento simulada para a ilha de St. Martin

No estudo e simulações foi utilizada a moeda de Bangladesh BDT ou taka (Tk), onde 1 dólar equivale a 77 Tk. Assim, foi colocado um painel solar que custa 250 Tk / kW com vida útil de 25 anos, conforme Tabela 9.

Tabela 9 – Parâmetros dos Painéis Solares

Parâmetro	Unidade	Valor
Custo capital	Tk/W	250
Custo de reposição	Tk/W	200
Custo de operação e manutenção	Tk/W/ano	50
Tempo de vida	Anos	25
Fator de redução	Porcentagem	90
Sistema de rastreamento	Sem sistema de rastreamento	0,05

Foi utilizado um gerador diesel de 15 kW, um turbina eólica de 3 kW, e um sistema de armazenamento de 1,6 kWh e 800 Ah (Hoppecke 8 OPzS). Além desses parâmetros, foi considerada uma vida útil de 25 anos para todo o sistema e uma taxa de juros de 5%.

As simulações foram conduzidas considerando diferentes valores para radiação solar, velocidade de vento, fração mínima renovável (MRF) e preço do diesel. O sistema híbrido encontrado com melhor razoabilidade econômica foi de custo presente líquido (NPC) de 10.620.388,00 (US\$ 137.927,00) e um custo equivalente de energia (COE) de 26,54 tK/kWh ou US\$ 0,345/kWh. Além disso, a fração mínima renovável (minimum renewable fraction - MRF) foi de 31% e o sistema híbrido ainda reduziu em 14 toneladas a emissão de CO<sub>2</sub>.

Esse sistema foi compreendido por 8kW de painéis solares, duas turbinas eólicas de 3 kW cada, o gerador diesel de 15 kW e 10 kW de baterias para armazenamento. A composição de cada elemento na produção de energia final é dada pela figura 21.

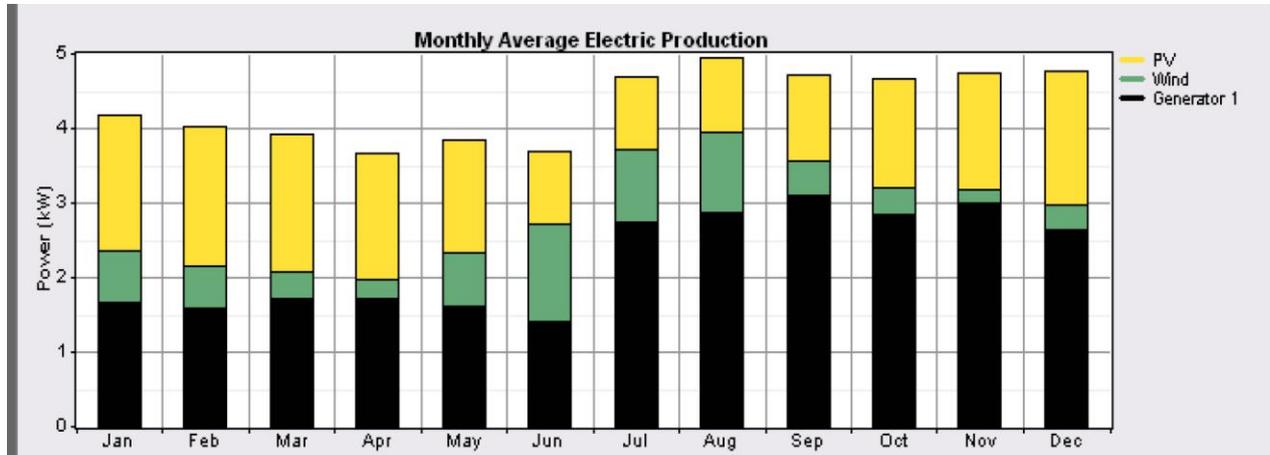


Figura 21 – Energia produzida pelos painéis FV (amarelo), pelos geradores eólicos (verde) e pelo gerador diesel (preto)

Vemos que o sistema híbrido ainda depende fundamentalmente do gerador diesel (barra preta) e da energia fotovoltaica (barra amarela) que no começo do ano chega a contribuir com valores semelhantes ao diesel. Entretanto, a participação da energia eólica no sistema (barra verde) é pequena, devendo-se rever sua viabilidade econômica de aquisição.

A viabilidade econômica pode ser melhor demonstrada pela análise de sensibilidade inferida pelas figuras seguintes. A Figura 22 mostra a análise de sensibilidade em termos da velocidade de vento e do custo do diesel e fixando a radiação solar. Por sua vez, a Figura 23 exhibe os resultados utilizando a radiação solar e o custo do diesel fixando e velocidade de vento.

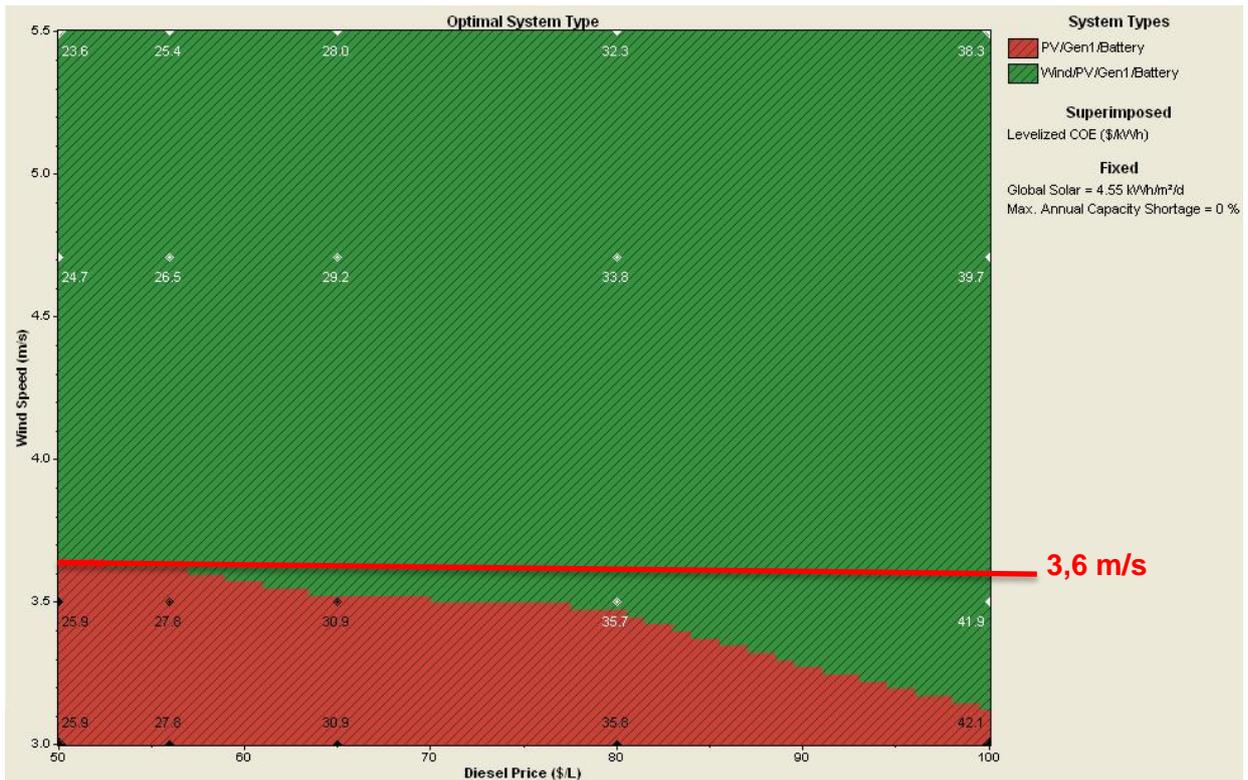


Figura 22 – Otimização com custo do diesel e veloc. de vento variáveis e radiação solar fixa

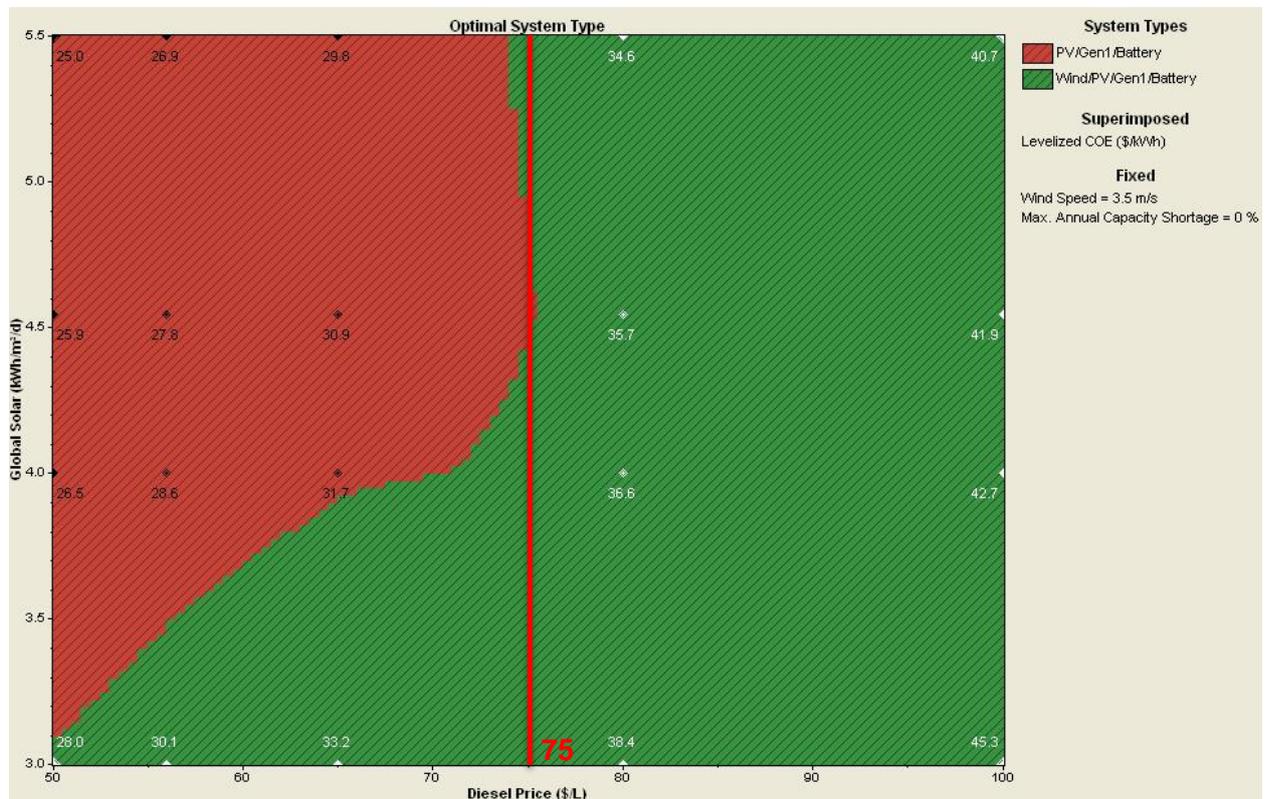


Figura 23 – Otimização com custo do diesel e radiação solar variáveis e veloc. de vento fixa

Vemos na figura 22 que o sistema que inclui a energia eólica (verde) se tornar viável a partir de 3,6 m/s seja qual for o preço do diesel. E esse aumento do diesel faz o limiar decrescer um pouco até quase o sistema se tornar viável com energia eólica a partir de 3m/s e o diesel a 100\$/lt.

Já na figura 23 vemos que fixando a velocidade de vento em 3,5 m/s, o maior empecilho para o sistema que inclui energia eólica (verde) se tornar viável é o preço do diesel. No entanto, a partir de 75 \$/lt o sistema com energia eólica será sempre viável economicamente.

### 2.3.3 Vilarejo na Arábia Saudita

A Arábia Saudita é um vasto país com área total de mais de 2 milhões de metros quadrados e fronteiras internacionais de 4.431 quilômetros. Um estudo (REHMAN, 2012) foi conduzido na tentativa de substituir por um sistema híbrido a atual geração diesel da vila de Rowdat Ben Habbas localizada no leste da Arábia Saudita e composta por oito geradores com capacidade de 1,12 MW.

Os dados meteorológicos (velocidade e direção do vento, temperatura do ar, umidade relativa, medições de pressão e radiação solar) foram medidas em uma estação dentro do vilarejo de 13 de setembro de 2005 a 18 de Novembro de 2008. A estação possui as coordenadas 29°8.2 N de latitude e 44° 19.8 E de longitude, a 443 metros acima do nível do mar.

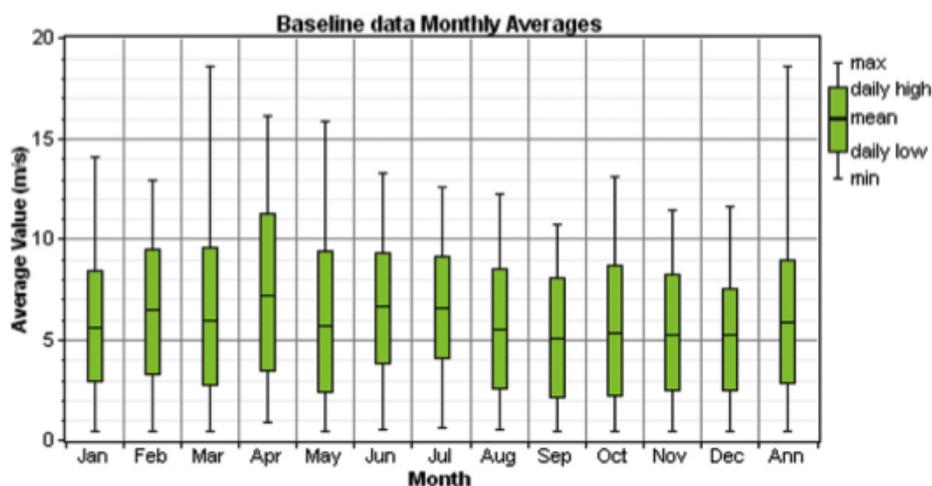


Figura 24 – Medidas mensais de velocidade de vento

A figura 24 mostra que a média mensal da velocidade de vento é sempre acima de 6 m/s, exceto entre os meses de Setembro a Novembro. Já na figura 25 podemos observar os valores médios mensais da radiação solar também medidos na estação meteorológica.

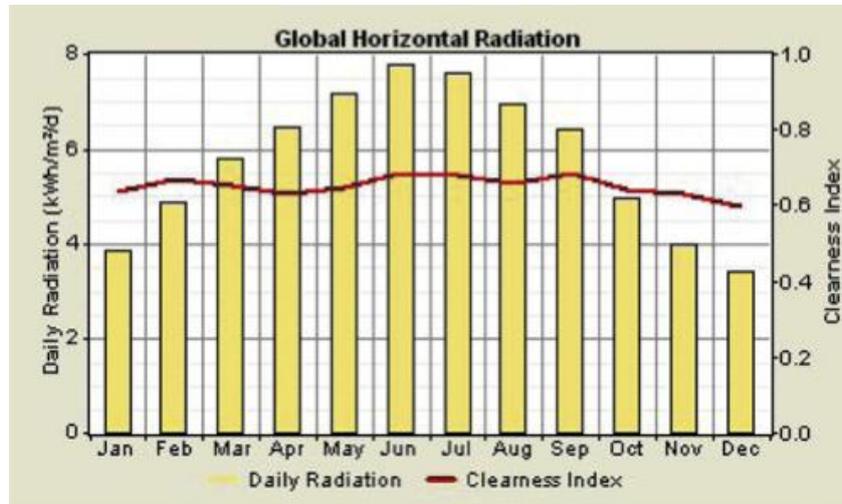


Figura 25 – Medidas mensais da radiação solar

Visando as simulações, além das variáveis padronizadas como taxa de interesse (6%) e duração total da planta (20 anos), foram inseridas as seguintes variáveis de controle: Fração mínima de participação de energias renováveis (0, 20 e 40%) e preço do diesel (0,2 , 0,4 , 0,6 , 0,8 , e 1,0 \$/lt).

Cada turbina eólica possuía o preço de um milhão de dólares para instalação e oitocentos mil dólares para troca, sendo consideradas uma, duas ou três turbinas. Já os painéis fotovoltaicos custaram três mil e quinhentos dólares por kW tanto para instalação quanto para troca, sendo considerado tamanhos variando de 0 a 1.000,00 kW.

O conversor utilizado custou 900 \$/kW tanto para instalação quanto para troca, possuía eficiência de 90% e tamanho variando com a potência de 0 a 500 kW. Foram considerados também de nenhum a cinco geradores diesel com custo de instalação e troca de \$1.521,00. Além disso, foi fixado o limite de horas de operação (20 mil) e o custo de manutenção foi de 0,012 \$/h.

O sistema ótimo encontrado é composto de aproximadamente 35% de fontes renováveis (26% de eólica e 9,7% solar) com custo de 0,212 US\$/kWh. Ele é composto de três turbinas de 600 kW, 1000 kW de painéis fotovoltaicos e quatro geradores de 1,12 MW remanescentes.

A contribuição mensal dos painéis solares no sistema híbrido possui variação máxima e mínima de 194,7 kW e 173,8 kW, em setembro e dezembro, respectivamente. Já a energia eólica varia um pouco mais, máxima de 805 kW em Abril e mínima de 387 kW em Setembro, conforme mostra a Figura 26.

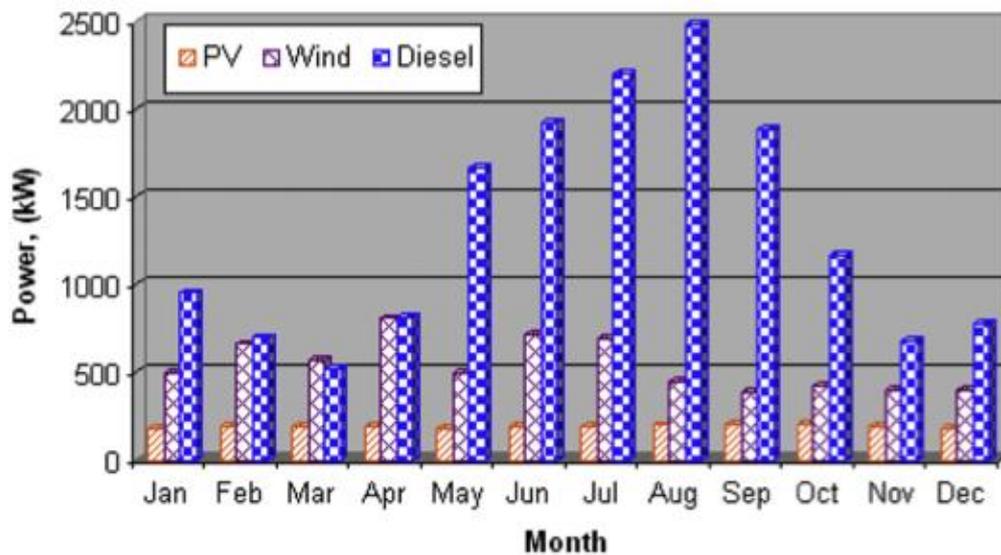


Figura 26 - Contribuição energética mensal das fontes no sistema híbrido ótimo

O sistema híbrido ótimo apontado pelo modelo contendo painéis solares, energia eólica e geração a diesel, evita a adição de 4.976,8 toneladas de gases de efeito estufa (Green House Gases – GHG). Desta maneira, durante toda a vida do projeto, i.e 20 anos, será evitada a emissão de quase cem mil toneladas de gases de efeito estufa.

Fazendo-se agora a análise de sensibilidade, constata-se que o sistema híbrido é economicamente viável sempre que comparado com o sistema unicamente com diesel, para qualquer valor deste combustível (Figura 27). Além disso, é possível perceber que a taxa de crescimento do custo equivalente (COE) do sistema diesel é sempre maior que a do híbrido.

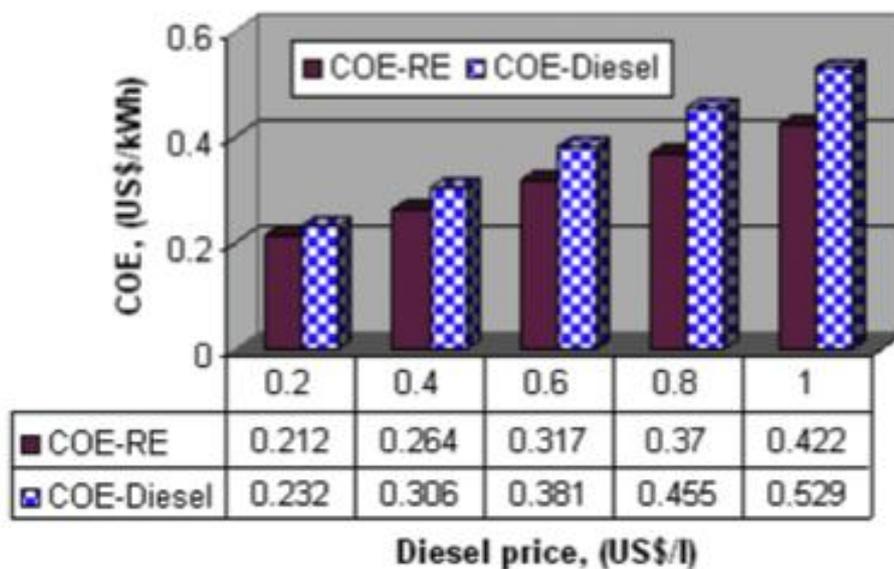


Figura 27 – Efeito do preço do diesel no sistema contendo ou não energias renováveis

A análise de sensibilidade também mostrou que a cada 0,5 m/s de aumento na velocidade do vento, havia um incremento de 5% da contribuição desta energia para o sistema. O mesmo fenômeno não ocorreu para o sistema solar onde o aumento de 0,5 kW/h/m<sup>2</sup>/d resultou num incremento de apenas 1% de contribuição desta energia para o sistema.

Ressalta-se que o sistema ótimo evitou a adição de 4.713,7 toneladas de CO<sup>2</sup> na atmosfera bem como conservou 10.824 barris de combustíveis fósseis anualmente. Desta maneira, foram economizados cerca de 20 milhões de dólares durante toda a vida do projeto, sendo 17 milhões em redução no consumo de combustível e quase 3 milhões em créditos de carbono.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

A ferramenta computacional a ser utilizada: *Hybrid Optimization Modeling Software – HOMER* possui uma lógica um pouco menos complexa do que outras ferramentas como: HYBRID 2, PV-DESIGNPRO, e PVSOL. Por outro lado, é mais detalhada do que modelos estatísticos como o RETSCREEN.

Nesta lógica, três principais atividades são realizadas: simulação, otimização e análise de sensibilidade (figura 28). No processo de simulação, apenas uma configuração do sistema é modelada e simulada verificando a cada hora sua viabilidade técnica e seu custo.

Já na otimização, várias configurações de sistemas são simuladas de modo a encontrar um sistema ótimo que satisfaça as condições técnicas e, ao mesmo tempo, possua o menor custo. E no processo de análise de sensibilidade, alguns parâmetros são fixados na simulação de modo a permitir uma análise de incertezas, como por exemplo, se a velocidade do vento aumentar, poderei desligar totalmente o sistema diesel?

A diferença entre a análise de sensibilidade e a otimização, é que aquela não mostra apenas um sistema ótimo, mas sim uma gama de opções em forma de tabelas ou gráficos. O que permite ao usuário interagir com o sistema e não tomar uma decisão baseada somente no custo. Por exemplo, sabe-se que um sistema ótimo é composto por dois geradores eólicos e um sistema diesel para uma determinada velocidade de vento, no entanto, deseja-se saber a partir de qual velocidade podemos utilizar três geradores eólicos e retirar o sistema diesel, sem aumentar muito o custo. Na análise de sensibilidade, o usuário poderá então observar a partir de qual velocidade é razoável essa mudança, mesmo não sendo o sistema menos custoso.

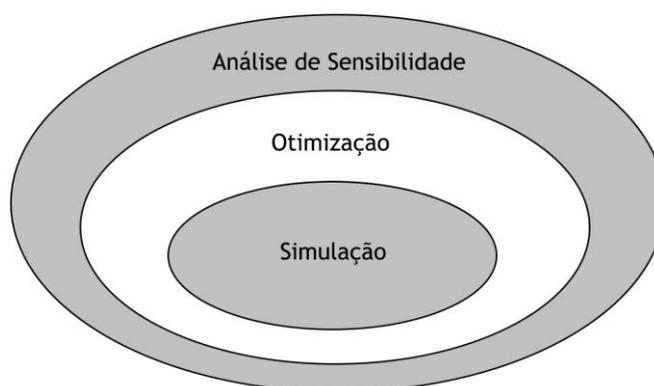


Figura 28 – Representação gráfica das três principais análises do modelo

## 3.1 SIMULAÇÃO, OTIMIZAÇÃO E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

### 3.1.1 Simulação

O processo de simulação determina como uma configuração de um sistema e sua estratégia de operação, ambos definidos pelo usuário, funcionam durante um certo período de tempo.

Sistemas de diferentes configurações podem ser simulados, tais como: painéis fotovoltaicos, turbinas eólicas, turbinas hidrocínéticas, bancos de baterias, conversores ac-dc, eletrolizadores, tanques de armazenamento de hidrogênio, entre outros. Além disso, o sistema pode ser conectado a rede ou isolado, suprindo cargas em corrente alternada, contínua ou mesmo cargas térmicas.

Quando o sistema possuir banco de baterias, geradores renováveis e geradores diesel, duas estratégias de despacho de carga podem ser simuladas: *load following* ou *cycle charging*. Na primeira estratégia somente as fontes de energias renováveis recarregam a bateria, enquanto que na segunda o gerador diesel também pode recarregar a bateria, caso gere mais energia que é necessária.

A simulação visa atender dois propósitos básicos. Um deles é verificar a viabilidade técnica de um sistema, ou seja, se os parâmetros estão colocados de uma maneira energeticamente factível. O outro propósito é verificar o custo do sistema durante todo o seu ciclo de vida, integrando tanto seus custos de instalação quanto de manutenção. Esse custo pode ser um bom parâmetro ao se comparar diferentes sistemas de suprimento de energia.

É respeitado o regime horário durante as simulações, ou seja, todos os cálculos são realizados hora a hora durante todo o ciclo de vida do sistema. E além de comparar no regime horário qual é o sistema que possui menor custo, ao final da simulação é possível obter a soma total de vários componentes, como o consumo de óleo diesel, saldo de horas da bateria, quantidade de energia comprada da rede, entre outros.

Os resultados da simulação são representados pelo custo presente líquido (Total Net Present Cost ou NPC) o qual inclui todos os gastos e as receitas recebidas do sistema trazidas ao valor presente. O NPC é a métrica principal de comparação desse modelo.

Na Figura 29 é mostrado um sistema composto por Painéis Fotovoltaicos e um sistema de armazenamento de energia durante uma simulação horária ao longo de alguns dias em Outubro.

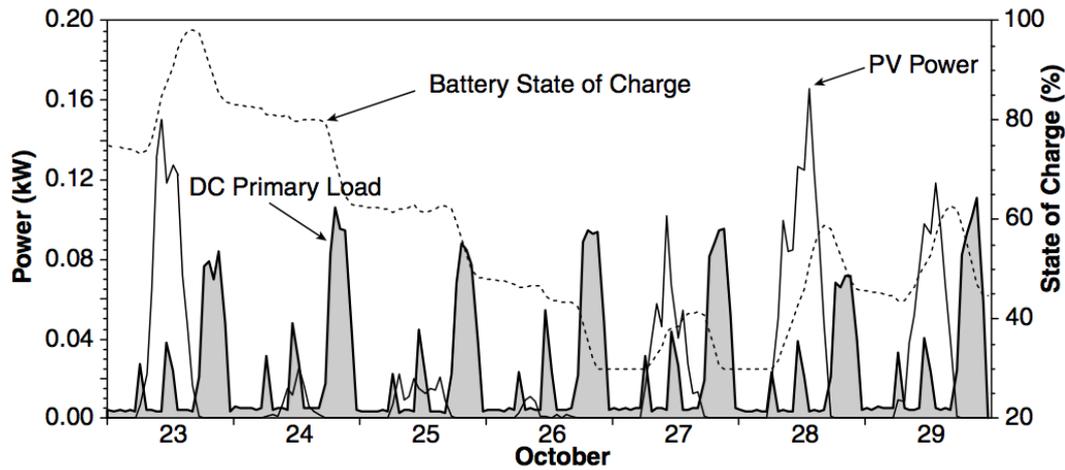


Figura 29 – Exemplo de simulação horária

Podemos observar na Figura 29 que quando a energia fornecida pelos painéis excede a carga, eles carregam o sistema de armazenamento. Ou seja, os picos da Energia Fotovoltaica (*PV Power*) aumentam os picos das baterias (*Battery State of Charge*).

No entanto, ocorre um esgotamento da bateria entre os dias 24,5 e 26,5. Todas essas ocorrências são contabilizadas pelo programa para verificação de sua viabilidade técnica, antes de mostrar o seu custo-benefício.

### 3.1.2 Otimização

Enquanto a simulação processa modelos apenas para um determinado sistema em particular, a otimização encontra a melhor configuração possível para esse modelo, ou seja, o seu sistema ótimo.

Esse sistema obedece as condições de contorno dadas pelo usuário com o menor custo possível. E encontrá-lo passa por decidir quais componentes serão inseridos, o tamanho e a quantidade desses componentes, bem como definir a melhor estratégia de despacho para a carga.

No processo de otimização são simuladas muitas configurações diferentes do sistema, onde são descartadas as configurações que não satisfazem as condições de contorno impostas pelo usuário. Posteriormente, são apresentados os sistemas de acordo com o custo presente líquido, do menor ao maior, começando pelo menor, que é o sistema ótimo encontrado.

A Figura 30 mostra na primeira linha (linha sublinhada de vermelho) o sistema ótimo encontrado. Vê-se que neste caso o sistema utiliza um gerador eólico (FL30), 135 kW de geradores diesel, 64 baterias e um conversor de 30 kW. É possível também obter os sistemas mais viáveis para cada configuração de sistema, conforme mostra a Figura 31.

   	FL30	Gen (kW)	Batt.	Conv. (kW)	Initial Capital	Total NPC	COE (\$/kWh)	Diesel (L)	Gen (hrs)
   	1	135	64	30	\$ 216,500	\$ 849,905	0.273	75,107	4,528
   	2	135	64	30	\$ 346,500	\$ 854,660	0.274	54,434	3,350
   	1	135	48	30	\$ 200,500	\$ 855,733	0.275	78,061	4,910
   	2	135	48	30	\$ 330,500	\$ 856,335	0.275	57,654	3,685
   	2	135	32	30	\$ 314,500	\$ 873,322	0.280	62,394	4,139
   	2	135	96	60	\$ 401,000	\$ 878,370	0.282	48,139	2,603
   	2	135	64	60	\$ 369,000	\$ 880,421	0.282	52,999	3,195
   		135	64	30	\$ 86,500	\$ 885,175	0.284	101,290	5,528
   	1	135	96	30	\$ 248,500	\$ 887,379	0.285	74,193	4,346
   		135	48	30	\$ 70,500	\$ 888,528	0.285	104,009	6,067
   	1	135	32	30	\$ 184,500	\$ 889,688	0.285	85,310	5,615
   	2	135	96	30	\$ 378,500	\$ 890,504	0.286	52,442	3,136
   	2	135	48	60	\$ 353,000	\$ 891,896	0.286	57,316	3,615
   	2	135	32	60	\$ 337,000	\$ 905,959	0.291	62,312	4,080
   	2	135	128	60	\$ 433,000	\$ 907,508	0.291	45,596	2,226
   	1	135	64	60	\$ 239,000	\$ 911,667	0.292	77,753	4,613
   		135	96	30	\$ 118,500	\$ 912,410	0.293	101,003	5,330

Figura 30 – Tela mostrando resultados em ordem crescente de NPC

   	FL30	Gen (kW)	Batt.	Conv. (kW)	Initial Capital	Total NPC	COE (\$/kWh)	Diesel (L)	Gen (hrs)
   	1	135	64	30	\$ 216,500	\$ 849,905	0.273	75,107	4,528
  		135	64	30	\$ 86,500	\$ 885,175	0.284	101,290	5,528
 		135			\$ 0	\$ 996,273	0.320	132,357	8,760
 	1	135			\$ 130,000	\$ 1,130,637	0.363	127,679	8,740

Figura 31 – Tela apresentando os resultados de forma categorizada

A função apresentada por seu resultado na Figura 31 é chamada de categorização, pois justamente mostra para cada sistema possível, o seu menor custo. Este é um recurso interessante, pois permite ao usuário tomar uma decisão que muitas vezes não é a que possui custo mais baixo, mas se encaixa em outras necessidades presentes no local, ou restrições nos equipamentos.

Um exemplo do supracitado é no caso do sistema ótimo fazer seguidamente descargas energéticas profundas do banco de baterias, o que diminui bastante a vida útil da bateria no caso real. Este tipo de análise está fora do alcance do modelo computacional, devendo o usuário fazer essa análise por conta própria.

### 3.1.3 Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade é a realização de múltiplas otimizações do sistema, utilizando em cada uma delas arranjos diferentes de variáveis de entrada. Ela é utilizada para se detectar o quanto as variáveis de saída são afetadas pelas variáveis de entrada.

Na análise de sensibilidade o usuário entra com uma série de valores para uma determinada variável, que passa a se chamar variável de sensibilidade. Desta maneira o software irá calcular para cada um desses valores um sistema ótimo. E como são muitos valores, geralmente o resultado é exposto de forma gráfica ou em tabelas. Se, por exemplo, especificarmos seis valores do preço de energia na rede e quatro valores para taxa de inflação teremos 24 valores de sensibilidade, e para cada um deles seria realizada uma simulação.

Um dos usos mais comuns da análise de sensibilidade é quando não se tem certeza de um determinado valor para um dado de entrada. Assim, se insere uma gama de valores na tentativa de cobrir o valor correto e se analisa os resultados ao longo dessa gama de valores. No entanto, a análise de sensibilidade permite análises muito mais profundas. Um designer de sistemas pode avaliar *trade-offs* ou mesmo responder perguntas como: Quanto capital inicial devo lançar mão pra ter 50 ou 100% de energias renováveis em meu sistema?

Já o responsável pelo planejamento de energia pode determinar que tecnologias, ou combinação delas, são ótimas para determinadas condições, como por exemplo: Qual é o preço ou sob quais condições uma determinada tecnologia (ex: célula combustível) compete com o outra (ex: eólica)? Um gestor público também pode utilizar para determinar qual o nível de incentivo se faz necessário para estimular o mercado de uma determinada tecnologia ou mesmo para definir parâmetros e valores de multas por excesso de emissão de CO<sub>2</sub>.

### 3.2 MODELAMENTO FÍSICO

Para simulação ocorrer, é necessária pelo menos uma fonte de energia elétrica ou térmica como: turbina hidrocínética, painéis solares, gerador diesel, boiler, entre outros, conectados a uma fonte de consumo dessa energia como: uma carga térmica ou elétrica, ou a possibilidade de integrar essa carga a uma rede maior. E entre a fonte de energia e a sua carga podem existir equipamentos de conversão como inversores, eletrolizadores ou mesmo sistemas de armazenamento de energia.

Três tipos de cargas podem ser modelados. A carga primária é uma demanda elétrica que deve atender seguindo uma programação específica. Já a carga *deferrable*, ou adiável, é uma demanda elétrica que pode ser servida a qualquer momento durante certo período. E a carga térmica que é uma demanda por calor, simplesmente.

A carga primária pode ser inserida no modelo de duas maneiras, ou importando um documento que contenha os dados de variação horária da carga, ou informando um valor médio e deixando o modelo criar um padrão. Esse padrão pode ser diário, separando-se dias úteis de finais de semana, por exemplo, ou pode ser informado um valor médio mensal. O usuário então escolhe se quer simplesmente replicar esses valores ou aplicar uma randomização informando uma porcentagem de variabilidade de dia para dia ou de intervalo de tempo para intervalo de tempo. O modelo então utilizará dados escalares, variações para cima ou para baixo do valor médio atual de acordo com uma escala padrão.

O modelo suporta até duas cargas primárias que podem ser tanto em corrente alternada quanto em corrente contínua. Essa carga primária recebe tratamento especial, pois além da sua carga nominal, deve-se especificar uma de operação reserva para o caso de picos aleatórios. O modelo assegurará o suprimento de ambas.

A carga *deferrable*, ou adiável, possui a característica de poder ser suprida a qualquer momento. Máquinas de fazer gelo e sistemas de armazenamento de energia por baterias são exemplos destas cargas onde predomina a flexibilidade. Essa carga é especialmente indicada para sistemas que utilizam muitas energias renováveis suscetíveis a intensa aleatoriedade pois podem controlar o fluxo energético funcionando como se fosse uma caixa d'água (Figura 32).

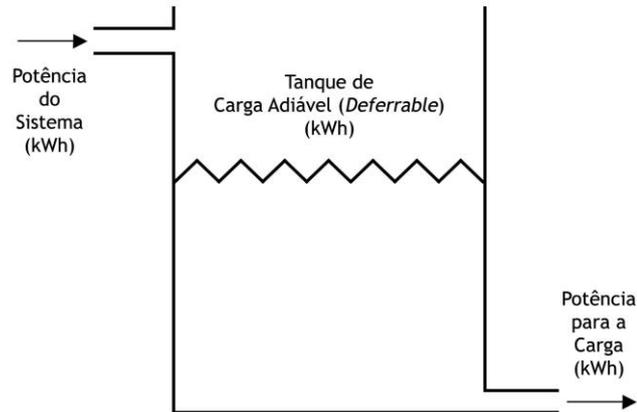


Figura 32 – Analogia da carga adiável ou deferrable

O usuário pode definir parâmetros como o tamanho do estoque dessa energia adiável, ou a capacidade de armazenamento dela em termos de kWh e a taxa máxima e mínima que a energia poderá ser drenada desse estoque. Se em algum momento o modelo identificar a nulidade da carga adiável, ela imediatamente passa a ser uma carga primária para o sistema, sendo desta maneira, suprida imediatamente.

A carga térmica funciona de modo semelhante a carga primária excetuando-se o fato dela não poder possuir carga para reserva de operação. A entrada dos dados também é semelhante podendo ser importados de uma série de dados ou informados para um dia padrão. O método de aleatoriedade também é semelhante ao da carga primária, variando a partir de um valor médio segundo uma escala padrão.

Neste último caso, o modelo utilizará dados escalares, variações para cima ou para baixo do valor médio atual de acordo com uma escala padrão. São exemplos de cargas térmicas: boilers, calor reaproveitado de geradores a gás ou diesel (cogeração) ou mesmo resistores utilizando o excesso de carga elétrica.

### 3.3 RECURSOS

Definimos em nosso modelo os recursos como tudo o que possa ser utilizado para se gerar energia elétrica ou térmica, o que inclui basicamente os quatro recursos considerados renováveis (sol, vento, água e biomassa) assim como os mais variados combustíveis que possam ser convertidos por algum equipamento em energia.

Os recursos renováveis dependem basicamente de sua localização. O recurso solar depende da latitude e clima, o recurso eólico depende de padrões de movimentação do ar atmosférico em larga escala e de influências geográficas, o recurso hídrico depende de padrões da chuva e de topografia e a biomassa do recurso biológico produzido localmente.

Outro aspecto relevante dos recursos naturais é sua variação sazonal e horária. Descreveremos nesta seção, como são modelados os principais recursos tanto naturais como de combustíveis que serão posteriormente simulados para Fernando de Noronha.

#### 3.3.1 *Recurso Solar*

Visando modelar um sistema compreendido por painéis solares deve-se indicar o recurso solar. O recurso solar representa a quantidade global de radiação solar, ou seja, tanto a radiação difusa quanto a radiação de incidência direta, que impacta a superfície da terra num ano típico.

Os dados podem ser inseridos de três formas: radiação global incidente de hora em hora (kW por m<sup>2</sup>), ou radiação global incidente numa superfície horizontal mensalmente (kW por m<sup>2</sup> por dia) ou ainda pode ser dada pelo índice de claridade mensal.

O índice de claridade mensal é a razão entre a quantidade de radiação que chega a terra, e a radiação no topo da atmosfera. Desta maneira, ele está sempre compreendido entre zero e um, e quanto mais perto de um, maior será a quantidade desse recurso. Caso o usuário decida informar somente a latitude e a longitude do local a ser simulado, o modelo utilizará dados coletados pela *National Aeronautics and Space Administration - NASA*.

### 3.3.2 *Recurso Eólico*

Para modelar um sistema composto por turbinas eólicas, é necessário informar as velocidades de vento a serem experimentadas pela turbinas durante um ano típico. O usuário pode informar os dados das medições coletadas ou elas podem ser geradas artificialmente pelo modelo.

Quatro parâmetros principais são utilizados quando se opta por utilizar os dados gerados computacionalmente: o fator de Weibull, o fator de autocorrelação, o padrão de força diurno, e a hora de pico do vento. O fator de Weibull é a medida de distribuição dos ventos ao longo do ano e o fator de autocorrelação é a medida de quanto a velocidade de vento de uma hora depende da velocidade de vento de sua hora predecessora. O padrão de força diurno e o horário de pico do vento indicam a magnitude e a fase, respectivamente, do padrão diário de velocidade de vento. O modelo computacional pode também assumir valores para esses parâmetros, caso seja do interesse do usuário.

Os cálculos também levam em consideração a altura do gerador eólico. Para tanto, é necessário informar a altura do anemômetro que fez as medições de vento. A diferença entre essas duas medidas é calculada ou por uma função logarítmica, ou lei de potência. Para usar a função logarítmica o usuário deve informar o coeficiente de rugosidade do local e para usar a lei de potência deve informar o expoente a ser utilizado.

Além disso, o usuário informa ao modelo a elevação de seu site em relação ao nível do mar para que o software calcule a densidade do ar de acordo com os padrões da US Standard Atmosphere (WHITE, 1986).

### 3.3.3 *Combustível*

O modelo já prevê as características dos tipos de combustíveis comumente utilizados, no entanto, caso seja necessário, pode ser acrescentado um novo tipo de combustível ao modelo. As propriedades físicas de um combustível incluem sua densidade, seu poder calorífico, e sua quantidade de carbono e enxofre.

O usuário pode ainda especificar a unidade de medida do combustível (l, m<sup>3</sup> ou kg) com a qual deseja trabalhar, e deve informar o preço do combustível na unidade de medida desejada bem como um limite anual de consumo, se houver.

### 3.4 COMPONENTES

O componente é caracterizado no modelo como qualquer parte de um sistema de microenergia que gera, entrega, converte ou armazena energia. O sistema a ser simulado pode ser composto por dez tipos de componentes dos quais três são considerados recursos renováveis intermitentes, a saber: módulos fotovoltaicos, turbinas eólicas e turbinas hidráulicas. As turbinas hidráulicas consideradas no modelo são as que operam sem reservatório, também chamadas de turbinas a fio d'água.

Outros três componentes são responsáveis pelo despacho da carga e são: os geradores, a própria rede e os boilers. Além disso, existem dois tipos de componentes pertencentes ao modelo são os conversores e os eletrolizadores. Os primeiros são usados para converter a eletricidade de corrente alternada (ca) para contínua (cc) e/ou vice-versa. Já o segundo é responsável por converter a energia elétrica em hidrogênio por meio da eletrólise da água.

Por fim, os dois últimos componentes fazem o armazenamento de energia e são: os bancos de baterias e os tanques de hidrogênio. As baterias armazenam energia na forma de corrente contínua e podem descarregá-la de maneira uniforme no sistema e os tanques de hidrogênio armazenam o hidrogênio oriundo da eletrólise na forma de gás a ser utilizado para movimentar geradores.

No restante desta seção serão abordados detalhes do modelamento dos componentes a serem utilizados na simulação em Fernando de Noronha.

#### 3.4.1 *Conjunto de painéis solares (PV Array)*

O modelo calcula todo o conjunto de módulos solares como se fosse apenas um módulo fotovoltaico. Além disso, considera que a produção de eletricidade em corrente contínua é diretamente proporcional a radiação solar incidente nele, independentemente da

temperatura e voltagem a que é submetido. A potência do conjunto  $P_{pv}$  é calculada pela seguinte fórmula:

$$P_{PV} = f_{PV} Y_{PV} \frac{I_T}{I_S} \quad ; \quad (1)$$

Onde  $f_{pv}$  é o fator de redução,  $Y_{pv}$  é a capacidade nominal do conjunto de módulos (kW),  $I_T$  radiação global (feixe principal e componentes difusos) que incide na superfície do painel (kW/m<sup>2</sup>), e  $I_S$  equivale a 1 kW/m<sup>2</sup>, que é a quantidade padrão de radiação utilizada para determinar a capacidade nominal do painel.

A radiação global é calculada, para cada hora do ano, segundo o modelo HDKR (DUFFIE & BECKMAN, 2006), que leva em consideração o valor presente da insolação na superfície do painel, o ângulo de orientação do painel em relação ao solo e a capacidade reflexiva do solo (ou albedo).

O fator de redução é um fator de escala ou de eficiência que considera os efeitos da poeira na superfície do painel, perdas no cabo de transporte da energia, ou qualquer outra circunstância que atrapalhe o seu funcionamento ideal.

Para descrever o custo do conjunto fotovoltaico, o usuário também deve informar: a vida útil, o custo de aquisição em dólares, o custo de troca em dólares, e o custo de operação e manutenção em dólares por ano.

### 3.4.2 Turbinas Eólicas

A turbina eólica é modelada como um dispositivo que converte a energia cinética do vento em eletricidade tanto em corrente alternada quanto em corrente contínua de acordo com uma curva específica de potência versus velocidade do vento na altura do eixo. São assumidas condições de temperatura e pressão padrões, que implica numa densidade do ar de 1,225 kg/m<sup>3</sup>, para a curva de potência ser traçada no modelo.

A cada hora o modelo calcula a potência resultante da turbina eólica em quatro passos. Primeiro, determina a média da velocidade do vento para aquela hora na altura do anemômetro de acordo com os dados informados. Depois, calcula a velocidade

correspondente na altura do eixo usando a função logarítmica ou a função exponencial. Em terceiro lugar, usando-se a velocidade calculada o modelo encontra-se a potência de saída por meio da curva de potência inserida no modelo. Por último, multiplica-se essa potência de saída pela taxa da densidade do ar, que é obtida pela razão entre a atual densidade do ar e a densidade do ar padrão. Essa densidade do ar no sítio é calculada utilizando-se a *US Standard Atmosphere* (WHITE, 1986). O modelo assume a taxa de densidade constante ao longo do ano.

Para completar o modelamento, além de informar a curva de potência do gerador eólico e a altura de seu eixo, o usuário deve informar as variáveis econômicas do gerador, tais como: vida útil, custo de aquisição em dólares, custo de troca em dólares, e custo de operação e manutenção em dólares por ano.

### 3.4.3 Geradores

Um gerador consome combustível para produzir eletricidade e possivelmente calor como subproduto. O modelo computacional compreende vários tipos diferentes de gerador: combustão interna, microturbinas a gás, células a combustível, motores térmicos do tipo *stirling*, geradores termofotovoltaicos e geradores termelétricos.

O modelo computacional pode simular até três geradores diferentes simultaneamente tanto em corrente alternada como em corrente contínua usando qualquer combustível, sendo também possível adicionar combustíveis em sua biblioteca, caso necessário. O modelo assume um consumo linear de combustível conforme equação que segue:

$$F = F_0 Y_{gen} + F_1 P_{gen} \quad ; \quad (2)$$

onde  $F_0$  é o coeficiente de intersecção do eixo y da curva de combustível,  $F_1$  é a inclinação da curva,  $Y_{gen}$  é a capacidade nominal do gerador em kW, e o  $P_{gen}$  é a saída elétrica do gerador em kW. A unidade de  $F$  vai depender das unidades de medida de seu combustível. As mais comuns são m<sup>3</sup>/h, l/h e kg/h.

O usuário também pode informar uma programação para o gerador, como de ligar somente no período noturno, ou nos finais de semana, por exemplo. Ele também pode ser

combinado com a cogeração de calor, devendo-se informar apenas a taxa de recuperação de calor. Para este tipo de gerador o modelo assume sempre a eficiência total, ou seja, todo o consumo de combustível será transformado em eletricidade ou calor, sem perdas.

Os custos de aquisição em dólares, reposição em dólares e de operação e manutenção (O&M) em dólares por ano, também devem ser informados pelo usuário. O custo de O&M deve englobar apenas os custos de manutenção, uma vez que, no modelo, todos os dispositivos de despacho de carga possuem seu custo de combustível calculado de forma separada.

O modelo também calcula o custo fixo e marginal do gerador e utiliza-os quando simula a operação dos sistemas. O custo fixo refere-se ao custo do gerador rodando sem produzir nenhuma energia. E o custo marginal é o custo adicional calculado para aquele gerador produzir energia enquanto funciona.

A equação a seguir é utilizada para o cálculo do custo fixo:

$$c_{\text{gen,fixed}} = c_{\text{om,gen}} + \frac{C_{\text{rep,gen}}}{R_{\text{gen}}} + F_0 Y_{\text{gen}} c_{\text{fuel,eff}} \quad ; \quad (3)$$

onde  $C_{\text{om,gen}}$  é o custo de O&M em dólares por hora,  $C_{\text{rep,gen}}$  é o custo de troca em dólar,  $R_{\text{gen}}$  é a vida do gerador em horas,  $F_0$  é o coeficiente de intersecção do eixo y da curva de combustível na quantidade do combustível por hora,  $Y_{\text{gen}}$  é a capacidade nominal do gerador em kW, e  $C_{\text{fuel,eff}}$  é o preço efetivo do combustível em dólares, que incluiu penalidades por emissões, por exemplo.

A equação do custo marginal é calculada da seguinte maneira:

$$c_{\text{gen,mar}} = F_1 c_{\text{fuel,eff}} \quad ; \quad (4)$$

onde  $F_1$  é a inclinação da curva de combustível na quantidade do combustível por hora por killowathora e o  $C_{\text{fuel,eff}}$  é o preço efetivo do combustível em dólares, que leva em consideração eventuais penalidades, como explicado anteriormente.

#### 3.4.4 Banco de baterias

Um banco de baterias é formado por um conjunto de uma ou mais baterias. O modelo entende a bateria como um equipamento capaz de armazenar uma certa quantidade de energia em corrente contínua numa eficiência fixa de transporte de energia indo e vindo, limitada pela velocidade de carga e descarga, a profundidade máxima de descarga, e a quantidade de ciclos possíveis antes de ser substituída.

O modelo assume que as propriedades das baterias permanecem constantes durante toda a sua vida sem ser afetadas por fatores externos como a temperatura. As propriedades físicas das baterias consideradas pelo modelo são: tensão nominal, curva de capacidade, curva de vida, estado de carga mínimo e eficiência de ida e volta na troca de energia.

A curva de capacidade mostra a capacidade de descarga da bateria em ampere-hora versus a corrente de descarga em amperes. Os fabricantes determinam cada ponto desta curva medindo quantos ampere-hora podem ser descarregados em corrente contínua numa bateria com plena carga. Tipicamente, a capacidade decresce com o aumento da corrente de descarga.

Já a curva de vida mostra o número de ciclos de carga e descarga que a bateria pode resistir versus a profundidade do ciclo. O número de ciclos para a falha, em geral, decresce com o aumento da profundidade do ciclo.

O estado mínimo de carga representa o limite de carga que pode ser descarregado sem que a bateria sofra danos permanentes. O modelo respeita esse limite e não permite que a simulação o ultrapasse. A eficiência de ida e volta indica o percentual de energia que pode entrar ou sair da bateria sem perdas.

Além desses parâmetros, o usuário deve indicar ao modelo o custo de aquisição e troca das baterias em dólares e o custo de O&M em dólares por ano. Assim como em outros sistemas de despacho de cargas, o modelo calcula um custo fixo e um custo marginal para o banco de baterias. No entanto, como não existe um custo operacional para manter as baterias funcionando, o custo fixo é zero. Já o marginal é calculado pela equação que segue:

$$c_{bw} = \frac{C_{rep,batt}}{N_{batt} Q_{lifetime} \sqrt{\eta_{rt}}} ; \quad (5)$$

onde  $C_{rep,batt}$  é o custo de reposição da bateria em dólares,  $N_{batt}$  é o número de baterias contidas no banco de baterias,  $Q_{lifetime}$  é a vida útil de uma única bateria em kWh, e  $\eta_{rt}$  é a eficiência de troca da carga da bateria.

### 3.4.5 Conversores

O conversor é um equipamento que converte energia elétrica de corrente contínua (cc) para corrente alternada (ca) num processo chamado de inversão e/ou no fluxo contrário, de ca para cc num processo chamado retificação. Dois tipos de conversores podem ser modelados: o conversor em estado sólido ou o conversor rotativo.

O tamanho do conversor é uma medida informada pelo usuário que especifica a quantidade máxima de potência que pode ser convertida. O modelo assume essa capacidade como constante ao longo da vida útil do conversor. O modelo também permite que o usuário indique que o conversor trabalhe em paralelo com uma outra carga, por exemplo, um gerador ac, lembrando que nem todos os conversores são capazes de sincronizar-se com a frequência da rede e não podem ser usados desta maneira.

O usuário também deve especificar a eficiência do conversor, mantida constante ao longo da vida útil e as variáveis econômicas: custo de aquisição e troca em dólares, O&M em dólares por ano, e a vida útil do equipamento.

### 3.5 MODELAMENTO ECONÔMICO

Tanto no processo de simulação quanto no processo de otimização, os fatores econômicos são preponderantes no modelo. No primeiro caso, o modelo procura simular o sistema de modo a obter o menor custo presente líquido (Net Present Cost – NPC) possível. E no segundo caso, dentre os sistemas simulados com menor NPC, o modelo escolhe o melhor, chamando-o de ótimo.

O modelo utiliza o NPC como representante do custo do ciclo de vida do sistema. Entende-se que este parâmetro concentra todos os custos e receitas que ocorrem durante o projeto de uma vez só no momento presente e em dólares. O NPC inclui os custos da construção inicial, os custos de reposições, manutenção, combustível, multas, penalidades de emissões, além da eventual compra de energia da rede. Também inclui as receitas oriundas da venda de energia para rede, recuperação de investimento, entre outros. No modelo, para os custos são atribuídos valores positivos e para as receitas valores negativos. Assim, ele difere do conceito de Valor Presente Líquido apenas no sinal da variável.

Para o cálculo do NPC a seguinte equação é utilizada no modelo:

$$C_{NPC} = \frac{C_{ann,tot}}{CRF(i, N)} \quad ; \quad (6)$$

onde  $C_{ann,tot}$  é o custo total anualizado (\$/ano), incluindo o capital investido, o custo da troca, o custo de O&M e o custo de combustível.  $CRF$  é o fator de retorno de capital que é a taxa usada para calcular o valor presente de uma série de fluxos de caixa e é dado pela equação:

$$CRF(i, N) = \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \quad ; \quad (7)$$

onde  $i$  é a taxa anual de interesse (%) e  $N$  é o tempo do projeto em anos.

Um outro parâmetro muito utilizado para comparação de projetos e que também é calculado pelo modelo é o Custo de Energia Nivelado (Levelized Cost of Energy - COE) que é o custo da energia por quilowatt-hora (\$/kWh), dado pela seguinte equação:

$$\text{COE} = \frac{C_{\text{ann,tot}}}{E_{\text{prim}} + E_{\text{def}} + E_{\text{grid,sales}}} ; \quad (8)$$

onde  $C_{\text{ann,tot}}$  é o custo total anualizado,  $E_{\text{prim}}$  e  $E_{\text{def}}$  são a quantidade total da carga primária e da carga adiável ou *deferrable* por ano, e a  $E_{\text{grid,sales}}$  é a eventual carga vendida para a rede, também no ano.

Embora o COE seja muito utilizado em projetos de engenharia e seja realmente muito útil, o modelo opta por utilizar o NPC como métrica principal. Há ainda muita divergência entre os especialistas na maneira como se faz o cálculo do COE, diferentemente do que ocorre com o NPC, o qual possui metodologia de cálculo já consagrada.

## **4. CARACTERIZAÇÃO DA ILHA DE FERNANDO DE NORONHA**

Dotado de atributos bióticos, abióticos, estéticos, paisagísticos e culturais, especialmente importantes para a qualidade de vida e o bem-estar de populações humanas, o Arquipélago de Fernando de Noronha (FN) é o local ideal para uma iniciativa que priorize o uso de fontes limpas e renováveis de energia.

O grande incêndio ocorrido na usina termelétrica instalada na ilha no ano de 2007 sublimou a criticidade do problema. A urgência na mudança da matriz energética não se evidencia apenas pela inadequabilidade da fonte de energia por si só, mas também na precariedade da infraestrutura de transbordo de combustíveis para o abastecimento da ilha.

Uma vez que os recursos energéticos renováveis estão indissociavelmente ligados a localização geográfica, para simular estas características, se faz necessária uma contextualização de FN para um correto estudo de sua capacidade de geração e consumo de energia.

### **4.1 LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS**

O Arquipélago de Fernando de Noronha (FN) situa-se a quatro graus abaixo da linha do Equador, nas coordenadas 3,54 S de latitude e 32,25W, distante 545 km de Recife e 360 km de Natal. É constituído por 21 ilhas, rochedos e ilhotas com um total aproximado de 26 km<sup>2</sup>. A ilha principal que dá o nome ao arquipélago possui área de 17,6 km<sup>2</sup>.

No arquipélago de FN existem quatro Unidades de Conservação, duas federais: o Parque Nacional Marinho que abrange 70% do arquipélago enquanto a APA Fernando de Noronha – Rocas – São Pedro e São Paulo que abrange 30%. E duas estaduais: uma APA e um Parque Nacional, o primeiro abrange a totalidade do arquipélago e o segundo quase a totalidade.

Além disso, o arquipélago é detentor dos títulos de Reserva da Biosfera da Mata Atlântica e Sítio de Patrimônio Natural Mundial, concedidos pela ONU, por meio da UNESCO, a qual avaliou os seguintes critérios:

- Ser exemplo destacado nos processos ecológicos e biológicos da evolução e do desenvolvimento de ecossistemas terrestres, de água doce, costeiros e marinhos e de comunidades de plantas ou animais;
- Representar fenômenos naturais extraordinários ou áreas de excepcional beleza natural e estética; e
- Conter os habitats naturais mais representativos e importantes para a conservação *in situ* da diversidade biológica, incluindo espécies ameaçadas de excepcional valor do ponto de vista da ciência ou da conservação.

Este complexo turístico-ecológico é constituído por Distrito Estadual, administrado pelo governo de Pernambuco, uma Área de Proteção Ambiental (Figura 33 - parte verde) e o Parque Nacional Marinho (Figura 33 – parte laranja), que está sob jurisdição do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade – ICMBIO.

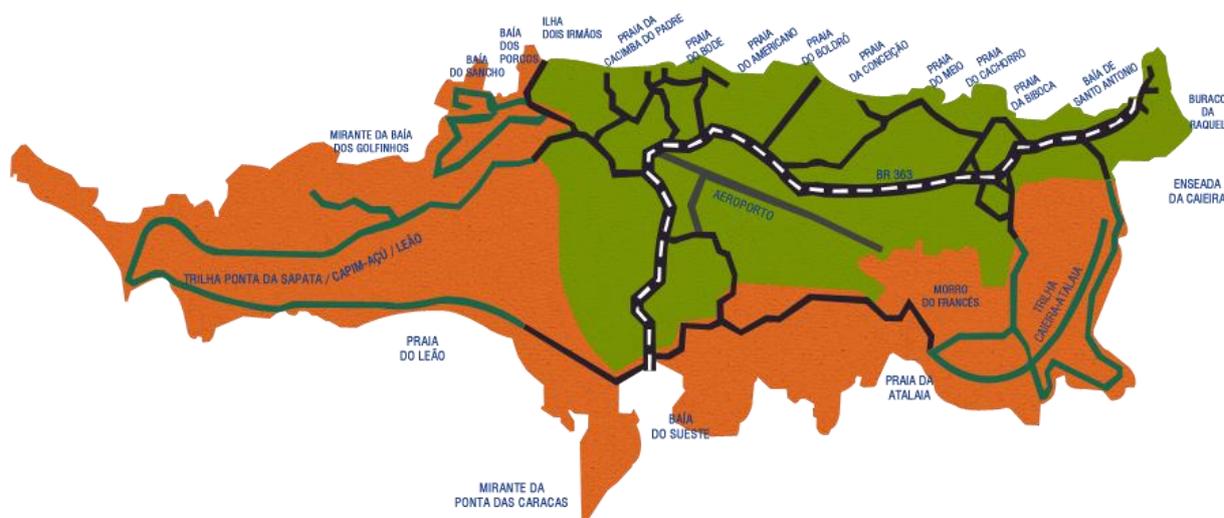


Figura 33 – Mapa da ilha de FN com destaque para áreas de preservação ambiental

O arquipélago e os montes submarinos correlatos, que ocorrem desde o litoral do Ceará correspondem a diversos episódios vulcânicos e sucessivos períodos de acumulação de sedimentos, de onde se formaram as rochas ígneas vulcânicas. A ilha principal, que dá o nome ao Arquipélago, possui contorno irregular, com muitas reentrâncias, saliências e superfícies onduladas, constituídas por planaltos, morros e vales, delimitados externamente pela baixada litorânea.

O clima guarda semelhanças com o Agreste Nordestino, sobretudo pelas estações seca e chuvosa, bem definidas, e pela acentuada irregularidade da precipitação pluvial entre os anos. A precipitação pluvial média anual é de 1.275 mm, estendendo-se na estação chuvosa de fevereiro a julho.

A temperatura média é de 25,4 graus. Os ventos são constantes, com direção predominante Sudeste (SE), velocidade média é de 6,6 m/s, com maiores intensidades entre julho e agosto. Segundo ( Governo do Estado de Pernambuco, 2009). A umidade média é de 81% enquanto a evapotranspiração é de 1.942 mm/ano. Além disso, a insolação média máxima ocorre no mês de novembro (312,5 h) e mínima em abril (216,8 h).

A vegetação primária foi bastante modificada pela ação antrópica durante mais de 500 anos de ocupação. A vegetação predominante em FN é composta por espécies típicas do agreste Nordestino, perdendo folhagem na estação seca. Principais espécies: Gameleira, Mungugu, Burra Leiteira e as Jitiranas. Na ilha existe a única ocorrência de mangue insular no Atlântico Sul, localizada na Baía do Sueste, ocupando uma área de 1500 m<sup>2</sup>.

Encontra-se também no Arquipélago uma variada e exótica fauna marinha. As ilhas estão repletas de peixes, esponjas, algas moluscos e corais, dentre eles o mais abundante é o *Montrastea Cavernosa*. Nas águas rasas encontram-se os peixes coloridos, como a donzela de rocas, o sargentinho, a coroca e as moréias.

Já nas águas profundas podem ser encontrados o frade, o budião, a ariquita, a piraúna e o borboleta. Os cações, lambarú e arrais podem ser vistos repousando no fundo. Além disso, FN é o único lugar em todo o Oceano Atlântico onde ocorre a concentração dos golfinhos rotadores e a tartaruga-de-pente. Esta última usa as praias de FN como local de crescimento e alimentação, e encontra-se altamente ameaçada de extinção devido à pesca para confecção de óculos, pentes e bijouterias.

A fauna terrestre é igualmente abundante. Destacam-se a lagartixa, a cobra de duas cabeças, o caranguejo e as aves em geral. Existem 40 espécies de aves registradas no arquipélago fazendo este abrigar as maiores colônias reprodutivas de aves marinhas das ilhas do Atlântico Sul. Dentre essas espécies citam-se aves parentes do pelicano como os mumbecos, a catraia e os rabos de junco.

## 4.2 OCUPAÇÃO DA ILHA E ASPECTOS SÓCIO-ECONÔMICOS

O histórico da ilha revela um processo de colonização irregular, entremeado por fases de abandono. Por longos períodos FN desempenhou função carcerária, o que é marcante na memória de sua população atual, uma vez que muitos deles descendem daqueles. Períodos que antecederam estes momentos também permanecem vivos por meio de vestígios de construções, como é o caso dos Fortes que já serviram às forças armadas portuguesas e, em tempos mais recentes, brasileiras.

Cabe destacar que no processo de ocupação que vigorou até o final de 2002 não houve preocupação com a preservação e conservação ambiental não eram dominantes, implicando num adensamento desordenado da população. Este último fator tem implicado em constante disputa por espaço físico, espaço de negócios e recursos naturais como água potável. Atualmente o controle e fiscalização sobre os projetos e construções na Ilha são realizados de maneira sistemática tanto pela Administração de Fernando de Noronha - ADEFN quanto pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade - ICMBIO, a fim de se coibir obras irregulares e acréscimo vegetativo da população.

De acordo com o último recadastramento ( Governo do Estado de Pernambuco, 2009), a população é de 3.453 pessoas, sendo 2.125 moradores permanentes, 1.328 moradores temporários (empresas residentes e institutos de pesquisa baseados na ilha). O fluxo de turistas é de cerca de 3.100 pessoas por mês, com permanência média de 3,5 dias.

A economia de FN está calcada na pesca artesanal, na agricultura e, principalmente, no turismo. No entanto, a pesca é artesanal e não dispõe de infra-estrutura adequada e a agricultura pode ser considerada apenas de subsistência. Desta maneira, praticamente todas as famílias hoje vivem do turismo ou de atividades relacionadas ou dependentes dele.

Existem hoje em FN 108 pousadas e hospedarias domiciliares e 1 hotel. A oferta de estabelecimentos gastronômicos é composta de: 17 restaurantes, 14 bares e 3 cafés e docerias. Assim, o grande desafio é consolidar o turismo como atividade econômica e como fator de proteção ambiental, uma vez que a natureza, em todas as suas formas, é o grande produto turístico a ser explorado.

#### 4.3 A PEGADA ECOLÓGICA DE FERNANDO DE NORONHA

A pegada ecológica é basicamente uma medida que correlaciona o quanto nós temos de natureza e o quanto nós usamos dessa natureza. Numa perspectiva global, a pegada ecológica de um sistema antrópico está diretamente relacionada ao tamanho (área) dos ecossistemas produtivos do globo terrestre, ou seja, um cálculo usado para estimar o impacto de uma população sobre o meio ambiente, em termos de área necessária para produção dos recursos que são consumidos por essa população, e assimilação de rejeitos ou resíduos gerados por ela.

A análise da pegada ecológica é o “inverso-complementar” da lógica da capacidade de carga, ou seja, enquanto esta define a carga máxima de população que um território pode suportar sem comprometer seus processos produtivos, aquela foca na avaliação do território que esta sendo efetivamente utilizado por uma população com um determinado estilo de vida.

A pegada ecológica mostra o quanto uma população se utiliza de áreas produtivas (ecossistemas) além daquelas em que ela propriamente habita. Quanto maior o consumo de recursos e a geração de resíduos, maior o tamanho da pegada para sustentar o sistema, isto é, maior a demanda por áreas de terra para garantir a manutenção de suas atividades.

A definição da área necessária para atender um determinado sistema populacional urbano, uma cidade, por exemplo, implica considerar não apenas o número de indivíduos presentes, mas a dinâmica existente naquele sistema, tais como: o nível de consumo, o desenvolvimento de tecnologias, a eficiência da produção dos bens, taxas de importação e exportação e a administração dos recursos naturais.

O cálculo da pegada ecológica requer uma quantidade significativa de informações sobre recursos naturais, bens e serviços econômicos, processos industriais, eficiência tecnológica e energética, produtividade agrícola e de pesca, entre outros, muitas vezes difíceis de serem obtidos em nível regional e local. Não obstante, por ser considerado atualmente um dos principais indicadores sobre a sustentabilidade humana na Terra, estimativas e aproximações são realizadas, enquanto um estudo mais detalhado vai sendo desenvolvido em âmbito global<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup> Ver por exemplo: [www.footprintnetwork.org](http://www.footprintnetwork.org)

Apesar da dificuldade de acesso a alguns dados, o relatório conduzido pela Elabore (Ministério de Minas e Energia - MME, 2008) desenvolve uma primeira estimativa da pegada ecológica de FN. A pegada ecológica é expressa com base na unidade normalizada denominada hectares globais (gha). A biosfera terrestre tem 11,2 bilhões de hectares, terrestres e aquáticos, biologicamente produtivos. Um hectare global equivale a um hectare com a produtividade média desses 11,2 bilhões de hectares bioprodutivos.

Com uma população mundial aproximada de 6,5 bilhões de pessoas, estima-se em 1,78 gha a média de área bioprodutiva disponível para cada membro da espécie humana. Porém, as diferenças de consumo nas economias globais e respectivas populações e áreas de domínio, levam a uma diferenciação nessa apropriação de hectares globais bioprodutivos conforme descrito no trabalho de Kitzes (KITZES et al., 2007).

De maneira geral, são duas fórmulas gerais utilizadas na contabilidade de pegada ecológica de uma população:

$$PE = C \times P \times FE \quad (9); e$$

$$BC = A \times FP \times FE; \quad (10)$$

onde, PE é a pegada ecológica (área demandada) em gha, C é o consumo em ton/ano; P é a produção global (ton/ha/ano); BC é a biocapacidade (em gha) de uma região; A é a área da região (ha), FE é o fator de equivalência (gha/ha) e FP o fator de produção (ha/ha).

A região em que se localiza uma população sob análise de pegada ecológica, contribui com a capacidade produtiva ecológica da terra, sendo que a sua biocapacidade total é estimada pela soma de todas as suas áreas bioprodutivas. O excesso na utilização dos recursos naturais além do que as áreas bioprodutivas podem suprir será indicado por uma pegada ecológica maior do que a biocapacidade, o que é chamado de *overshoot* e caracteriza a região como portadora de déficit ecológico:

$$\text{Saldo Ecológico (gha)} = \text{Pegada Ecológica (gha)} - \text{Biocapacidade (gha);} \quad (11)$$

Os resultados mostram que Fernando de Noronha tem ao total 1.700 hectares, mas as atividades dos ilhéus e dos turistas no ano de 2006 utilizaram (ou “consumiram”) 231.000 hectares, ou seja, a pegada ecológica total foi então de quase 136 vezes a área de Noronha.

Neste mesmo ano, a pegada ecológica em Noronha foi de 2,54 há/ind, 14% maior que a planetária que é de 2,23, e 21% maior que a média nacional que é de 2,10. Estes valores ainda não refletem todo o problema, pois uma região poderia ter uma pegada alta, contando que tivesse recursos (biocapacidade) também altos. Mas este não é o caso de Fernando de Noronha, pois possui 0,12 ha/ind contrastando com a biocapacidade planetária de 1,78 ha/ind, possuindo saldo ecológico de FN é de -2,42 gha/ind.

A província de Veneza na Itália, por exemplo, tem saldo ecológico de -3,38 gha/ind e Florianópolis na ordem de -1,22 gha/ind (BITTENCOURT, P et al., 2007), o que evidencia a tendência de que algumas áreas turísticas tendem a possuir saldos ecológicos negativos. Em FN, essa situação se intensifica devido a aspectos como insularidade, onde pesam os custos de transporte, e a pequena extensão territorial, que configura limitações para áreas bioprodutivas.

Porém, isso não significa que o saldo ecológico da Ilha não possa ser anulado, ou mesmo avançar a patamares positivos, ou seja: biocapacidade local maior que a pegada ecológica, para tanto são propostas as medidas a seguir:

#### 1) Consumo:

- energia: uso de sistemas de energia alternativa (ex. eólica e solar); racionalização no uso de combustíveis (ex. incentivo ao transporte coletivo e uso de bicicletas);
- consumo de água: priorização de empreendimentos voltados para a captação de água de chuva (ex. recuperação e ampliação dos sistemas de açudes), reciclagem de água (ex. cinza e negra), uso de sistemas alternativos de tratamento de água (ex. *wetlands*);
- consumo consciente: orientação para diminuição da geração de lixo com regras de consumo, implantação de coleta seletiva e reaproveitamento de orgânicos.

#### 2) Bioprodução:

- intensificação da produção local de alimentos: com uso de tecnologia de ponta agroecológica;
- incentivo à pesca sustentável;
- reflorestamento de áreas degradadas.

#### 4.4 CENÁRIO ENERGÉTICO E DESAFIOS

Uma das metas da Administração de Fernando de Noronha é reduzir a pegada ecológica por meio da substituição da matriz energética por fontes mais renováveis, corroborando para a sustentabilidade da ilha de uma maneira geral.

A geração e distribuição de energia elétrica são de responsabilidade da Companhia de Eletricidade de Pernambuco – CELPE, empresa concessionária do sistema, que atua na ilha desde 1988.

O sistema de produção de energia elétrica de FN é baseado em geradores diesel, em esquema de rodízio, por meio de uma usina termelétrica (Figura 34) localizada no centro do Bairro Boldró, composta de cinco máquinas movidas a diesel S10 da Petrobrás.

- 02 Geradores Cummins QST 30 de 900 kVA;
- 01 Gerador Cummins KTA de 1200 kVA;
- 02 Geradores Caterpillar de 600 kVA - reserva

O combustível que abastece a Usina Termelétrica, com consumo mensal aproximado de 380 mil litros, é transportado através de uma logística complicada, realizada por embarcação, também movida a óleo diesel. Para alocação de tão grande quantidade de óleo, a CELPE dispõe de 8 tanques (Figura 34): 7 tanques de 30 mil litros e 1 tanque de 19 mil litros.



Figura 34 – Tanques de armazenamento e um dos grupos geradores diesel

A distribuição na ilha é feita por meio de três redes alimentadores que atendem aos bairros e são detalhadas a seguir:

F1 → Vila do Porto, Vila do Trinta, Vila dos Três Paus e Vila Floresta Nova;

F2 → Aeroporto, DPV e Sueste; e

F3 → COMPESA, Vila dos remédios, Boldró e Vila Floresta Velha.

Na tabela 6 são apresentados os dados detalhados do suprimento das redes anteriormente mencionadas:

Tabela 6 – Redes de alimentação da Ilha ( Governo do Estado de Pernambuco, 2009)

Alimentadores	Extensão da Rede (km)		No de Transformadores	Potência Instalada (kVA)	No de consumidores	
	Alta tensão	Baixa tensão			Alta Tensão	Baixa Tensão
F1	5,47	7,94	14	1.662,50	1	366
F2	4,92	4,82	13	1.020	2	83
F3	4,03	6,64	14	1.567,50	2	307

A demanda energética máxima da ilha foi de 1,99 MW e ocorreu em 2007. A demanda média é da ordem de 1,80 MW. Cerca de 30% dessa carga é utilizada para alimentar o maior dessalinizador de água para uso humano do Brasil que fica na Companhia Pernambucana de Saneamento - COMPESA. Outros 20% da carga é utilizada para alimentar o Comando da Aeronáutica, a Administração da Ilha, e as duas maiores pousadas da ilha (Pousada Zé Maria e Pousada Maravilha).

Outrossim, havia uma turbina eólica de 225 kVA instalada nas proximidades do Porto Santo Antônio ofertando energia. No entanto, em 2009 uma tempestade assolou a ilha e a turbina foi danificada por uma descarga atmosférica e conseqüentemente, removida da ilha.

Em recente estudo realizado na ilha por meio da contabilização do consumo de combustíveis fósseis em FN (Ministério de Minas e Energia - MME, 2008), foi observado que a ilha encontra-se com altos índices de emissão de CO<sup>2</sup> per capita. O valor encontrado foi de 50,33 tCO<sup>2</sup>, que equivale ao emitido por populações de países desenvolvidos.

Esse valor está intrinsicamente ligado à poluição gerada por sua única fonte de energia à base de óleo diesel. Soma-se a isto o fato da operação de transbordo de combustíveis na área do porto ser de extrema vulnerabilidade para os sistemas naturais da ilha, pois há sempre o risco iminente de derrame e vazamento na operação de transferência do combustível armazenado nas embarcações para os tanques em terra.

Além do risco ambiental, o porto fica fechado por dois dias no mês para transbordo desses resíduos inorgânicos, atrapalhando sobremaneira o fluxo de turistas na ilha, gerando uma imagem negativa da ilha. Além disso, são estocados constantemente 230 mil litros de óleo diesel, deixando o arquipélago à beira de uma catástrofe ambiental sem precedentes caso ocorram vazamentos e explosões.

O incêndio ocorrido na Usina Termelétrica de Tubarão, em 12 de junho de 2007, tornou latente que a mudança da matriz energética não se trata apenas de uma contribuição para o “efeito estufa” e “aquecimento global”, mas também de uma iniciativa mitigadora dos riscos ambientais que os combustíveis fósseis podem causar à biodiversidade da ilha.

Estudos e pesquisas têm sido conduzidos para viabilizar a substituição de toda a matriz energética da ilha, de maneira radical ou escalonada, considerando as dificuldades inerentes de transporte e mesmo de instalação dessas fontes na ilha.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O estudo foi realizado com apoio de programa computacional e utilização de tecnologias passíveis de implementação em Fernando de Noronha bem como parâmetros econômicos reais, vigentes em solo brasileiro. Além dos dados dos sistemas e equipamentos, foram utilizados dados coletados *in loco* como, por exemplo, a velocidade do vento, sendo que outros foram simulados por meio de estruturas do software conforme capítulo 3.

Algumas restrições do local foram levadas em consideração como, por exemplo, as dimensões e o peso da turbina eólica, que dependendo do tamanho não poderia ser descarregada no porto da ilha principal. Outra condição limitante são as áreas permitidas para colocação de painéis solares já que funcionam na ilha duas áreas de proteção ambiental.

Utilizando estudos de viabilidade de recursos naturais já realizados na ilha principal ( Governo do Estado de Pernambuco, 2009) e as tecnologias que vêm se tornando economicamente vantajosas no Brasil foram selecionados, para esse estudo, os painéis fotovoltaicos, os geradores eólicos, e os sistemas de armazenamento por baterias. Os resultados serão apresentados de maneira escalonada e em ranking de acordo com o seu custo presente líquido (Net Present Cost - NPC em inglês).

Como parte dos cenários a serem estudados, discutidos e analisados, ao final do capítulo verificaremos como se comporta o sistema ótimo tendo que suprir uma carga maior, dado pela substituição da frota veicular insular movida a motores de combustão interna por uma frota de veículos elétricos, bem como a viabilidade econômica, energética e ambiental que tal fato ocasiona.

### 5.1 SISTEMA ENERGÉTICO ATUAL

Embora com as peculiaridades de um ambiente insular, a infraestrutura urbana em Fernando de Noronha pode ser comparada a maioria das cidades, onde as ações da gestão são, normalmente, de caráter corretivo, com foco apenas sobre o reparo de situações problemáticas já estabelecidas.

Conforme mostrado na seção 4, após o acidente e quebra da turbina eólica em 2009, o sistema de abastecimento energético de Fernando de Noronha é, nos dias atuais, totalmente baseado em geradores diesel. Eles devem suprir uma demanda média de 1,8 MWh ou 43 MWh/dia. O custo do óleo diesel mensal (aproximadamente US\$ 1,83 - cotação de Julho/13) é dado pela soma do preço na nota fiscal (R\$ 2,09) que é mais do que dobrado com os custos logísticos (R\$ 2,11) envolvendo o transporte marítimo do Rio de Janeiro ao Porto de Suape (Recife), do Porto de Suape até o Porto em Fernando de Noronha, somados ainda ao custo do transporte dentro de Fernando de Noronha. Desta maneira o valor total é de R\$ 4,20, em torno de US\$ 1,83 (Cotação de junho/13).

No total são cinco máquinas diesel, aqui mostradas com seus valores de mercado (Tabela 11), e que funcionam intercaladas de 8 em 8 horas. A potência instalada total hoje é de 4,2 MW. Os dados das máquinas foram retirados *in loco* e os preços são os mesmos praticados no mercado brasileiro.

Tabela 11 – Dados dos Geradores Diesel

Gerador tipo 1 Cummins QST30G3 - 1023 kVA (x2)			Gerador tipo 2 KTA50g3 - 1375 kVA (x1)			Gerador tipo 3 Caterpillar de 684 kVA (x2)		
Tamanho	900	kW	Tamanho	1.200	kW	Tamanho	600	kW
Custo Novo	675.000	\$	Custo Novo	900.000	\$	Custo Novo	450.000	\$
Custo Troca	540.000	\$	Custo Troca	720.000	\$	Custo Troca	360.000	\$
O e M	1,5	\$/hr	O e M	2,0	\$/hr	O e M	1,5	\$ - hr
Vida útil	15.000	horas	Vida útil	15.000	horas	Vida útil	15.000	horas

Inserindo os dados de carga de Fernando de Noronha e dos geradores diesel que lá se encontram as simulações são iniciadas no modelo computacional. Para todas as simulações foram consideradas a taxa SELIC (7,9% em 2013 - Banco Central do Brasil) como taxa anual de interesse e o período de projeto de 25 anos.

				Label (kW)	Label (kW)	Label (kW)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.	Diesel (L)	Label (hrs)	Label (hrs)	Label (hrs)
				900	1200		\$ 1,575,000	10,636,327	\$ 116,092,0...	0.684	0.00	5,413,680	8,760	8,760	
				900		1200	\$ 1,575,000	10,645,087	\$ 116,186,3...	0.684	0.00	5,413,680	8,760		8,760
				900	1200	600	\$ 2,025,000	10,631,455	\$ 116,489,5...	0.686	0.00	5,413,680	8,760	8,760	0
					1200	1200	\$ 1,800,000	11,134,011	\$ 121,675,3...	0.717	0.00	5,623,920		8,760	8,760

Figura 35 – Simulação apenas com os geradores diesel

Verificamos que o resultado ótimo é apresentado na Figura 35 (sublinhado) com apenas dois grupos geradores (do tipo 1 e 2, conforme tabela 1) totalizando 3 MW. Vemos que para uma demanda média de 1,8 MW, segundo o modelo computacional não ocorrerão picos maiores de 1,2 MW o que nos leva a afirmar que o sistema instalado de Fernando de Noronha que possui 4,2 MW está superdimensionado.

Também é possível observar na figura 37 que o capital inicial exigido é de 1.575.000,00 dólares, o custo operacional é de 10.636.327,00 dólares, e os gastos trazidos para o custo presente líquido (NPC) é de U\$ 116.092.024,00.

O calculo de emissões do modelo apresentou o consumo de mais de 14 mil toneladas por ano, conforme mostra a Figura 36. Este dado explica o alto índice (comparável a de cidades industrializadas) de emissão dos ilhéus noronhenses, conforme mostrado em capítulos anteriores.

Pollutant	Emissions (kg/yr)
Carbon dioxide	14,256,001
Carbon monoxide	35,189
Unburned hydrocarbons	3,898
Particulate matter	2,653
Sulfur dioxide	28,629
Nitrogen oxides	313,993

Figura 36– Tela com a emissão de poluentes no sistema apenas com geradores diesel

Quanto ao valor gasto com o combustível, este chegou a quase 92% do custo do sistema para os 25 anos, comprovando que um único gerador diesel pode consumir mais do que dez vezes do seu custo de capital na forma de diesel num único ano (YADAV D.K, GIRIMAJI, S. P., BHATTI T.S., 2012).

## 5.2 SISTEMA ENERGÉTICO HÍBRIDO

Os geradores diesel do sistema *off grid* de Fernando de Noronha fornecem energia para uma subestação, que retifica a corrente e tensão gerados para os quase 35 km de linhas de transmissão existentes na ilha principal de Fernando de Noronha.

Estudaremos nesta seção a melhor maneira de acoplarmos outras fontes de energia a esse sistema de modo a torná-lo ambientalmente correto, mas ao mesmo tempo sem um custo proibitivo. Para tanto serão simulados alguns sistemas híbridos diferentes de modo a aferir sua viabilidade econômica e científica.

### 5. 2.1 Híbrido Diesel e Fotovoltaico

Para a simulação foram utilizados dados de insolação da NASA que são feitos com compilações coletadas em cada latitude e longitude indicada durante 22 anos (AL-KARAGHOULI, A; KAZMERSKI L.L, 2010). Utilizando as coordenadas de Fernando de Noronha (3° 51' Sul e 32° 25' Oeste) obtemos o gráfico de insolação da figura 37.

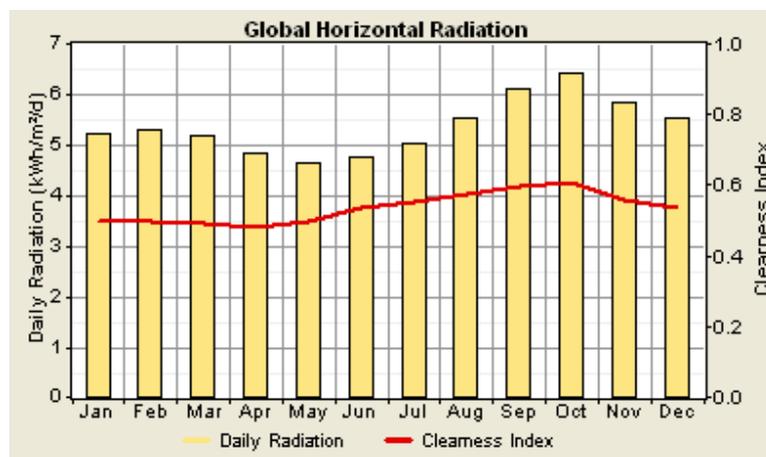


Figura 37 – Insolação obtida no modelo computacional

De acordo com os dados obtidos, a taxa de insolação média é de 5,36 MWh/m²/d, bem perto das maiores médias do Brasil que estão na casa dos 6 MWh/ m²/d segundo o Atlas Solarimétrico do Brasil (CHIGUERU et al. , 2000). O pico de incidência ocorre no mês de outubro, 6.420 kWh/m²/d.

Para simulação computacional utiliza-se cotações de painéis solares obtidas para instalação real no arquipélago. Os painéis cotados não possuem sistema de tracking (acompanhamento do sol) e os custos de importação estão incluídos nos cálculos (Tabela 12).

Tabela 12 – Dados do Painel Solar Fotovoltaico

<b>Painel Fotovoltaico</b>	
<b>Tamanho (kW)</b>	200
<b>Custo de Aquisição (\$)</b>	1.040.000
<b>Custo de Troca (\$)</b>	832.000
<b>O&amp;M (\$)</b>	0
<b>Vida útil (years)</b>	25
<b>Fator de redução (%)</b>	80
<b>Máximo declive (%)</b>	10
<b>Azimuth (graus de O para S)</b>	0
<b>Fator de reflexão do solo (%)</b>	20

Inserindo os painéis fotovoltaicos no sistema (serão simulados até 6 módulos de 200 kW) dada a disponibilidade de insolação, necessitamos inserir um conversor AC/DC para conectar a carga ao barramento principal. O inversor (Tabela 13) irá converter a tensão e conectará a geração fotovoltaica com a demanda de carga da ilha. Para simulação também foram utilizadas cotações de inversores reais a serem instalados na ilha.

Tabela 13 – Dados do Inversor

<b>Conversor ABB</b>	
<b>Tamanho (kW)</b>	200
<b>Custo de Aquisição (\$)</b>	200.000
<b>Custo de Troca (\$)</b>	160.000
<b>O&amp;M (\$)</b>	0
<b>Vida Útil (anos)</b>	15
<b>Eficiência (%)</b>	92

Simulando o sistema agora com os painéis fotovoltaicos e com os inversores, obtém-se capital inicial maior, de 9.065.000 dólares. No entanto, o custo operacional diminui para 9.666.647 e o custo presente líquido também diminui para 113.141.869 dólares, ou seja,

aproximadamente 3 milhões de dólares, em relação a geração baseada somente em óleo diesel.

Desta maneira, utilizando dados reais de insolação, painéis fotovoltaicos e inversores com preços reais, bem como utilizando os valores reais de custo do óleo diesel, já é viável no Brasil uma instalação utilizando fontes renováveis, mesmo que o sistema seja híbrido.

### 5.2.2 Híbrido Fotovoltaico e Eólico

Os ventos em Fernando de Noronha são constantes, com direção predominante Sudeste, com boa intensidade praticamente o ano todo. Tamanho o potencial eólico e o apelo sustentável da ilha que o primeiro gerador eólico do Brasil foi instalado nela.

Os dados utilizados na simulação são dados coletados em uma estação meteorológica do Sistema Integrado de Dados Ambientais - SINDA instalada em Fernando de Noronha, conforme mostra a Figura 38.

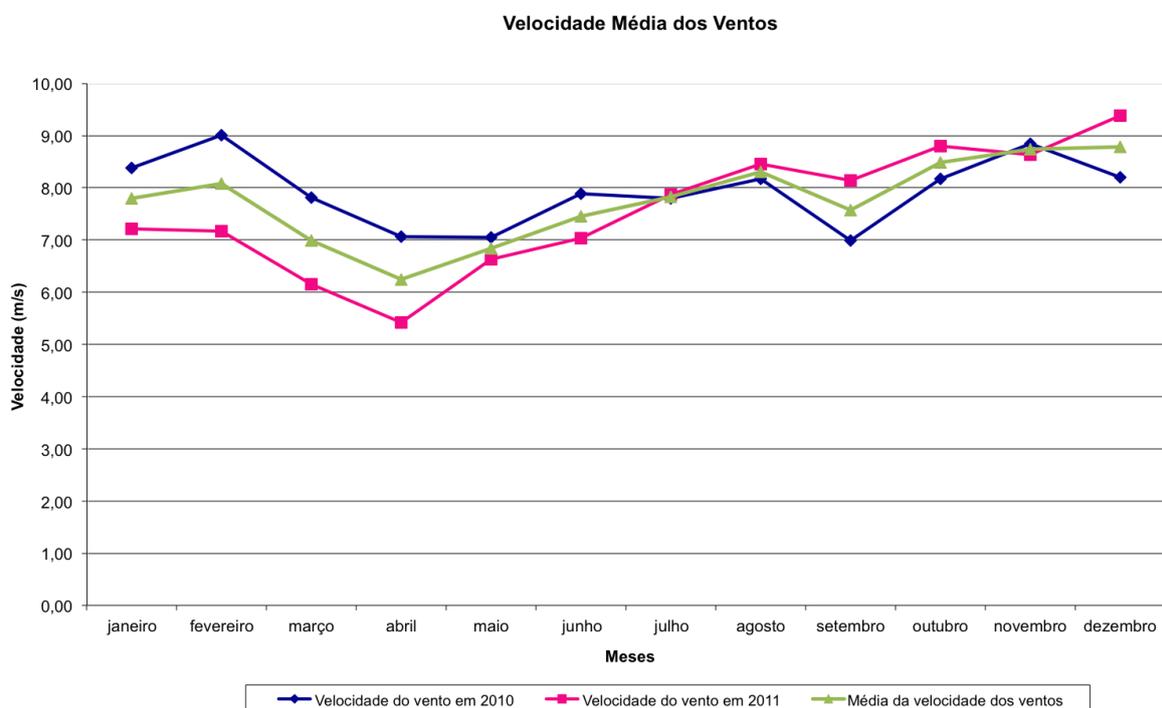


Figura 38 – Dados de velocidade de vento coletados

Os dados de dois anos (2010 e 2011) apresentados na Figura 38 mostram grande similaridade entre eles. Para a simulação foi utilizada a média entre os dois anos (linha verde). A título de verificação da qualidade dos dados fornecidos pela estação, comparamos os dados de radiação medidos nela com os valores disponibilizados pelo modelo computacional e o erro foi inferior a 7%.

Os dados da turbina foram simulados conforme encontrado na literatura. Para a simulação foi utilizada a turbina Fuhrländer 250 por suas características se aproximarem da antiga turbina da ilha, assegurando a condição de desembarque no Porto de Santo Antônio. A Tabela 14 mostra mais detalhes.

Tabela 14 – Dados da turbina eólica

Turbina Eólica	
Tamanho (kW)	250
Custo de Aquisição (\$)	660.000
Custo de Troca (\$)	660.000
O&M (\$)	12.000
Vida útil (anos)	15
Altura do Hub	25

Para a simulação de todo o sistema foram considerados: até cinco grupos geradores, até 6 conjuntos de painéis solares com conversores de 200 kW e até duas turbinas eólicas de 250 kW e realizou-se mais de duas mil e quinhentas simulações para encontrar o sistema ótimo dada a quantidade de variáveis escolhidas para este caso.

A adição da turbina no sistema faz o capital inicial crescer, sendo agora de quase dez milhões e quinhentos mil dólares, mas o custo operacional diminuiu para 8.628.486,00 dólares, assim como o custo presente líquido que diminuiu cerca de 13% indo para 103.284.392,00 dólares.

A figura 39 mostra a quantidade de energia produzida por cada fonte. No total em renováveis temos cerca de 25%, sendo 12% de painéis solares e 13% de turbinas eólicas, enquanto que os outros 75% são gerados pelos motores movidos a óleo diesel.

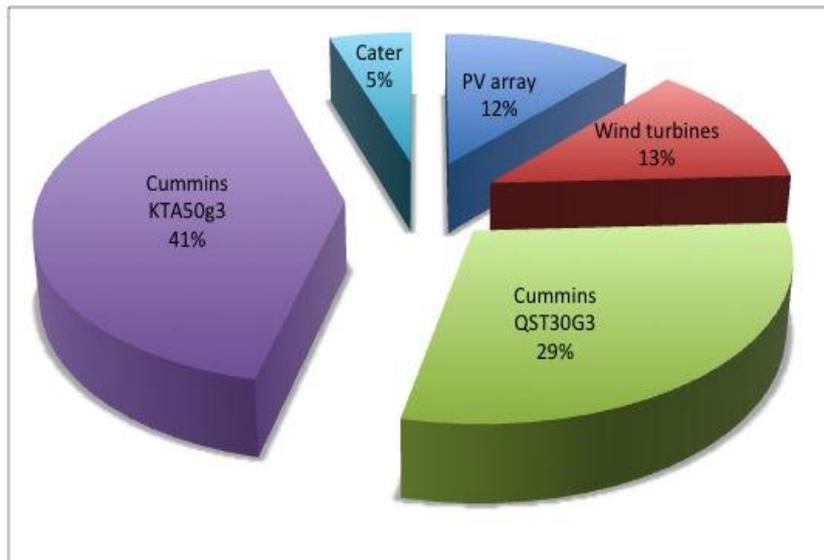


Figura 39 – Energia produzida por cada fonte no sistema híbrido

A importância deste tipo de simulação antes da compra e implantação física dos equipamentos em campo é comprovada quando analisamos os resultados obtidos. Neste caso, por exemplo, o modelo computacional apontou uma quantidade excedente de energia.

No total foram apenas 2% da energia média (cerca de 41 kW/h), mas em todo caso seria um gasto desnecessário. Existem duas maneiras usuais para resolução deste problema. A primeira delas seria tentar eliminar uma fonte de energia e simular novamente até que não haja excedente. Já a segunda seria adicionar um banco de baterias para armazenar esse excedente e suprir energia para um eventual pico de carga, o que possivelmente reduziria os custos operacionais.

Outro fator que reforça a adoção da segunda solução é o fato do sistema já possuir 25% de sua energia oriunda de fontes renováveis (figura 39). A intermitência, sazonalidade e inconstância das energias renováveis fazem com que o sistema perca a sua uniformidade, sendo necessário a adição de equipamentos que suavizem essas perturbações e flutuações de carga. Os sistemas de armazenamento por baterias são uma boa solução para este problema. Analisaremos o modelo utilizando este sistema na próxima seção.

### 5.2.3 Híbrido Fotovoltaico, Eólico e com armazenamento por Baterias

Esse comportamento irregular, característico das energias eólica e solar, indica que a melhor maneira de utilizá-las é sempre colocando baterias associadas a controladores para uniformizar o despacho de energia, evitando o descarte do excedente, armazenando energia nas baterias e fornecendo ao sistema, quando necessário.

Para a simulação no modelo computacional foi utilizada uma bateria não poluente (Zero Emission Battery – ZEBRA) produzida pela empresa FIAMM utilizando a tecnologia de Níquel, Sódio e Cloro, materiais recicláveis e abundantes na terra, conforme detalhado no capítulo 2.

Esta bateria não se encontra na base de dados do modelo, devendo-se então adicioná-la. Suas principais características são: 240 células por unidade, capacidade de corrente nominal de 38 Ah, e capacidade de energia nominal de 23,5 kWh. Outra característica importante desta tecnologia de baterias reside no fato de não precisar de refrigeração, podendo funcionar em temperaturas ambientes de até 60°C, o que a torna ideal para localidades de climas tropicais como Fernando de Noronha.

A simulação no modelo computacional escolhido assume que as propriedades da bateria permanecem constantes durante toda a sua vida e não são afetadas por fatores externos como a temperatura. Em nosso caso, como já foi observado, este fator não influenciará no resultado final. No entanto, se fôssemos simular baterias de lítio que perdem rendimento com o aumento de temperatura, deveríamos usar algum recurso para remediar tal situação.

Os dados de custo, quantidade, capacidade de carga e vida útil (Tabela 15) também foram simulados de acordo com valores reais obtidos junto ao fabricante da tecnologia.

Tabela 15 – Dados da Bateria ZEBRA

Bateria	
Quantidade	32
Custo Inicial (\$)	648.000
Custo de Troca (\$)	518.400
O&M (\$)	500
Estado Inicial de carga (%)	100
Vida útil mínima (anos)	10

Acrescentando as baterias ao sistema, o capital inicial cresce para pouco mais de 11 milhões de dólares, o custo operacional diminui seiscentos mil dólares, e o custo presente líquido diminui mais 6% indo para 98.022.688,00 dólares.

Apesar da necessidade de colocação de baterias, a figura 40 mostra a ainda tímida participação das renováveis no suprimento de energia, sendo representado pelas cores verde (eólica) e amarelo (solar), ainda sem ultrapassar os 25% de participação no suprimento de energia.

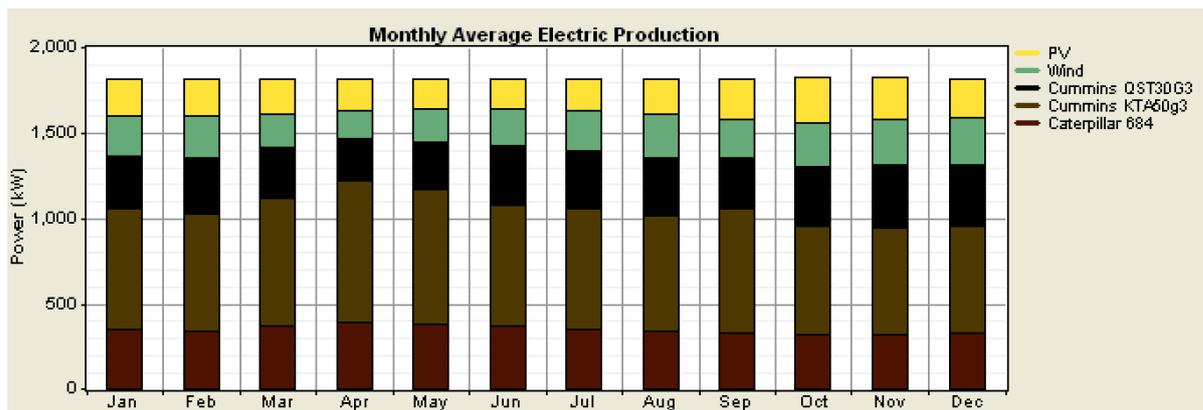


Figura 40 – Quantidade de energia gerada por cada fonte

### 5.3 ENCONTRANDO UM SISTEMA ÓTIMO

Até aqui o sistemas simulados possuíam apenas 25% de presença de Energias Renováveis. Entretanto, como a Administração de Fernando de Noronha e o Governo de Pernambuco desejam em um futuro próximo que as energias renováveis sejam 100% do fornecimento insular, nesta seção acrescentou-se mais equipamentos de modo a permitir o aumento da participação das Energias Renováveis.

A figura 41 mostra todos os sistemas testados até aqui com as devidas inserções de equipamentos, incluindo já dois sistemas com mais de 25% de presença de renováveis e baterias.

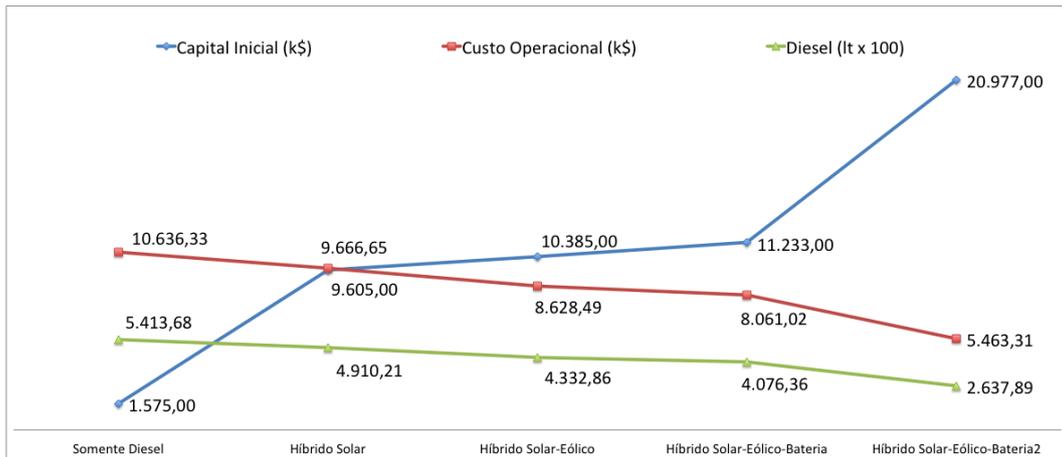


Figura 41 – Comparação dos Sistemas

Por meio da figura 41 vê-se que a despeito do grande investimento inicial, quase 21 milhões, o Sistema Híbrido Solar – Eólico – Bateria 2 utiliza um pouco mais da metade de óleo diesel, em comparação com o híbrido anterior (Híbrido Solar – Eólico – Bateria), reduzindo bastante o custo de operação do sistema, isto é, cerca de três milhões de dólares.

Também na figura é possível perceber que o custo operacional (linha vermelha) decresce quase na mesma proporção que o diesel (linha verde). Isto decorre do fato das energias renováveis requererem pouco ou nenhum gasto considerável com manutenção, pois justamente utiliza meios renováveis para viabilizar sua geração. Assim, diminuindo-se a quantidade de diesel no sistema automaticamente o custo de manutenção é reduzido. Além disso, por usarem uma menor quantidade de diesel, os sistemas híbridos não estarão tão suscetíveis a fatores externos, como a variação no preço do barril de petróleo, sendo também neste sentido mais vantajosos e confiáveis.

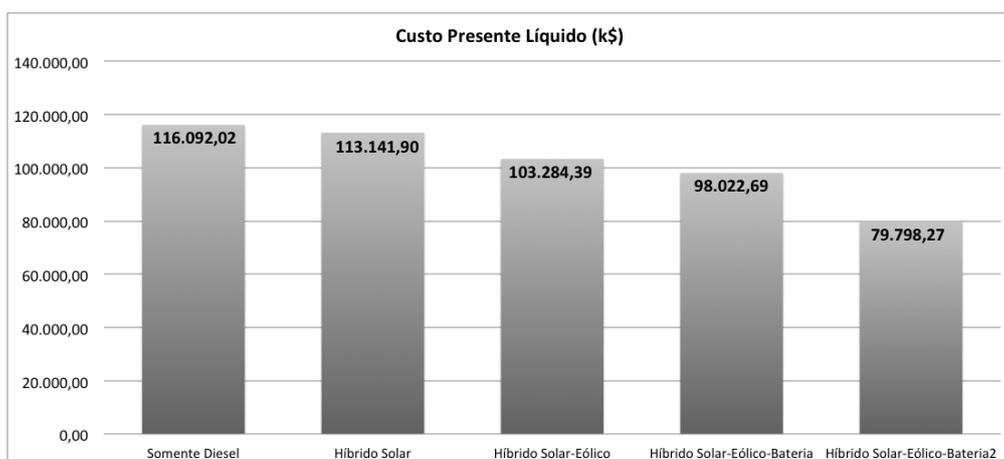


Figura 42 – Comparação do Custo Presente Líquido

Na Figura 42 observa-se que entre o sistema apenas com diesel (primeira barra) e o sistema Híbrido com baterias (quarta barra) há uma queda de quase 32% no Custo Presente Líquido (NPC) e entre os dois sistemas híbridos com bateria (penúltima e última barra) houve queda de 20%.

Também por meio da Figura 42 vê-se que o Sistema Híbrido Solar (segunda barra) possui custo presente líquido pouco menor que o sistema somente com diesel (cerca de 3 milhões a menos) e no entanto, seu custo inicial ) é muito maior (cerca de 8 milhões a mais). Assim, deixando a questão ambiental de lado por um momento, uma decisão baseada em retorno de investimento no curto prazo certamente afastaria a instalação de painéis solares na ilha.

A Figura 43 mostra uma comparação entre o custo equivalente do sistema (COE em \$/kW) e a porcentagem de uso de renováveis. Enquanto nos outros sistemas a participação de renováveis ainda é tímida, no sistema Híbrido com bateria2 (primeiras barras) ela já é predominante, representando 51% da geração de energia. O custo equivalente encontrado para esse sistema também é menor, sendo 30% menor do que o valor do sistema movido somente a óleo diesel (primeiras barras), ou seja, 0,47 contra 0,68 \$/kW do sistema atual.

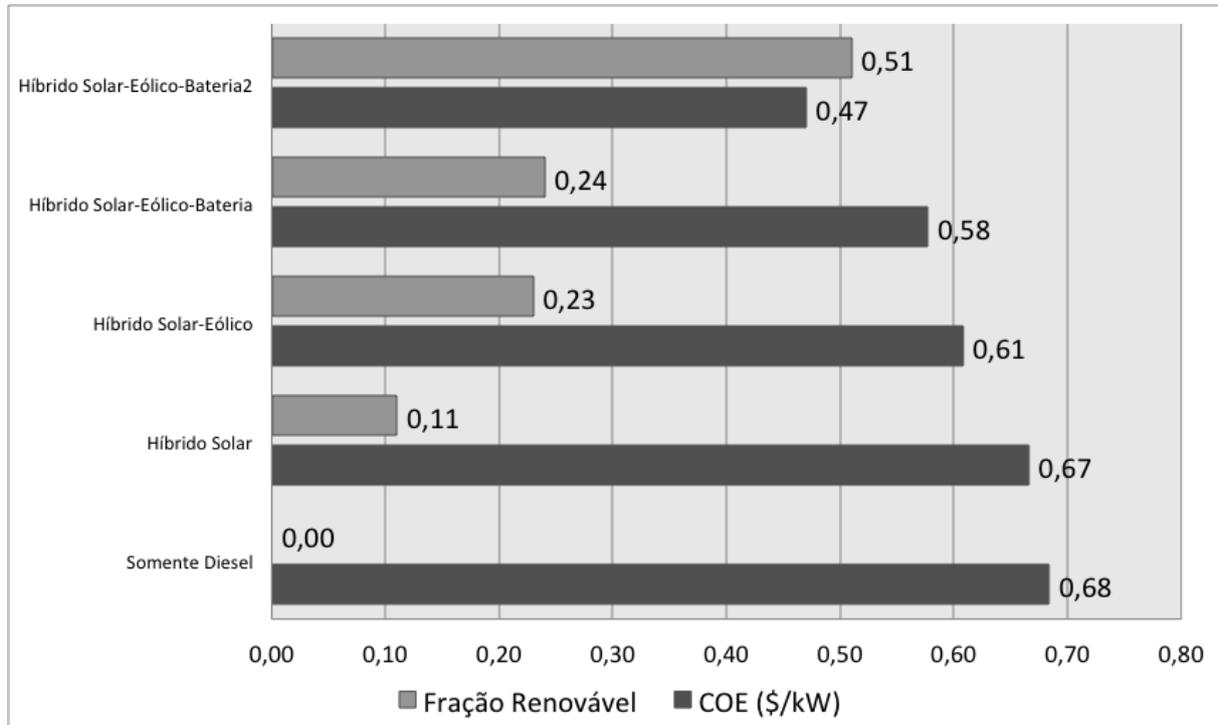


Figura 43 – Comparação do Custo Equivalente e Uso de Renováveis

Em busca do sistema ótimo, com uma maior participação de energia renovável, mas ainda viável economicamente, passa-se a chamar este último híbrido testado (Híbrido Solar – Eólico – Bateria 2) de Híbrido 51, em função da sua porcentagem de energia renovável.

A figura 44 mostra então o resultado da simulação computacional de vários sistemas com participação crescente de energias renováveis, começando com o Híbrido 51 (51% de geração oriunda de fontes renováveis) até o Híbrido 100 (100% de geração oriunda de fontes renováveis) corroborando com os anseios dos governantes que desejam uma ilha sem poluição oriunda de sua geração de energia.

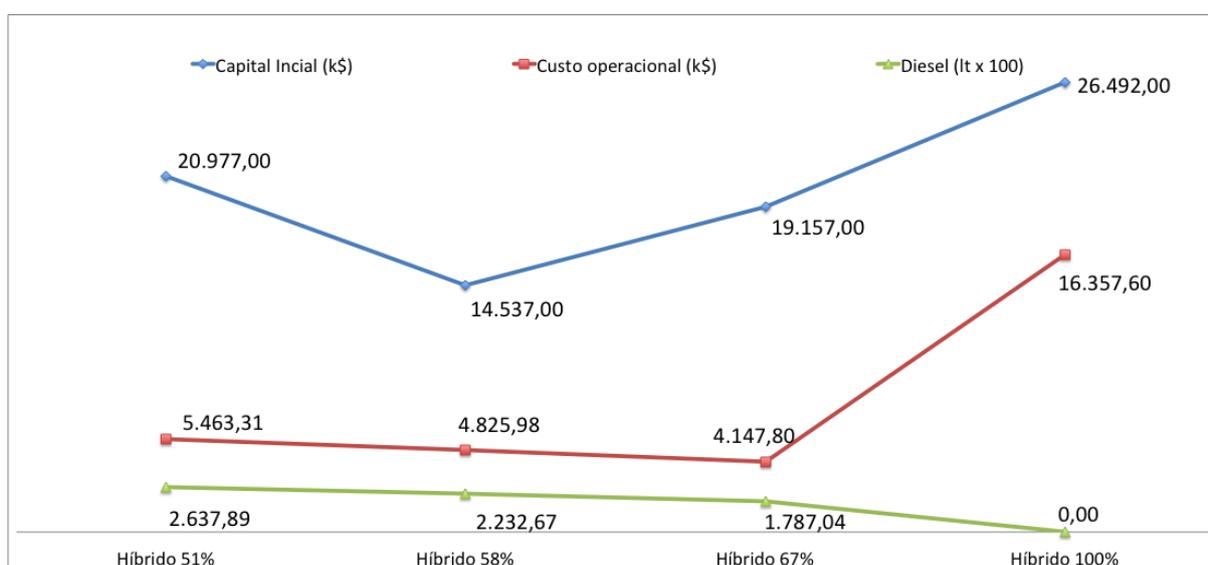


Figura 44 – Comparação dos Sistemas com mais de 50% de renováveis

De acordo com a Figura 46, o custo operacional e o diesel utilizado decrescem quase que linearmente do 51% até 67%. Já o custo de capital inicial, que decaíra de 51% para 58% aumenta no Híbrido 67%. Isto se dá devido a maior quantidade de turbinas eólicas a serem compradas para garantir o aumento de energia renovável.

Vê-se também uma grande queda no custo inicial do Híbrido 51% para o Híbrido 58%, pois o modelo, considerando os custos, dá primazia a geração eólica em detrimento a energia solar, conforme é mostrado na tabela 16.

A figura 45 mostra que mesmo com o aumento de quase 5 milhões no custo inicial, do Híbrido 58% para o Híbrido 67%, quando trazemos para o custo presente líquido, conforme metodologia contida no Capítulo 3, o sistema Híbrido é mais vantajoso cerca de quase 3 milhões.

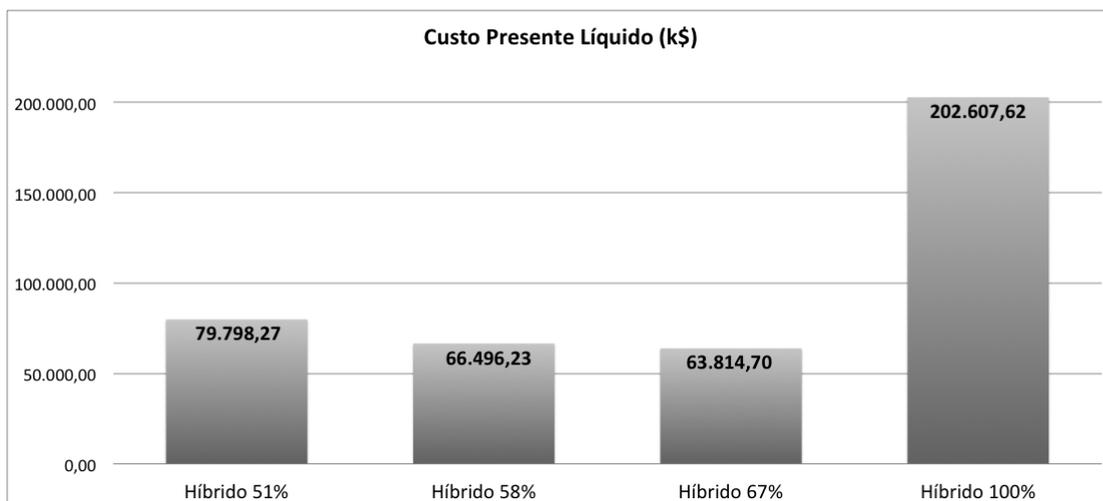


Figura 45 – Comparação do Custo Presente Líquido nos sistemas renováveis

Assim como o NPC, o custo equivalente - COE, em \$/kW, do sistema com 67% de participação renovável (0,67 de fração renovável) é também o mais baixo (Figura 46). No entanto, o COE do sistema com 100% de participação renovável é quase 4 vezes maior, mostrando a importância da simulação antes de uma tomada de decisão sobre a implantação de um sistema desse porte. Esse sistema com 100% de participação foi mantido apenas para fins de comparação.

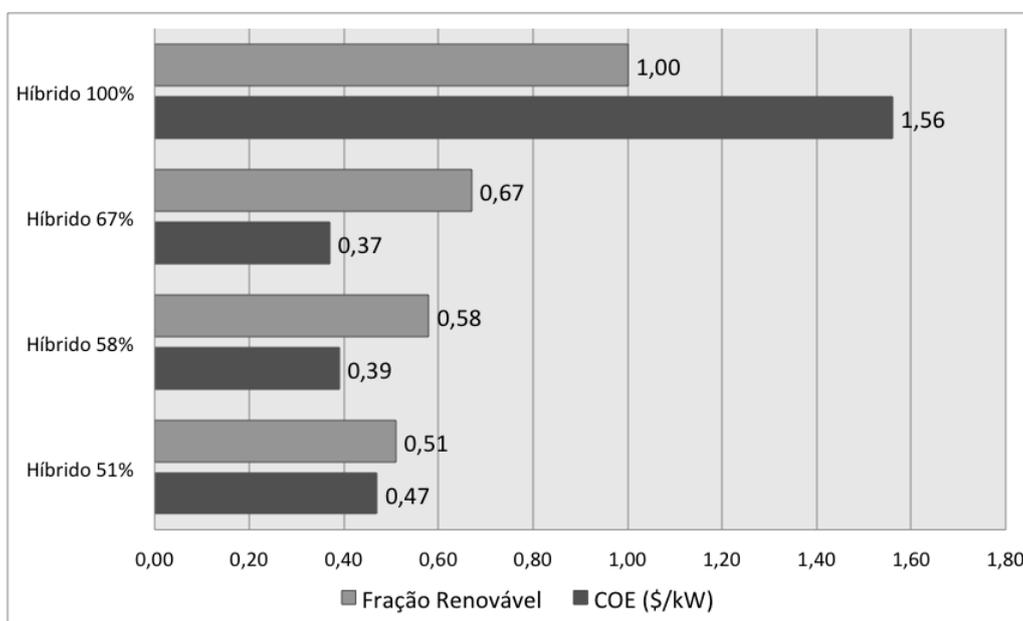


Figura 46– Comparação do Custo Equivalente nos Sistemas Renováveis

As figuras 45 e 46 apontam para o sistema com 67% como mais vantajoso. Tanto o Custo Presente Líquido (NPC) quanto o Custo equivalente (COE) são os menores dos sistemas simulados. Ressalta-se que foram simulados outros sistemas entre 67 e 100% de renováveis, mas viu-se que a partir de 67% o custo presente líquido e o custo inicial cresciam bastante até chegar a 100% de participação renovável. Desta maneira, o modelo apontou o sistema de 67% como ponto ótimo de equilíbrio entre a participação de renováveis e o custo do sistema.

A Tabela 16 mostra os equipamentos utilizados em cada sistema. Observa-se que o mais vantajoso (Híbrido 67%) não utiliza painéis fotovoltaicos. Entende-se que este fato se dá por uma junção de pelo menos dois fatores: a grande disponibilidade eólica em Fernando de Noronha e o alto custo do painel solar no Brasil.

Tabela 16 – Componentes dos Sistemas Renováveis Simulados

Sistemas Modelados	Diesel (kW)	PV (kW)	Wind (kW)	Converter (kW)	Battery (nr)
Hybrid 51%	4.200	2.000	1.500	2.000	128
Hybrid 58%	4.200	0	3.000	2.000	128
Hybrid 67%	4.200	0	4.500	2.000	128
Hybrid 100%	0	1.800	4.750	2.000	128

Ressalta-se que os sistemas não utilizam toda a capacidade de carga instalada. O modelo simula os melhores horários, de acordo com a disponibilidade da fonte para operar cada um sempre buscando um menor custo. Pelo número de baterias utilizadas, que é constante, podemos dizer que o sistema funciona com cerca de 3MWh intermitentes, para suprimento da carga principal, da carga reserva e do armazenamento do excedente.

Vemos pela tabela 16 que a partir de 67% deveríamos começar a colocar painéis solares até chegarmos a 100% de geração renovável, o que inviabiliza economicamente a tentativa de tornar a ilha totalmente sustentável, conforme custos do sistema Híbrido 100% supracitados.

Outra importante constatação obtida por meio do modelamento é o fato de não ser necessário desmobilizar o sistema diesel já instalado no arquipélago. Todos os sistemas híbridos até 67% mantêm os geradores diesel. Este fato se dá pelo motivo de que o grande custo da geração a diesel não está na aquisição dos motores em si, mas no custo do combustível. Além disso, mantendo-se o sistema diesel com os cinco geradores existentes pode-se utilizá-los em escala de rodízio, aumentando sua vida útil bem como otimizando os intervalos de suas manutenções.

O valor absoluto das emissões do Sistema Híbrido 67% é mostrado na Figura 47, por meio de tela gerada pelo próprio modelo computacional. Comparando com as emissões do sistema atual de Fernando de Noronha (figura 36), que usa apenas a fonte diesel, a redução percentual é de aproximadamente 70%. Assim, é notável a contribuição que a contínua inserção de fontes renováveis trará ao planeta se for mais incentivada e tiver seu custo minorado.

Pollutant	Emissions (kg/yr)
Carbon dioxide	4,705,863
Carbon monoxide	11,616
Unburned hydrocarbons	1,287
Particulate matter	876
Sulfur dioxide	9,450
Nitrogen oxides	103,648

Figura 47 – Tela com a emissão de poluentes no sistema híbrido otimizado

Observa-se que conforme demonstrado no capítulo 3 que alguns resultados do modelo computacional são deveras simplistas. Vê-se que reduzindo aproximadamente 67% do óleo diesel, são reduzidas 70% das emissões, o que representa uma redução quase linear, desconsiderando o desgaste do motor a combustão, seu tempo de uso, sua eficiência ou mesmo o tipo de óleo diesel que está sendo utilizado na explosão.

## 5.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE NO MODELO ÓTIMO

O recurso de análise de sensibilidade do modelo computacional simulou dois prováveis cenários futuros simultaneamente. O primeiro cenário é a redução de custo do sistema de armazenamento, uma vez que as baterias que usam a tecnologia de Níquel-Cloro-Sódio estão sendo nacionalizadas, conforme citado no capítulo 2.

Outro cenário pertinente é o do aumento do preço do óleo diesel. Em tempos de preocupação com aquecimento global e diminuição das reservas de petróleo podemos prever o crescimento no valor desse combustível, ainda mais se tratando de um sistema isolado e sabendo que esse óleo hoje é subsidiado no Brasil.

A Figura 48 tem em seu eixo y o valor da bateria (cenário 1), começando com uma redução de 50% do valor atual (o que se espera com a nacionalização com o ganho de escala pela maior utilização da tecnologia) até 100% do valor (valor atual). No eixo x temos a variação do preço do diesel por litro em dólares (cenário 2), começando pelo valor atual para Fernando de Noronha, cerca de 1,8 \$/lt até 2,3\$/lt.

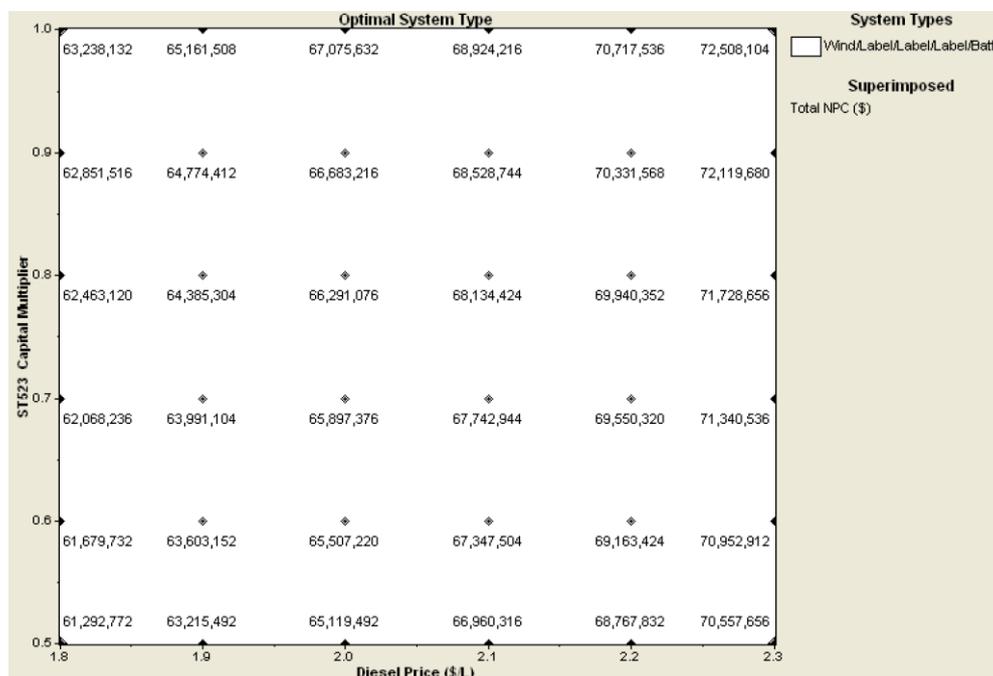


Figura 48 – Análise de sensibilidade Baterias x Diesel

Os pontos no gráfico mostram o valor de uma terceira variável que se usa apenas como uma referência para comparação (*superimposed*), e em nosso caso utilizou-se o custo presente líquido (do inglês NPC). Vê-se que quanto mais próximo da origem do gráfico esse valor decresce, pois os custos são os menores possíveis e quanto mais afastados da origem maiores os valores, ou seja mais caro o sistema. Nesse caso o maior valor do custo presente líquido foi de aproximadamente 72, 5 milhões de dólares, cerca de 15% maior que o sistema ótimo encontrado (Híbrido 67).

Observa-se assim que nem a variação no preço das baterias, nem o aumento do preço do óleo diesel tornou viável o sistema com painéis solares, pois o gráfico ficou monocolor, indicando o predomínio absoluto do sistema que contém apenas geradores eólicos.

Mudando então um pouco o cenário, admitindo-se que a hipótese de que o maior entrave para o desenvolvimento das energias renováveis ainda é o alto custo dos painéis fotovoltaicos, fizemos uma análise de sensibilidade considerando esse custo decrescente.

A Figura 49 tem em seu eixo y o valor do painel solar (cenário 1), começando com uma redução de 50% do valor atual até 100% do valor (valor atual). E o eixo x permanece a variação do preço do diesel por litro em dólares (cenário 2), nos moldes da simulação anterior. O valor superimposto agora é a porcentagem de participação das energias renováveis no sistema.

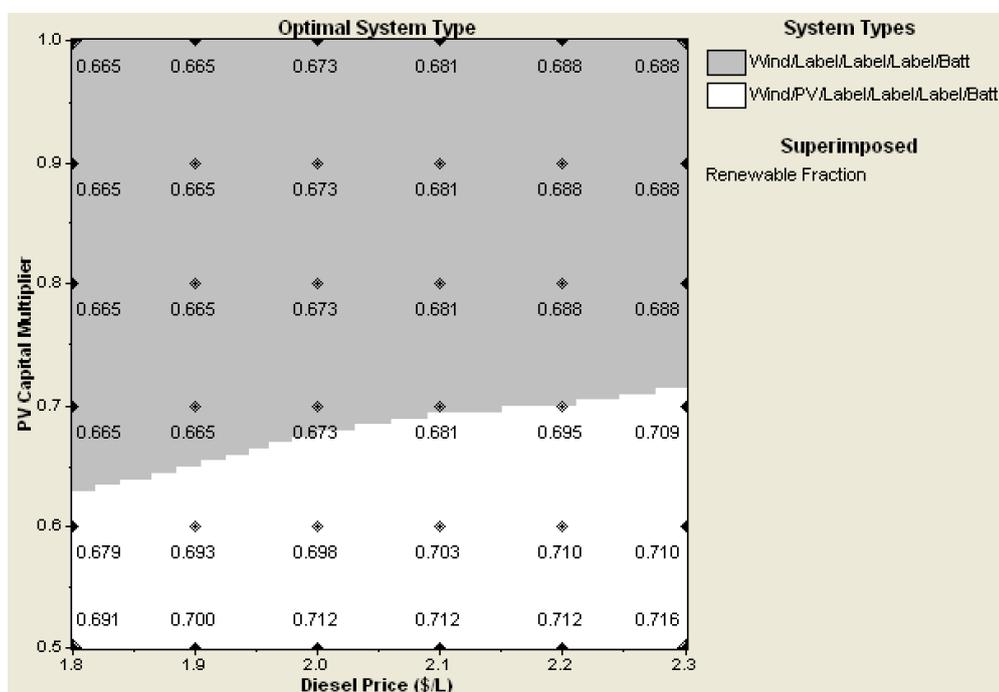


Figura 49 – Análise de sensibilidade Painel Solar x Diesel

A parte mais clara do gráfico representa os sistemas incluindo os painéis fotovoltaicos, e a parte escura os sistemas sem os painéis. Nota-se que se o painel solar tiver seu custo de aquisição e substituição reduzidos em 35% aproximadamente, para qualquer valor do diesel ele se tornará viável nesse sistema aumentando a porcentagem de renovável em até 4% (valor *superimposed*). Para valores do diesel acima de 2 dólares o litro, o painel se torna viável com redução de apenas 30% de seu preço. Observa-se assim que embora os painéis solares sejam uma excelente alternativa para Fernando de Noronha dado o intenso calor ao qual a ilha é submetida, sua viabilidade ainda é obstaculizada pelo alto custo desta tecnologia no Brasil.

Além disso, os painéis solares possuem a vantagem de exigirem manutenção mínima e fácil expansão para atingir demandas crescentes. E, dependendo da demanda de carga elétrica, ela coincide com o pico de fornecimento dos painéis, como, por exemplo, o uso do ar condicionado nas horas mais quentes do dia, quando os painéis solares estão no seu ápice de transformação da radiação solar em corrente contínua, fato recorrente em Fernando de Noronha e em regiões de clima árido.

## 5.5 SISTEMA ÓTIMO COM FROTA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

Um fenômeno ocorrido na ilha principal de Fernando de Noronha foi um aumento expressivo no número de automóveis e demais veículos movidos a motores de combustão interna dentro da ilha principal. De 1990 a 2007 houve um crescimento de 600%, conforme mostra a Figura 50.

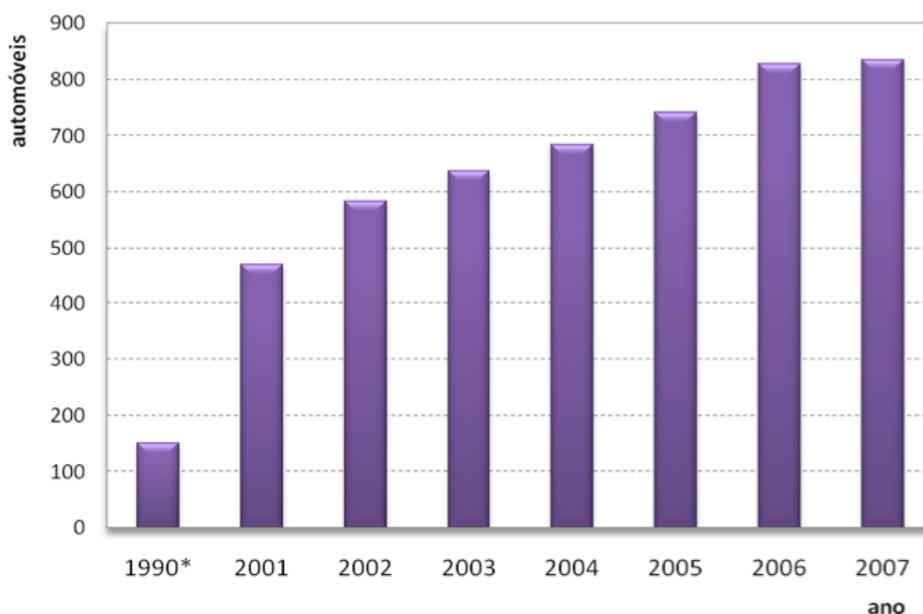


Figura 50 – Crescimento de automóveis até 2007

Algumas medidas foram adotadas para conter essa expansão, principalmente uma alta taxação na compra de um veículo, que além de seu preço, possui uma taxa insular (em média 50% do valor da nota fiscal) e pagamento do frete do continente até a ilha (cerca de 10% do valor do veículo). Para abastecer o carro também é cobrado um alto valor na bomba de combustível (cerca de 50% maior que nas principais capitais brasileiras).

Entende-se que essas medidas funcionaram a contento, pois no último censo do IBGE em 2010, a quantidade que em 2007 era de aproximadamente 900, agora é de 991 veículos, apenas 10% de crescimento em três anos, frente aos 35% de crescimento anual que ocorria anteriormente. No entanto, em uma comparação com outras ilhas que se assemelham a Fernando de Noronha em tamanho (Nauru e Tuvalu), ou em renda per capita (Belize, Cook Islands e Maldivas), Noronha ainda tem um índice de automóveis per capita bem acima das demais (Figura 51).

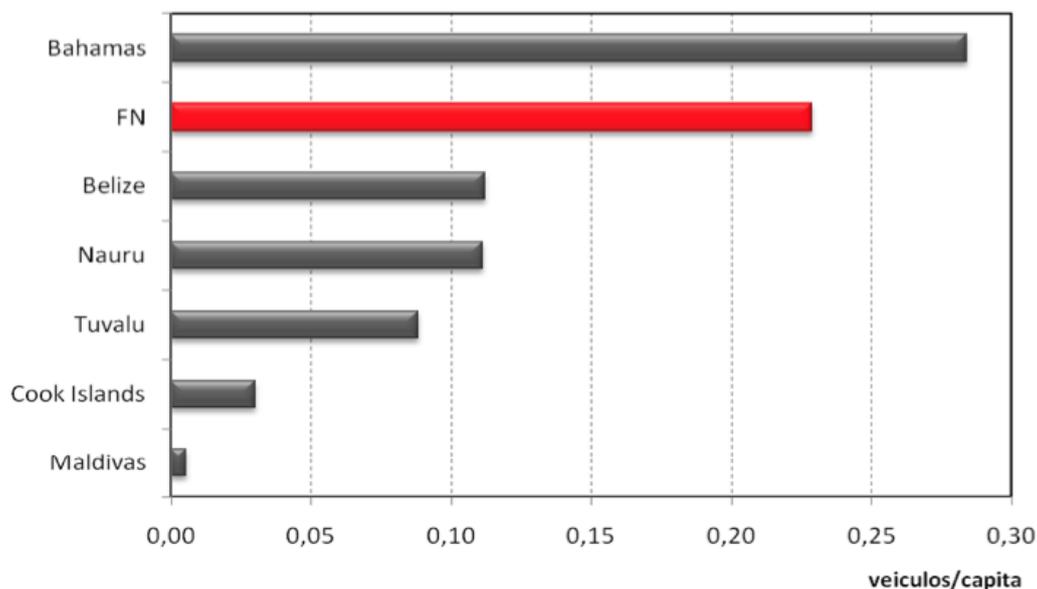


Figura 51 – Nº de automóveis per capita nas ilhas (ENOCH, M.P, WARREN, J.P., 2008)

Vê-se que a única ilha que ultrapassa Fernando de Noronha é Bahamas, mas salienta-se que a renda per capita em Bahamas é aproximadamente 5 vezes maior que a renda per capita em Noronha. (ENOCH, M.P, WARREN, J.P., 2008)

A Figura 52 mostra a quantidade de veículos movidos à combustão interna segundo último levantamento do IBGE em 2010.

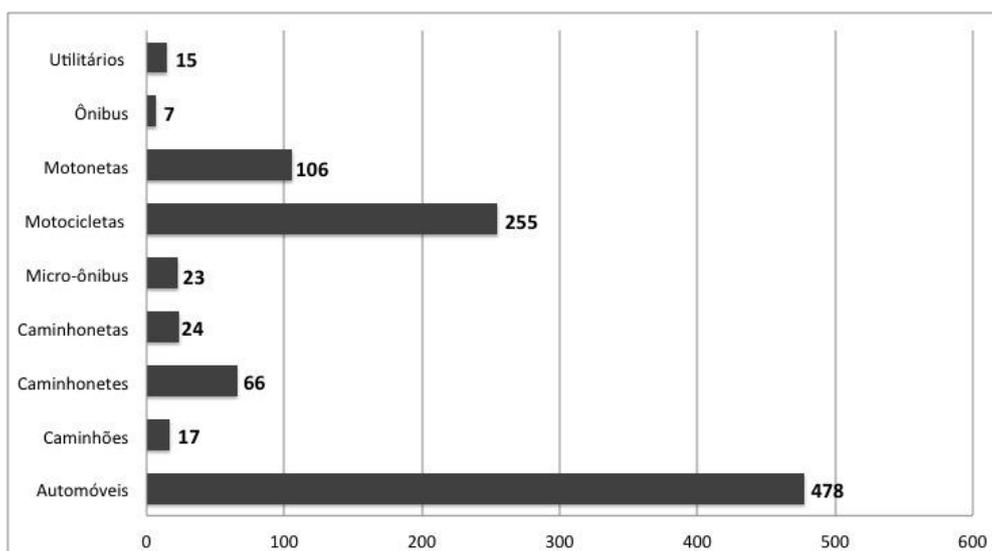


Figura 52 – Número de Veículos em F. Noronha.

De modo a facilitar a simulação, transformam-se todos estes veículos em automóveis com uma bateria apenas (Tabela 17). Para tanto se utiliza como base os protótipos feitos em Itaipu, como Jipe Elétrico, Ônibus Híbrido à etanol, Mini ônibus, entre outros.

Tabela 17 – Fazendo a equivalência de autonomia de bateria

	Nº	Baterias	Equival.
<b>Automóveis</b>	478	1,00	478
<b>Caminhões</b>	17	5,00	85
<b>Caminhonetes</b>	66	1,00	66
<b>Caminhonetas</b>	24	1,00	24
<b>Micro-ônibus</b>	23	2,00	46
<b>Motocicletas</b>	255	0,33	85
<b>Motonetas</b>	106	0,25	26,5
<b>Ônibus</b>	7	5,00	35
<b>Utilitários</b>	15	1,50	22,5
<b>Total</b>	991		868

Para nosso estudo vamos estabelecer que esses 868 possuem uma média de consumo de carga em kW próxima da real. Como todos trafegam na segunda menor estrada do Brasil (BR 363) com apenas seis quilômetros de extensão, vê-se que não existe muito deslocamento, apenas uma alta quantidade de veículos.

Assim, assumindo que cada um destes veículos rode quatro vezes essa extensão por dia, ou seja 24 km, as baterias consumiriam cerca de 4kWh ao longo de um dia (tomando-se como base a autonomia dos veículos produzidos em Itaipu, conforme demonstrado no capítulo 2). Multiplicando-se este valor pela quantidade de veículos equivalentes (868 veículos), o consumo energético diário da frota é de 3,47 MWh. Sabendo-se que o consumo diário total de Fernando de Noronha é de 43 MWh/dia, vê-se que o impacto é muito pequeno na carga total, cerca de 8,7% apenas. Simulou-se então essa nova carga da ilha para verificação da mudança ou não do sistema ótimo para a ilha, considerando-se esta hipótese.

A tabela 18 mostra um aumento no capital inicial de aproximadamente 1,5 milhões, o que é explicado pelo fato de que em relação ao sistema ótimo anterior (Híbrido 67) devem ser comprados mais um inversor de 200 kW e mais 42 baterias.

Tabela 18 – Comparação entre o Sistema Híbrido 67% e o sistema ótimo com VE

	Capital Inicial (k\$)	Custo operacional (k\$)	Total NPC (k\$)	COE (\$/kW)	Fração Renovável	Diesel (mil L)
<b>Híbrido 67%</b>	19.157,00	4.147,80	63.814,70	0,37	0,67	1.787,04
<b>Ótimo om VE</b>	20.665,00	4.542,72	69.574,62	0,38	0,66	1.954,04
<b>Diferença absoluta</b>	1.508,00	394,92	5.759,92	0,01	-0,01	167,00
<b>Diferença percentual</b>	7,87%	9,52%	9,03%	2,97%	-1,49%	9,34%

O aumento do capital inicial aliado ao aumento no custo operacional acabou refletindo no aumento de 9,03% do custo presente líquido (NPC) e de 2,97% do custo equivalente (COE). Nota-se ainda que ocorreu uma sutil diminuição na fração renovável, em consequência do aumento do consumo de óleo diesel.

A figura 53 mostra o aumento de quase 500 toneladas de emissão de CO<sup>2</sup> resultante do maior consumo de óleo diesel dos geradores estacionários para suprir o aumento de carga para abastecimento dos veículos elétricos (VEs). Assim, deve-se perguntar: Do ponto de vista energético e ecológico, seria interessante transformar todos os carros da ilha em VEs e depois queimar 167 mil litros a mais de óleo diesel para gerar energia para estes carros rodarem?

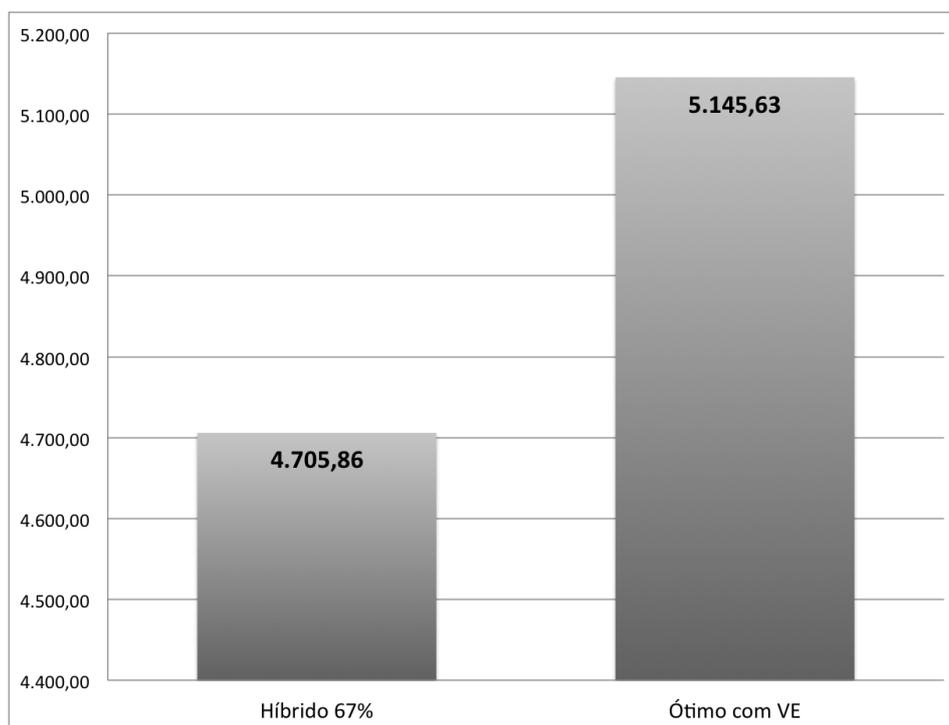


Figura 53 – Emissão de CO<sup>2</sup> medida no modelo computacional

Um estudo conduzido no Programa VE de Itaipu (NOVAIS, 2012) mostra que do ponto de vista energético, considerando as perdas do poço à roda (*well-to-wheel*), se utilizarmos o petróleo para transformá-lo em diesel e aplicarmos em um veículo convencional, somente 15% da energia deste processo será convertida em movimento, ou seja, perde-se 85% da energia. No entanto, se a mesma quantidade de petróleo for utilizada numa usina termelétrica para produção de energia a ser utilizada em um VE, o rendimento do processo alcança 40%.

Sob a ótica de emissões, utilizando o sistema equivalente de 868 veículos rodando 24 km por dia, utilizando uma calculadora de emissão de CO<sup>2</sup> (KEYASSOCIADOS), vemos que, se movidos a combustão interna, os veículos emitiriam 1.808,4 toneladas de CO<sup>2</sup> por ano. Desta maneira a emissão total do sistema híbrido sem substituição dos veículos, passaria a ser de 6.514,26 toneladas, ou seja: 4.705,86 informadas pelo modelo computacional mais 1.808,4 toneladas emitidas nos escapamentos dos veículos movidos a combustível fóssil, conforme mostra Figura 55.

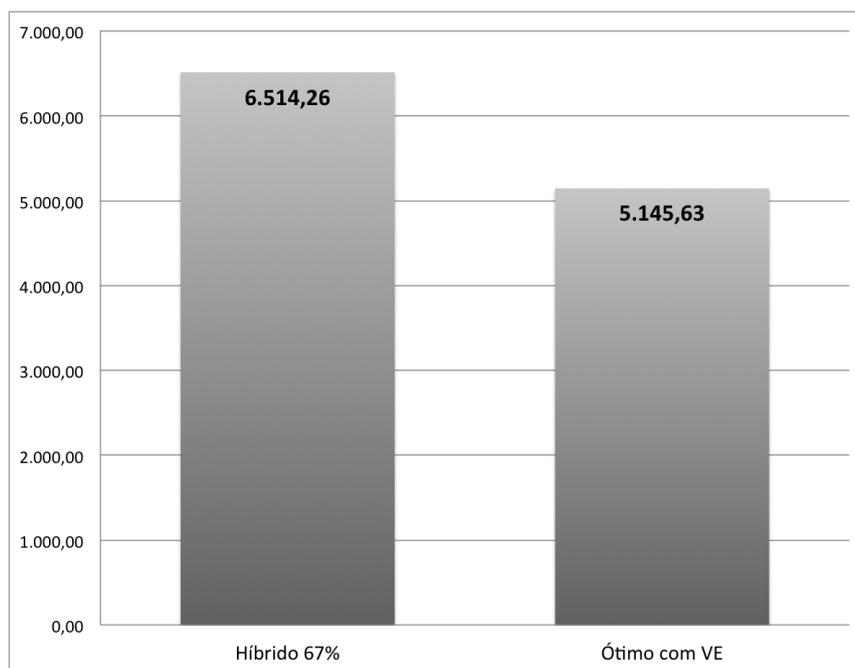


Figura 54 – Emissão de CO<sup>2</sup> considerando emissão do modelo mais a emissão veicular

A inversão do gráfico entre as figuras 53 e 54 mostra claramente que levando-se em consideração também as emissões dos veículos nas ilhas também as emissões dos veículos nas ilhas, a transformação da frota em 100% elétrica também é salutar. Assim, em termos de

eficiência energética e cuidado com o meio ambiente, deve-se alterar a frota, cabendo-se apenas uma discussão econômica.

Retomando o que foi tratado no capítulo 2, as baterias dos veículos elétricos podem ser utilizadas para armazenamento de energia, no conceito de *smart grid*, onde na hora de maior demanda (horário de pico) o usuário forneceria carga para a rede. Assim, sabendo que grande parte do aumento de custo do sistema Híbrido 67 para o sistema com os VEs vem da aquisição de baterias, se as baterias já estivessem nos VEs, esse custo automaticamente cairia. Ou seja, no sistema precisamos de aproximadamente 160 baterias, mas nos carros temos 868 baterias, quase seis vezes mais, gerando uma economia de mais de 14 milhões e dólares, sabendo que cada bateria custa em média 20 mil dólares. Assim, também do ponto de vista econômico seria vantajosa a substituição da frota insular de carros movidos a combustão interna, por veículos elétricos no conceito *smart grid*.

## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O arquipélago de Fernando de Noronha evidencia alto grau de representatividade quanto aos ecossistemas naturais, onde a complexidade e o metabolismo das comunidades terrestres e aquáticas resulta em alta produtividade e diversidade biológica.

A evolução do meio urbano na ilha interfere diretamente nos ecossistemas e, caso essa evolução continue se dando sob o ritmo e padrão atuais, podemos ter o colapso de habitats terrestres e extinção de espécies marinhas. Por outro lado, caso seja adotada uma nova conduta voltada para a sustentabilidade do meio urbano, o homem poderá atuar como restaurador de um ecossistema que tem sido conduzido ao desequilíbrio por mais de 500 anos.

Este trabalho se esmera na construção de cenários para esta nova conduta, onde os sistemas urbanos deverão acompanhar a complexidade de relações existentes no ambiente natural contribuindo não somente para o desenvolvimento socioeconômico puro e simples, mas para uma melhor qualidade de vida em harmonia com a biodiversidade.

Vimos que no primeiro momento é difícil abandonar totalmente a geração diesel sem um grande esforço de investimento de capital inicial. No entanto, em nossas simulações percebemos que um sistema híbrido com 67% de energias renováveis, já é perfeitamente viável para Fernando de Noronha. Além disso, esse sistema com participação de 67% de energias renováveis, reduz mais de 6 milhões o custo operacional anual do sistema em comparação com o sistema atual, somente à óleo diesel, e reduz cerca de 70% a emissão de gases de efeito estufa.

Existe a possibilidade em um futuro próximo da venda de créditos carbono a empresas estrangeiras dentro de regras estabelecidas no Protocolo de Kyoto, tornando as energias renováveis um ativo atraente não somente pelos benefícios ambientais, mas também econômicos. Utilizando 20 dólares por tonelada (Ministério de Minas e Energia - MME, 2008), o sistema híbrido economizaria ainda mais de 200 mil dólares somente na redução da emissão de gases do efeito estufa.

Ressaltamos que o sistema híbrido ótimo encontrado não possui painéis fotovoltaicos e isto se deve ao alto valor deste item no Brasil, pois toda a tecnologia de produção dos filmes finos dos painéis hoje é importada, encarecendo os preços sobremaneira. No entanto, vimos que com uma redução de 30% em seu valor, este começa a se tornar um item competitivo.

Assim, caso a geração fotovoltaica receba o mesmo tratamento dado à energia eólica, que recrudescer seus preços fortemente por ações de incentivos governamentais, ela poderá também ser utilizada em Noronha, e em outros sistemas isolados ou insulares.

Não podemos deixar de mencionar que a ilha nunca será totalmente sustentável se mantiver a estrutura de mobilidade urbana baseada em motores à combustão. Desta maneira propusemos a redução e substituição da frota de veículos insulares para veículos com tração 100% elétrica, reduzindo a emissão de CO<sup>2</sup>, NOX e outros poluentes.

Esta diminuição além de trazer um componente de marketing para ilha, reduziria quase 2 mil toneladas de emissão de CO<sup>2</sup> atmosférico reduzindo, por consequência, a pegada ecológica da ilha. E, além de correta ambientalmente, essa mudança é salutar energeticamente, uma vez que a eficiência dos motores elétricos é maior que a dos motores movidos à combustão interna; e economicamente, reduzindo o custo inicial do sistema em até 14 milhões, uma vez que as baterias dos próprios carros poderiam servir de sistemas de armazenamento num conceito *smart grid*.

Espera-se que este trabalho contribua para que Fernando de Noronha seja modelo sustentável de suprimento energético, ambientalmente compatível e suficientemente eficaz de suportar o processo de desenvolvimento sócio-econômico de sua localidade. Adicionalmente, o trabalho esmera-se em reforçar um marco de consciência coletiva e pública sobre a importância de se garantir a manutenção das riquezas locais, indissociavelmente atreladas às riquezas naturais.

Indica-se para trabalhos futuros, atividade concentradas nos temas de *smart grid* como medição eletrônica, controle do pico de demanda e gestão da carga da ilha, considerando principalmente a demanda do dessanilizador e as demandas das residências. Além disso, estudos mais específicos sobre mobilidade elétrica e treinamentos do uso dessas tecnologias no arquipélago podem ser objetos de novos trabalhos.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Governo do Estado de Pernambuco. (2009). *Grupo de trabalho para mudança da matriz energética do arquipélago de Fernando de Noronha – Relatório Final*.
- Instituto de Estudos para o Desenvolvimento Industrial. (2011). *Políticas para a promoção da Economia Verd.*
- (17/04/2012). *Resolução Normativa nº 482/2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL*.
- Markets and prospects by technology. (2011). *Renewable Energy - International Energy Agency (IEA)*.
- (2011). *PVXchange*. Price Index.
- (2011). *Solar photovoltaics competing in the energy sector - on the road to competitiveness*. European Photovoltaic association - EPIA.
- Worldwide electricity production from renewable energy sources - Stats and figures. (2012). *Fourteenth Inventory*.
- AL-KARAGHOULI, A; KAZMERSKI L.L. (2010). *Solar Energy 84*.
- BITTENCOURT, P et al. (2007). *Ecoturismo. Programa Caminhos do Futuro, Ministério do Turismo: AVT/IAP-NT/USP*. São Paulo: IPSIS.
- CHIGUERU et al. . (2000). *Atlas Solarimétrico do Brasil* . Recife: Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).
- DUFFIE, J., & BECKMAN, W. (2006). *Solar Engineering of Thermal Processes* (3ª ed.). New York: John Wiley and Sons.
- DUSTMANN, C. (2009). Li or Na. Battery Consult. *Internacional Advanced Mobility Forum*.
- ENOCH, M.P, WARREN, J.P. (2008). Automobile use within selected island states. . *Transport. Res. Part A*.
- European Photovoltaic Industry Association - EPIA. (2012). *Market Report 2011*.
- Global Wind Energy Council (GWEC). (2011). *Global Wind Statistics*.
- Himri Y. et all. (2008). Techno-economical study of hybrid power system for a remote village in Algeria. *Energy 33*, 1128 - 1136.
- International Energy Agency - IEA. (2010). *Technology Roadmap: Solar photovoltaic energy*.
- International Eletrotechnical Commission - IEC. (2012). *Grid integration of large-capacity renewable energy sources and use of large-capacity*.
- International Energy Agency - IEA. (2011). *Trends in photovoltaic applications*.

- KEYASSOCIADOS. (s.d.). *calculadora de CO2*. Acesso em 22 de junho de 2012, disponível em <http://www.keyassociados.com.br/calculadora-de-emissao-co2-carbono.php>
- KITZES et al. (2007). Currents methods for calculating National Ecological Footprint account. *Science for Environment and Sustainable Society Vol.4*.
- Ministério de Minas e Energia - MME. (2008). *Estudo e determinação da capacidade de suporte e seus indicadores de sustentabilidade com vistas à implantação do plano de manejo da área de proteção ambiental do arquipélago de Fernando de Noronha*. Brasília.
- NOVAIS, C. R. (2012). Veículos Elétricos no conceito smart grid:novo mercado, desafios e oportunidades. *Seminário de Inovação de Itaipu*.
- REHMAN, S. A.-H. (2012). . Feasibility study of a Wind-PV-Diesel Hybrid power system for a village. *Renewable Energy 38*, 258 - 268.
- Renewable Energy Policy Network for the 21st Century - REN21. (2011). *Renewables 2011 - Global Status Report*.
- Sadrul Islam A.K.M et all. (2012). Hybrid energy system for St. Martim Island, Blangadesh: An optimized model. *Procedia Engineering 49*, 179 - 188.
- Senado Federal Brasileiro. (1992). *Relatório Final da Comissão Temporária da Rio Eco 92*. .
- WHITE. (1986). *Fluid Mechanics* (2ª ed.). New York: McGraw-Hill.
- World Wind Association - WWEA. (2012). *Wind Report Summary*.
- YADAV D.K, GIRIMAJI, S. P., BHATTI T.S. (2012). Optimal Hybrid Power System design using HOMER. *Institute of Eletrical and Eletronics Engineers (IEEE)*.